ISSN 1729-7516



ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(23), СЕНТЯБРЬ 2005

Издается с января 2000 г.

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

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



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(23) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2005 ЖЫЛ



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

ISSUE 3(23), SEPTEMBER 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

| О МОДЕРНИЗАЦИИ ТОПЛИВА РЕАКТОРА ИВГ1                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПОЛНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАНОВОГО СЫРЬЯ В ТЕПЛОВЫХ КАНАЛЬНЫХ<br>РЕАКТОРАХ                                                                                                                                                                 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВОСПРОИЗВОДСТВА РЕАКТОРОВ РБМК                                                                                                                                                                                 |
| ПРИМЕНЕНИЕ «FLUENT» ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ<br>В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ РАЗВИТИЕ<br>ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ                                                                          |
| РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА МОДУЛЬНОЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ<br>УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ ТРО НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕПЛАВА                                                                                                            |
| РАДИАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСЕЛКА ПЕРВОМАЙСКИЙ ВОСТОЧНО-<br>КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗДАНИЙ 22 И 22А БЫВШЕГО ИРТЫШСКОГО ХИМИКО-<br>МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА И ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К ПУНКТУ<br>ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИХМЗ |
| РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СТАНЦИЙ<br>МЕЖДУНАРОДНОЙСИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНОК<br>МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ                                                                                                     |
| НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ВЫЗВАННОЕ НАЛИЧИЕМ В<br>НЕЙ ПОЛОСТЕЙ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ                                                                                                                                        |
| <b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РЕСТАВРАЦИИ КАНАЛОВ</b><br><b>ПРОРЫВА ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ПО ДАННЫМ РТУТОМЕТРИИ</b>                                                                                           |
| ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЛИСТ ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ<br>"РАДИОАКТИВНОСТЬ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ" И "РАДИОАКТИВНОСТЬ В АРКТИКЕ<br>И АНТАРКТИКЕ"                                                                                      |

УДК 621.039.51

## О МОДЕРНИЗАЦИИ ТОПЛИВА РЕАКТОРА ИВГ1

<sup>1)</sup>Котов В.М., <sup>2)</sup>Прозорова И.В., <sup>1)</sup>Райханов Н.А.

#### <sup>1)</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов <sup>2)</sup>Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Исследован вариант работы реактора ИВГ1 с заменой шести каналов ВОТК на каналы с твэлами на основе топливных сердечников реактора ВВЭР-1000. Показано, что такая замена обеспечивает возможность работы реактора длительностью более 1000 часов на мощности 10 МВт. Оптимизация положения регулирующих барабанов в этом случае достигается за счет поштучного извлечения через 300-350 часов дополнительных поглотителей, установленных в центральной полости новых каналов.

#### Введение

В соответствии с действующей программой [1] в НЯЦ РК и ИАЭ НЯЦ РК проводятся работы по исследованию возможностей совершенствования топлива реакторов ИВГ1, РА и ВВР-К. Каждый из этих реакторов имеет особенности, определяющие подходы к решению поставленных задач. Для реактора ИВГ1 является желательным расширение его эксплуатационных возможностей в сторону увеличения длительности работ без ограничения по запасу реактивности при малых или отрицательных добавках реактивности, вносимых экспериментальными устройствами в петлевом канале.

Данная задача возникла исторически. Первая активная зона реактора [2] и ее варианты были предназначена для работы ТВС ядерных ракетных двигателей. Здесь длительность работы и соответствующий запас реактивности определялся параметрами ЯРД. В последующей модернизации топлива на уран-циркониевое с водяным теплоносителем [3] предусматривалась работа реактора в течение нескольких часов, но совместно с устанавливаемыми в КЭП изделиями, обеспечивающими добавку положительной реактивности.

Одна из возможностей последующей модернизации топлива этого реактора была представлена в [4]. Она основана на использовании модифицированных твэлов реакторов ВВЭР-1000, топливные сердечники которых производятся в Республике Казахстан.

## 1. Описание варианта модернизации технологического канала

## 1.1 Описание твэла

Конструкция твэла (рисунок 1) представляет собой набор топливных таблеток, заключенных в цилиндрическую оболочку из сплава Zr – 1% Nb, закрытых с двух сторон заглушками. По концам твэла в трубке помещаются разрезные втулки из сплава Zr – 1% Nb, которые удерживают столб таблеток в оболочке в определенном положении. В верхней части твэла предусмотрен газосборник для газообразных продуктов деления. В качестве топлива применяются спеченные таблетки из двуокиси урана. Зазор между топливом и оболочкой составляет 0.14 – 0.27 мм.



1 – нижняя заглушка, 2 – разрезная втулка, 3 – топливная таблетка, 4 – защитная оболочка, 5 втулка, 6 – наконечник

## 1.2 Конструкция ТК

Технологический канал состоит из следующих сборочных элементов: головки, хвостовика и корпуса.

Головка предназначена для стыковки ТК с перегрузочной машиной, приема теплоносителя и состоит из наконечника, пенала, переходника и уплотняющих колец. Головная часть наконечника выполнена под захват перегрузочной машины. Пенал является основным несущим элементом головки и представляет собой трубу наружным диаметром 75 мм, к которому с двух концов стыкуются наконечник и переходник. Крепление наконечника к пеналу - разъемное резьбовое, переходника к пеналу неразъемное сварное. Переходник представляет собой узел крепления головки к корпусу. Для этого предусмотрены 3 пружинные лапки, которыми головка фиксируется к корпусу, для чего в последнем предусмотрены соответствующие пазы. Кроме того, в головке предусмотрены 3 щели для входа теплоносителя в ТК.

Хвостовик предназначен для фиксации ТК в реакторе и вывода теплоносителя. Хвостовик состоит из сборного цилиндрического корпуса, шарикового

Рисунок 1. Твэл реактора ИВГ1.2М

замкового устройства, трех пружинных стопоров для крепления к корпусу ТК и уплотнительных колец. В корпусе хвостовика предусмотрены 3 щели для выхода теплоносителя из канала. Способ крепления хвостовика к корпусу канала идентичен способу крепления головки посредством трех пружинных стопоров. Для этого в корпусе ТК предусмотрены соответствующие пазы. Корпус канала (поз. 5) предназначен для установки внутри него ТВС, движения теплоносителя и установки биологической защиты, которая предназначена для снижения неблагоприятного радиационного воздействия на окружающую среду. Корпус канала представляет собой цилиндр внутренним диаметром 70 мм, наружным – 76 мм. На рисунках 3 и 4 показаны продольный и поперечный разрезы ТК в районе активной зоны.



1 – втулка биологической защиты, 2 – нижняя опорная решетка, 3 – нижняя решетка, 4 – труба для установки поглотителя нейтронов, 5 – корпус ТК, 6 – поглотитель нейтронов, 7 – бериллиевый вытеснитель, 8 – твэл, 9 – верхняя опорная решетка, 10 – пружина, 11 – втулка упорная

Рисунок 2. Продольный разрез ТК реактора ИВГ1.2М в районе активной зоны



4 – труба для установки поглотителя нейтронов, 5 – корпус ТК, 6 – поглотитель нейтронов, 7 – бериллиевый вытеснитель, 8 – твэл.

Рисунок 4. Поперечный разрез ТК реактора ИВГ1.2М в районе активной зоны.

Внутри корпуса канала устанавливается ТВС, которая содержит 22 твэла (поз. 8), расположенных вблизи корпуса канала. Оси твэлов расположены на двух окружностях, центром которых является ось ТВС (поз 4), которая представляет собой трубу внутренним диаметром 18 мм и толщиной стенки 2 мм. Внутри стержня ТВС располагаются дополнительные поглотители нейтронов (поз. 6) Бериллиевый вытеснитель (поз. 7) вдевается в стержень ТВС. Твэлы опираются на верхнюю (поз.9) и нижнюю (поз. 3) решетки с помощью сухариков и предварительно растянуты пружиной (поз. 10), которая служит для компенсации гидравлических потерь от сил, воздействующих на твэлы при движении теплоносителя. Пружина растягивает пучок твэлов вместе с верхней решеткой против движения теплоносителя. Верхняя часть пружины прикрепляется к втулке (поз. 11), которая, соответственно, неподвижно крепится к корпусу канала. Нижняя решетка опирается на втулку биологической защиты (поз. 1), которая в свою очередь опирается на пробку биологической защиты. Пробка биологической защиты неподвижно прикреплена к корпусу канала. Решетки выполнены из трех колец; наружной, средней и внутренней; наружными диаметрами соответственно: 70, 38 и 25 мм, толщиной 1 мм. Высота колец 5 мм. Среднее и внутреннее кольца соединены между собой 4-мя пластинами, а наружное кольцо соединяется с остальными профилированным держателем твэлов, в котором предусмотрены отверстия для крепления твэлов и канавки для прохода теплоносителя.

Такая конструкция позволяет получить равное энерговыделение в твэлах сборки, использовать твэлы одного типа по содержанию в них делящихся веществ, эффективно использовать делящееся вещество и получить достаточную свободу в размещении дополнительных элементов, в частности таких, как дополнительные поглотители нейтронов.

Элементы ТК выполнены из тех же материалов, что и ВОТК реактора ИВГ1.М. Головка, хвостовик, корпус канала и биологическая защита идентичны этим элементам ВОТК реактора ИВГ1.М, проверенных на надежность работы многолетним опытом эксплуатации без единого инцидента выхода реактора и его систем в аварийный режим. Оригинальными элементами являются ТВС в сборе, соответственно твэлы, решетки, пружина и крепежные элементы, а также опорные втулки. Малое количество новых элементов ТК снижает стоимость проекта в целом, повышает надежность конструкции и полностью соответствует установленным техническим требованиям к ТК.

## 2. Предпосылки использования комбинированной активной зоны

Наличие активной зоны с ВОТК, имеющими малое выгорание топлива, позволяет ставить вопрос о первом шаге в новой модернизации реактора, включающем установку в реактор не полного набора новых ТК, а лишь их части. Предлагается заполнить активную зону шестью новыми ТК с тем, чтобы новый состав зоны обеспечивал указанное во введении расширение функциональных возможностей реактора.

Новые ТК следует расположить в первом ряду каналов. При этом их влияние будет максимальным. Извлекаемые из первого ряда ВОТК следует равномерно установить в третий ряд вместо ВОТК с "короткой" активной зоной. Такие перестановки будут дополнительно способствовать повышению запаса реактивности.

Постановка задачи использования комбинированной активной зоны заставляет провести новый комплекс нейтронно-физических расчетов, включающий выбор обогащения топлива новых ТК, выбор геометрии и состава материала для дополнительных поглотителей нейтронов в модернизированных ТК. Причем комбинированная активная зона должна соответствующим образом управляться с помощью ныне действующей штатной системы управления и защиты реактора, как в начале кампании (с максимальным запасом реактивности), так и в ее конце (с минимальным запасом), а также при установке в КЭП различных устройств.

## 3. РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК

## комбинированной активной зоны ИВГ1.2М

## Изменение реактивности в ходе пусков и остановок реактора, температурные эффекты

Для длительной работы реактора на постоянном уровне мощности необходимо иметь определенный запас реактивности. Основными факторами влияющими на изменение реактивности являются температурные эффекты различных элементов реактора, отравление продуктами деления и выгорание делящихся веществ.

На рисунке 5 представлено изменение количества  $^{135}$ I и  $^{135}$ Xе в ходе трех пусков различной длительности (100, 40 и 10 часов) и после останова этих пусков при мощности реактора 10 МВт (поток  $4.2 \times 10^{12}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$  в гомогенизированном топливе).



Рисунок 5. Изменение концентрации <sup>135</sup>I и <sup>135</sup>Xe в ходе работы и после останова реактора. Расчетное количество <sup>235</sup>U в реакторе равно 10<sup>11</sup> ядер

Максимальной концентрации <sup>135</sup>Х на графике рисунке 5 соответствует потеря реактивности 2.4 %. Температурный коэффициент реактивности реактора ИВГ1 положительный. Температурный эффект реактивности при пусках длительностью до 3 часов по величине не превышает одной четверти эффекта отравления от <sup>135</sup>Хе [5].

# Изменение реактивности при выгорании топлива

Выгорание топлива приводит к уменьшению количества делящихся веществ в активной зоне и к накоплению стабильных и долгоживущих продуктов деления со сравнительно небольшими сечениями поглощения нейтронов. Эти продукты деления обеспечивают дополнительную постоянную отрицательную добавку реактивности на уровне ~4 β при длительной работе реактора на постоянном уровне мощности.

При использовании металлического и оксидного уранового топлива, температура которого не превышает ~400 – 600°С, допустима величина выгорания урана до 5 % от общего количества урана.

## Требования к системе управления реактором

Система управления реактора должна обладать эффективностью, обеспечивающей компенсацию изменений реактивности связанных с описанными выше эффектами работы реактора. Она должна в любых условиях иметь возможность быстрого надежного гашения цепной реакции и исключить самопроизвольный выход реактора в критическое состояние после его останова.

При модернизации топлива в каналах реактора ИВГ1 следует иметь ввиду, что основные функции управления реактором будет исполнять система 10 регулирующих барабанов. Поддерживать оптимальное состояние регулирующих барабанов может штатная система компенсации реактивности (12 стержней СКР).

Длительная работа реактора с превышением интеграла мощности 3000 МВт×сут не приведет к выходу системы барабанов и штатной СКР из рабочего диапазона регулирования. В обязательном случае нужно предусмотреть систему дополнительной компенсации реактивности.

### Характеристики барабанов

10 регулирующих барабанов реактора ИВГ1 имеют эффективность около 11,3  $\beta_{эф}$ . В рабочем состоянии реактора положение барабанов должно быть близким к середине их возможной области перемещения. Это соответствует тому, что реактор имеет запас подкритичности при полном вводе поглощающих элементов в активную зону (~5- 6  $\beta$ ), превышающий температурный эффект и возможную добавку реактивности в ходе работы до следующей регулировки систем компенсации реактивности, проходящей при остановленном реакторе.

## Характеристики системы компенсации реактивности

Для компенсации изменений реактивности в процессе эксплуатации в центральной сборке имеется система СКР, состоящая из 12 подвижных стержней, расположенных в центральном вытеснителе. Изменение реактивности с помощью подвижных стержней производится путём их перемещения по высоте при вращении вручную вала механизма. Эти работы проводятся в заведомо подкритическом состоянии.

Эффективность 12 СКР ~4.8 Вэфф.

## Изменение реактивности объектами испытаний

Реактор ИВГ1 используется для многочисленных исследований, которые требуют загрузки в реактор экспериментальных устройств. Эти объекты могут содержать в преобладающей степени либо поглощающие материалы, либо делящиеся вещества.

Величину реактивности, которая может быть внесена экспериментальными устройствами следует предусматривать в диапазоне от  $-3 \text{ до} + 3 \beta$ .

## Расчет эффективности дополнительных поглотителей

Система дополнительных поглотителей должна обеспечивать в начальный период работы реактора (когда еще нет выгорания топлива) такой уровень критичности реактора, который будет при максимальном выгорании топлива без дополнительных поглотителей.

В нашем случае имеется возможность установки 6 поглощающих стержней в новые каналы реактора. Размещение новых каналов в первом ряду реактора позволяет извлекать их по одному практически без изменения однородности эффективности регулирующих барабанов.

Изменение реактивности при извлечении (установке) любого из дополнительных поглотителей не должно быть большим ~3 β.

## Логика работы общей системы управления и защиты реактора

В начале кампании, при новом топливе, в технологические каналы ИВГ1.2М установлены поглотители нейтронов. Работа реактора в этой комплектации ведется в стационарном режиме до тех пор, пока реактивность за счет выгорания снизится на величину эффективности одного поглотителя в канале ИВГ1.2М.

После данного снижения реактивности проводится извлечение одного из поглотителей. Извлечение проводится при остановленном реакторе в подкритическом состоянии, но с положением барабанов, обеспечивающем введение отрицательной реактивности большей эффективности поглотителя в канале плюс 1 β. Система СУЗ реактора включена, ведется контроль критичности. Извлечение поглотителя проводится ПЗУ реактора по команде с пульта СУЗ. После извлечения поглотителя положение регулировочного барабана возвращается в оптимальную область.

Для стержней СКР можно считать оптимальным их среднее положение в активной зоне. При необходимости корректировки положения регулировочных барабанов они могут быть перемещены в ту или иную сторону.

### Расчетная база данных

Поперечный разрез расчетной модели реактора ИВГ1 представлен на рисунке 7. Расчетная конфигурация реактора ИВГ для программы МСNР максимально соответствует реальной конструкции реактора. В этой конфигурации задана реальная концентрация урана по всем топливным зонам профилирования в ВОТК. В модели может быть изменено положение стержней СКР. В настоящей работе они оставались в одном положении – вверху. Модель позволяет изменять угловое положение регулирующих барабанов от 0 градусов (поглощающие элементы в зоне) до 180 градусов (поглощающие элементы вне зоны).

Были проведены расчеты критичности реактора ИВГ1 со смешанным составом активной зоны – шестью каналами ИВГ1.2М и двадцатьючетырьмя каналами ВОТК. Каналы ИВГ1.2М устанавливались в первом ряду реактора. Шесть каналов ВОТК из первого ряда перемещены в третий ряд. Шесть "укороченных" каналов ВОТК извлечены из третьего ряда реактора.



Рисунок 7. Модель реактора ИВГ1.2М с шестью новыми каналами. Барабаны в активной зоне (градус разворота барабанов равен нулю)



Рисунок 8. Зависимость коэффициента размножения и относительного потока в центральном канале от обогащения топлива каналов ИВГ1.2М.

Обогащение топлива каналов ИВГ1.2М в расчетах варьировалось от 7 до 15 % по <sup>235</sup>U. Изменение критического состояния и относительного потока в центральном канале без его загрузки какими-либо объектами представлено на рисунке 8.

Дополнительные поглотители каналов ИВГ1.2М в модели имеют диаметр равный 1 см и выполнены из карбида бора.

Было выбрано стартовое состояние реактора с обогащением 8 % в топливе каналов ИВГ1.2М и установленными в эти каналы поглощающими элементами. При этом критичность реактора была достигнута при угле регулирующих барабанов равном ~70 градусам.

Таблица 1.Распределение энерговыделения в каналах различных рядов и в зонах профилирования каналов BOTK в начале и конце кампании

| рал | Зона           | Начало   | Окончание |
|-----|----------------|----------|-----------|
| рлд | профилирования | кампании | кампании  |
| 1   |                | 1.01     | 1.108     |
|     | Центр          | 0.349    | 0.350     |
| 2   | Промежуточная  | 0.343    | 0.344     |
| 2   | Периферия      | 0.309    | 0.306     |
|     | Сумма          | 1.00     | 1.00      |
|     | Центр          | 0.353    | 0.346     |
| 3   | Промежуточная  | 0.338    | 0.351     |
| 3   | Периферия      | 0.309    | 0.303     |
|     | Сумма          | 0.53     | 0.497     |

Был проведен расчет критичности после работы реактора с общим выгоранием топлива в активной зоне равном 500 гр<sup>235</sup>U. Проведен расчет величин выгорания <sup>235</sup>U в каналах трех рядов. Для этого использовалось начальное распределение потока нейтронов в топливе этих каналов, представленное в столбце 3 таблицы 1. Энерговыделение в зонах профилирования нормировано на общее энерговыделение в данном канале, а общее энерговыделение в каналах нормировано на значение энерговыделения в канале 2 ряда.

После работы реактора с заданным выгоранием содержание <sup>235</sup>U в каналах первого ряда уменьшилось на 4.3 %, второго ряда на 14.1 %, третьего ряда на 8.1 %. Было определено положение регулирующих барабанов в состоянии критичности при оптимальном количестве удаленных из каналов

#### Литература

- 1. Научно-техническая программа "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан". Утверждена Постановлением Правительства РК № 405 от 12 апреля 2004 г.
- 2. Павшук В.А., Орлов Ю.В., Котов В.М. и др. Физический пуск реактора ИВГ1. Отчет б/н. 1972 г. 258 стр
- 3. Сорокин Б.В. Чертков Ю.Б. Алимханов А.А и др. Подготовка испытаний водоохлаждаемых сборок в петлевом устройстве установки 300 МВ. Физический пуск реактора ИВГ.1М (после реконструкции). Отчет. Инв. № К-33139.-Семипалатинск-21. 1990 г.
- Зверев В.В., Котов В.М., Прозорова И.В и др. Возможности модернизации канального исследовательского реактора ИВГ.1М. Доклад на конференции "Канальные реакторы. Проблемы и решения". Москва. НИКИЭТ, 19-22 октября 2004 г.
- 5. Колодешников А.А, Котов В.М., Сахаровский В.В. и др. Проведение исследований в обоснование безопасности эксплуатации РУ 300 МВ и доработка проекта ПУ РУ 300 МВ. Отчет. Инв.№ К-33636.-Семипалатинск-21. 1992 год.

ИВГ1.2М поглотителей. Оно оказалось равным 70 градусам при трех извлеченных поглотителях из каналов ИВГ1.2М в стартовом состоянии реактора (после останова длительностью более 50 часов).

Определено распределение энерговыделения по рядам каналов и в зонах профилирования каналов ВОТК в конце кампании. Оно представлено в столбце 4 таблицы 1.

## Анализ результатов

Уменьшение мощности каналов ИВГ1.2М по сравнению с каналами ВОТК второго ряда объясняется влиянием <sup>238</sup>U на диффузию тепловых нейтронов в канале. Количество <sup>238</sup>U в топливе канала ИВГ1.2М значительно больше, чем <sup>235</sup>U. Сечение рассеяния и поглощения <sup>238</sup>U больше сечений циркония в канале ВОТК. Соответственно, уменьшается и поток в центральном канале (рисунок 8).

Использованное в расчете выгорание 500 г  $^{235}$ U соответствует выделению 3.4×10<sup>13</sup> Дж. Этой энергии достаточно для работы реактора в течение 1000 часов на мощности 10 МВт. При длительной работе реактора с данным выгоранием на мощности 10 МВт положение регулирующих барабанов будет в районе 100 – 110 градусов.

#### Заключение

Показана работоспособность варианта первичной модернизации реактора ИВГ1 с водяным теплоносителем, отличающегося заменой шести каналов ВОТК первого ряда на каналы ИВГ1.2М с твэлами на основе топливных сердечников реактора ВВЭР-1000 с обогащением 8 %.

Данный вариант реактора ИВГ1 может работать на мощности 10 МВт с длительностью более 1000 часов. Оптимизация положения регулирующих барабанов при длительной работе проводится за счет извлечения дополнительных поглотителей нейтронов, установленных в каналах ИВГ1.2М. Ориентировочное время извлечения очередного поглотителя из каналов ИВГ1.2М равно 300 – 350 часов.

Частичная замена каналов ВОТК в реакторе позволит провести модернизацию реактора с расширением его функциональных возможностей и с минимальными затратами.

## ИВГ1 РЕАКТОРЫНЫҢ ОТЫНЫН ЖАҢҒЫРТУ ТУРАЛЫ

<sup>1)</sup>Котов В.М., <sup>2)</sup>Прозорова И.В., <sup>1)</sup>Райханов Н.А.

## <sup>1)</sup>Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов <sup>2)</sup>ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

ИВГ1 реакторының ВОТК алты арнасын ВВЭР-1000 реакторының отын өзекшелері негізіндегі твэлді арналарына айырбастай отырып жұмыс істеу нұсқасы зерттелді. Мұндай ауыстыру реактордың 10 МВт қуаттылықта 1000 сағаттан астам ұзақтықта жұмыс істеу мүмкіндігін беретіндігі көрсетілген. Реттеуіш барабандардың орналасуын оңтайландыруға, бұл жағдайда, жаңа арналардың орталық қуысында орнатылған қосымша жұтқыштарды 300-350 сағаттан кейін бір-бірлеп алып шығу есебінде қол жеткізілмек.

### **MODERNIZATION OF IVG-1 REACTOR FUEL**

## <sup>1)</sup>V.M. Kotov, <sup>2)</sup>I.V. Prozorova, <sup>1)</sup>N.A. Raikhanov

## <sup>1)</sup>National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov <sup>2)</sup>Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

It is studied a version of IVG-1 reactor operation with replacement of six channels of water-cooled fuel channel (WCFC) by channels with fuel elements based on VVER-1000 reactor fuel pellets. It is demonstrated that this replacement provides a possibility for reactor to operate more that 1000 hours with 10MW power. In the case the optimization of the control drums position is developed by single-piece removing of additional absorbers installed in the central void of the new channels in 300-350 hours.

УДК 621.039.51

### ПОЛНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАНОВОГО СЫРЬЯ В ТЕПЛОВЫХ КАНАЛЬНЫХ РЕАКТОРАХ

#### Котов В.М.

#### Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

Исследовано влияние уровня потерь нейтронов в реакторах, работающих по технологии суперпозиции зон в равновесной по изотопам плутония кампании на достижимый уровень использования сырья, величину уменьшения мощности в топливе со временем, изменение оптимального состава топлива, характер изменения реактивности и достижимое выгорание в кампании.

Показано и обосновано положительное влияние ведения равновесной по изотопам плутония кампании. Показаны преимущества тепловых реакторов, работающих в оптимальном режиме суперпозиции зон над другими видами реакторов.

В работе [1] была показана возможность полного использования уранового и ториевого сырья в тепловых реакторах. Основной акцент в этой работе сделан на использовании динамического нагружения топлива, которое обеспечивает возможность существенного снижения поглощения нейтронов в <sup>135</sup>Хе при работе на больших потоках нейтронов.

Динамическое нагружение требует большой частоты перестановок топлива в активной зоне реактора. В рассматриваемых вариантах работы реактора перестановки топлива осуществлялись до 7 раз в сутки. Основная сложность такой работы реактора связана с доказательством стойкости твэлов к периодическим изменениям режимов их работы. Препятствие принципиально преодолимое, но требующее больших материальных и временных затрат.

Как показывают проводимые по программе [2] исследования, имеются хорошие возможности повышения использования топливного сырья в реакторах на тепловых нейтронах без использования режима динамического нагружения.

# Воспроизводство, полнота использования сырья и допустимые потери нейтронов

В соответствии с общими представлениями, для полного использования сырья необходимо чтобы число нейтронов поглощаемых в делящемся веществе было равно числу нейтронов идущем на воспроизводство делящегося вещества. Это будет возможно в случае, если количество вторичных нейтронов на один акт поглощения в делящемся веществе **v** превышает число 2 на величину общих потерь нейтронов в реакторе.

Потери только в продуктах деления при потоке в топливе на уровне  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>c<sup>-1</sup> составляют около 8 % от поглощения в делящемся веществе. Поэтому реактор с делящимся <sup>235</sup>U (v = 2.07) не может обеспечить полного использования сырья. Для реактора с <sup>239</sup>Pu (v = 2.09) дополнительные потери нейтронов не должны превышать 1 %, а для реактора с <sup>233</sup>U их можно увеличить до 10 %.

Общие потери нейтронов в реакторе разделяются на потери в продуктах деления, в конструкционных материалах, в органах регулирования и на утечку.

Расчеты показывают, что потери нейтронов на утечку и в конструкционных материалах на уровне 4 -6 % можно обеспечить в реакторах с тяжелой водой в качестве замедлителя и теплоносителя. Те же потери на уровне до 10.5 % можно обеспечить в реакторах с графитом в качестве замедлителя и тяжелой водой в качестве теплоносителя. Замена теплоносителя в таких реакторах на обычную воду увеличивает величину потерь до ~13.5 % [3].

Для управления реактором с "нулевыми" эффектами реактивности, после его выхода на стационарный режим, достаточно эффективности органов регулирования ~0.5 β, соответствующие потери составят ~0.35 %.

# Роль равновесного режима и принципа суперпозиции зон

Эффективное использование сырья в тепловых реакторах без динамического нагружения достижимо только при одновременном использовании технологии суперпозиции зон в равновесном (или максимально приближенном к равновесному) режиме. Это обусловлено двумя факторами.

- Во первых, равновесный режим обеспечивает использование с большим вкладом таких делящихся нуклидов, как <sup>239</sup>Pu и <sup>241</sup>Pu вместо <sup>235</sup>U, что существенно повышает количество нейтронов в расчете на акт деления.
- Во вторых, режим суперпозиции обеспечивает перенос избыточных нейтронов из части кампании с положительной реактивностью в часть кампании с отрицательной (или малой) реактивностью, в которой идет расширенное воспроизводство делящихся веществ. Никаких дополнительных поглотителей для компенсации положительной реактивности в этом случае не требуется.

### Основные характеристики реакторов

работающих по технологии суперпозиции зон с максимально возможным приближением к равновесному режиму при изменении величины потерь нейтронов *R* от 3 до 14 % представлены в таблице 1.

| исходное  | R, %              | 14.0   | 12.0    | 10.0    | 8.00    | 6.00    | 5.00    | 4.00    | 3.00    |
|-----------|-------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | Cdv, %            | 1.65   | 1.5     | 1.31    | 1.14    | 0.91    | 0.78    | 0.683   | 0.67    |
|           | Тк, час           | 14000  | 16000   | 19000   | 21000   | 23000   | 22500   | 30000*  | 30000*  |
| ROPEON D  | 235               | 0.61 / | 0.555 / | 0.474 / | 0.400 / | 0.260 / | 0.150 / | 0.048 / | 0.035 / |
| подоор в  | 0                 | 0.025  | 0.010   | 0.004   | 0.002   | 0.001   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| расчетах  | <sup>239</sup> Pu | 0.338  | 0.376   | 0.448   | .514    | 0.620   | 0.733   | 0.821   | 0.938   |
|           | <sup>240</sup> Pu | 0.233  | 0.267   | 0.326   | 0.377   | 0.44    | 0.514   | 0.584   | 0.593   |
|           | <sup>241</sup> Pu | 0.052  | 0.064   | 0.077   | 0.085   | 0.097   | 0.115   | 0.131   | 0.135   |
|           | <b>Y</b> , %      | 4.9    | 5.1     | 5.3     | 5.9     | 6.3     | 6.2     | 7.6     | 7.4     |
| результат | Wotn              | 0.472  | 0.514   | 0.591   | 0.65    | 0.76    | 0.864   | 0.943   | 0.957   |
|           | Vp                | 2.1018 | 2.1053  | 2.1084  | 2.1065  | 2.107   | 2.1095  | 2.1117  | 2.1119  |
|           | P, %              | 2.04   | 3.55    | 6.11    | 9.32    | 19.00   | 37.62   | 100.00  | 100.00  |

Таблица 1 .Характеристики реакторов с приближением к равновесному режиму и использующих урановое сырье в зависимости от потерь нейтронов в активной зоне

Расчет представленных характеристик проводился по программе, описанной в [1] следующим образом. Исходным параметром задавался уровень потерь нейтронов *R*. Во всех расчетах принято  $K_{pe8} = 2.10$ , поток тепловых нейтронов  $\Phi = 10^{14}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Значения величин начального содержания делящихся веществ в топливе Cdv, распределения долей топливных нуклидов <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu и длительности кампании *Tk* варьировались в ряде расчетов таким образом, чтобы в лучшем варианте расчетов достигалось наибольшее выгорание *Y* при нулевом интеграле реактивности в кампании и равенстве числа топливных нуклидов в начале и конце кампании (за исключением <sup>235</sup>U).

Затем для выбранного варианта рассчитывалась величина использования топливного сырья P. Относительная мощность твэла в ходе кампании изменяется монотонно. Приведенная относительная мощность твэла на конец кампании *Wotn* рассчитана на основе предположения о постоянстве потока нейтронов в технологии суперпозиции зон. Количество вторичных нейтронов  $v_p$  на один акт их поглощения в делящихся ядрах приведено как среднее для времени кампании.

#### РАСЧЕТ ПОЛНОТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЯ

В равновесных кампаниях возможны 5 типов проведения замены отработавшего топлива на свежее в зависимости от требуемой концентрации <sup>235</sup>U в замене, величины выгорания и технологии замещения свежей добавки в отработавшем топливе. Соответственно с этим меняются условия расчета использования сырья в кампании. Рассмотрим эти варианты.

Требуемая концентрация<sup>235</sup>U в добавке топлива, равной доле выгоревшего за кампанию топлива Y, определяется выражением:

$$5Cz = Cdv \times 5C0 / Y; \tag{1}$$

Здесь  ${}^{5}Cz$  - концентрация  ${}^{235}$ U в добавке топлива, Cdv – содержание делящихся веществ в начальном топливе,  ${}^{5}C_{0}$  – начальное содержание  ${}^{235}$ U в делящемся веществе.

Вариант 1. Наиболее благоприятный. В нем требуемая концентрация <sup>235</sup>U меньше его концентрации в природном уране:  ${}^{5}Cz < {}^{5}Cpr$ . Некоторое неудобство в этом варианте связано с необходимостью готовить добавку из смеси природного урана и отвалов обогатительного производства. Вариант соответствует полному использованию сырья: P = 1.

Вариант 2. В нем требуемая концентрация <sup>235</sup>U равна его концентрации в природном уране:  ${}^{5}Cz = {}^{5}Cpr$ . Добавка готовится из природного урана. Вариант соответствует полному использованию сырья: P = 1.

Вариант 3. Требуемая концентрация  ${}^{235}$ U больше его концентрации в природном уране:  ${}^{5}Cz > {}^{5}Cpr$ . Разделяется на три подварианта.

Вариант За. Масса добавки топлива равна массе продуктов деления. Добавка осуществляется обогащенным ураном. В этом случае доля использования сырья определяется выражением:

$$P = Y \times {}^{5}Cpr / (Cdv \times {}^{5}C_{0} \times (Cdv \times {}^{5}C_{0} - {}^{5}Cot) / ({}^{5}Cpr - {}^{5}Cot));$$
(2)

Из вариантов "3" это наиболее затратный.

Вариант 36. Используется технология с уменьшением затрат на обогащение урана. В большой степени эта возможность основана на том факте, что в отработавшем топливе реактора предлагаемой технологии практически нет изотопа<sup>235</sup>U. Становится возможным удаление части <sup>238</sup>U из отработавшего топлива после химического отделения его от изотопов плутония. Вместо продуктов деления и части удаленного <sup>238</sup>U устанавливается природный уран. Заменяется часть остаточного <sup>238</sup>U или, в крайнем случае, весь его остаток. Вариант становится работоспособным, когда выполняется условие:

$${}^{5}Cz \times Y / {}^{5}Cpr \le 1 - Y; \tag{3}$$

Доля использования сырья в этом случае определяется выражением:

$$P = Y \times {}^{5}Cpr / {}^{5}Cz; \qquad (4)$$

Вариант Зв. Условие (3) не выполняется. В этом случае весь остаток  $^{238}$ U и продукты деления заменяются на обогащенный уран. Но затраты на обогатительные работы здесь меньше, чем в варианте За, а доля использования сырья несколько больше.

### Анализ таблицы 1

При уменьшении потерь с 14 до 3 % оптимальная начальная концентрация делящихся веществ в топливе *Cdv* снижается от 1.65 до 0.67, начальная доля неравновесного  $^{235}$ U в делящемся веществе уменьшается с 0.61 до 0.035, доля плутониевых нуклидов растет. Выгорание растет незначительно с 4.9 до 7.4 %, число вторичных еще менее с 2.10 до 2.11, мощность твэла к концу кампании изменяется относительно начальной с величины 0.47 до 0.96.

Современные тепловые реакторы близкие к технологии суперпозиции зон работают вне оптимального для них диапазона. РБМК имеет превышение над оптимальным Cdv (вместо 1.5 используется 1.8 и есть стремление увеличить) САNDU вместо 1.15 использует 0.71 со стремлением увеличить), но режим с начальной загрузкой чистым ураном напрочь уводит эти реакторы из оптимальных условий. Если обеспечить приближение к равновесному топливному режиму, то можно будет обеспечить следующую полноту использования сырья:

РБМК – с теплоносителем в виде простой воды до 4.7 %.

CANDU – с теплоносителем в виде простой воды до 7.5 %.

РБМК – с теплоносителем в виде тяжелой воды до 5.8 %.

CANDU – с теплоносителем в виде тяжелой воды до 40 %.

Режим суперпозиции зон в равновесном цикле обеспечивает повышение числа вторичных нейтронов на деление до 2.11, что выше по эффекту, чем ведение режима динамического нагружения в топливе с делящимся веществом в виде <sup>235</sup>U. Так в обычном варианте работы такого реактора доля захвата <sup>135</sup>Хе составляет 3 – 4.5 %, в режиме динамического нагружения она может быть снижена до 1 %. Экономия нейтронов составит 2 – 3.5 % против 4 % в описываемом варианте.

Режим работы с высокой эффективностью использования сырья (потери нейтронов 4 % и менее) обеспечивает возможность поддержания постоянной мощности ТВС в ходе кампании, исключения регуляторов расхода теплоносителя в трактах ТВС.

Уменьшение мощности со временем здесь связано не с какими-то недоработками технологии, а тем, что топливо в установившемся режиме и перед выгрузкой из реактора содержит <sup>239</sup>Np, который в ходе последующей выработки свежего топлива переходит в <sup>239</sup>Pu.

## Изменение динамики реактивности

На рисунке 1 представлено изменение реактивности в ходе развернутых кампаний в вариантах реакторов по таблице 1.

Реакторам с меньшими потерями нейтронов присущи меньшие колебания реактивности в развернутой кампании. При потерях нейтронов менее 4 % реактивность к концу развернутой кампании не ограничивает длительность этой кампании. Но при увеличении длительности в данных вариантах будет наблюдаться отклонение состава топливных нуклидов от равновесного и выход из оптимума.



Рисунок 1. Изменение реактивности в ходе оптимизированных кампаний с равновесным топливом, отличающихся уровнем потерь нейтронов

Желательно обеспечить оперативный запас реактивности реактора на уровне  $\sim 0.5 \beta$ . Это не позволяет вывести реактор из йодной ямы в случае проведения нерационального маневра мощностью. Конечно, это свойство не является положительным, но его можно вполне ввести в практику. Потенциально, КИУМ та-

кого реактора равен 1.0, т.к. не требуется остановок реактора для перегрузок топлива. Если в течение года будет практиковаться один вход в йодную яму, то это будет соответствовать снижению КИУМ на 0.01. Такая и даже большая плата вполне позволительна за полное использование сырья.

#### Динамика потребности в сырье

различных реакторов. Для ее расчета необходимо учитывать количество топлива в активной зоне и параметры топлива замены, обеспечивающей работу реакторе в его топливном цикле.

В характеристиках динамики потребности в сырье следует использовать еще две простые величины:

- Время замораживания топлива, заключенного в активной зоне. Эта величина показывает на возможную длительность работы на топливе, установленном в активной зоне, при его полном использовании.
- Время использования отходов обогатительного производства. Эта величина показывает на

длительность использования отходов обогатительного производства в том реакторе, для которого проводился процесс обогащения природного урана.

В таблице 2 приведены характеристики современных тепловых реакторов ВВЭР-1000, РБМК, САNDU, быстрого реактора БРЕСТ-1200, перспективных реакторов, которые можно построить с небольшими затратами на основе РБМК и CANDU, а также тяжеловодного реактора по оптимизированной технологии суперпозиции зон.

| Nº |                                                               | BBЭP-1000          | РБМК               | CANDU              | БРЕСТ | РБМК<br>- new      | CANDU<br>- new     | РСПЗ ЖС          |
|----|---------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|------------------|
| 1  | Масса топлива в активной зоне, т                              | 70.0               | 180.0              | 119.0              | 70.0  | 150.0              | 110                | 40               |
| 2  | Масса сырья, нужная для активной зоны, т                      | 592.0              | 600.0              | 119.0              | 1481  | 280.0              | 119.0              | 40               |
| 3  | Содержание делящихся веществ, %                               | 4.4                | 1.8                | 0.71               | 13.0  | 1.24               | 0.76               | 0.68             |
| 4  | Обогащение замены, %                                          | 4.4                | 1.8                | 0.71               | 0.1   | 0.71               | 0.71               | 0.456            |
| 5  | Мощность тепловая, МВт                                        | 3000               | 3200               | 2800               | 2700  | 3200               | 2800               | 3000             |
| 6  | Эффективный поток в топливе, см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> | 2×10 <sup>13</sup> | 2×10 <sup>13</sup> | 7×10 <sup>13</sup> |       | 4×10 <sup>13</sup> | 8×10 <sup>13</sup> | 10 <sup>14</sup> |
| 7  | Годовая потребность в топливе, т                              | 28.37              | 63.14              | 105.0              | ~7.7  | 59.7               | 38.6               | 11.7             |
| 8  | Годовая потребность в сырье, т                                | 200.0              | 175.5              | 105.0              | ~1.0  | 13.0               | 2.38               | 1.0              |
| 9  | Доля использования сырья, %                                   | 0.56               | 0.77               | 1.06               | 100   | 7.7                | 42                 | 100              |
| 10 | Время замораживания топлива, лет                              | 58                 | 150                | 99                 | 58    | 125                | 92                 | 33               |
| 11 | Время использования отходов, лет                              | 0                  | 0                  | 0                  | 2900  |                    |                    | 0                |

| Таблииа | 2 .Характ   | геристики                          | некоторых                             | современны                            | x u ne | рспективных | реакторов         |
|---------|-------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|-------------|-------------------|
|         | · · · · · · | · · <b>r</b> · · · · · · · · · · · | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |        | <b>r</b>    | r · · · · · · · · |

\* -из отходов разделительного производства.

#### Сравнение различных технологий

Удобно сравнить динамику потребности в сырье реакторов различных типов в графическом виде. На рисунке 1 представлены эти данные для трех современных тепловых реакторов – ВВЭР-1000, РБМК-1000 и CANDU Bruce A, а также быстрого реактора БРЕСТ-1200, модернизированных РБМК, CANDU и оптимального тяжеловодного реактора. Для сравнения приведен вариант "идеального" реактора, в котором для составления активной зоны требуется нулевое количество топлива.

Все данные приведены к тепловой мощности 3000 МВт. Постоянство потребности в сырье реактора БРЕСТ сохранится на период в 2900 лет, пока он (и его последователи) будут использовать отвалы обогатительного производства, образовавшиеся при запуске реактора.

Вариант "РБМК-new" – реактор с загрузкой топлива равной загрузке РБМК с параметрами топлива по столбцу 3 таблице 2. Вариант "CANDU-new" – реактор с загрузкой топлива равной загрузке САNDU с параметрами топлива по столбцу 5 таблице 2. Вариант "РСПЗ-ЖС" – тяжеловодный оптимизированный реактор с жестким спектром с параметрами топлива по столбцу 6 таблице 2.

Потребности в сырье современных тепловых реакторов становятся равными потребности реактора БРЕСТ через 12 – 20 лет. Модифицированный РБМК выходит на этот уровень потребности через 112 лет, модифицированный САNDU – через 325 лет, а оптимизированный тяжеловодный реактор – через 1800 лет.

Интересно подсчитать потребности в сырье при достижении мировой атомной энергетикой с различными реакторами уровня мощности, обеспечиваемого реакторами на быстрых нейтронах [4] (5000 ГВт) при полном использовании дешевых запасов уранового сырья. Для модифицированного РБМК она составляет ~6.5 млн тонн, для модифицированного CANDU ~2.9 млн тонн, для оптимизированного тяжеловодного реактора ~0.75 млн тонн.



Рисунок 2. Динамика потребности в сырье современных тепловых реакторов, реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ, перспективных тепловых реакторов и "идеального" реактора

Эти данные говорят о том, что реакторы на тепловых нейтронах, работающие по оптимальной технологии суперпозиции зон в кампании с равновесным режимом по делящимся нуклидам практически не имеют ограничения по уровню достижимой мощности к концу 21 века.

Заметим, что запасы уранового сырья, пригодные к использованию в модифицированных реакторах существенно выше, чем оцениваемые ныне дешевые запасы урана. Затраты на добычу урана для этих реакторов могут быть в 10-100 раз большими.

## Особенности технологии суперпозиции зон с набором **ТВС**

Реализуемые в настоящее время в реакторах РБМК и CANDU режимы перегрузок топливных каналов являются приближением к технологии суперпозиции зон, но приближением далеким от эффективной реализации этой технологии. Рассмотрим некоторые условия эффективной работы технологии суперпозиции зон.

В работах [1] и [5] приведен случай размещения топлива различных временных зон в каждой из ТВС реактора, причем в данных ТВС топливо различных временных зон установлено в одинаковом потоке нейтронов. Недостатком этого варианта является необходимость дезинтегрированности конструкции ТВС для обеспечения возможности независимой перегрузки твэлов всех, установленных в нее, временных зон.

Несмотря на то, что число временных участков в ТВС ограничено числом установленных в нее твэлов, общее эффективное число временных зон можно увеличить за счет равномерности перегрузок во времени самих ТВС. Временные зоны в ТВС отличаются начальной загрузкой в них топливных нуклидов.

Достоинством данной схемы является хорошее соблюдение условий равноценного облучения топлива различных временных зон даже при относительно неблагоприятном ходе кампании (варианты с потерями нейтронов более 5 %).

Возможен вариант загрузки топлива различных временных зон в различные TBC реактора. В этом случае необходимо, чтобы TBC различных типов были равномерно размещены в активной зоне, и желательно (для соблюдения положений представленного определения технологии суперпозиции зон) чтобы потоки нейтронов в топливе TBC каждого типа были бы одинаковы.

При больших выгораниях топлива в кампании характеристики топлива в ТВС будут значительно изменяться, как минимум за счет убыли сырьевых компонент. Соответственно, будут изменяться характеристики ячейки активной зоны, окружающей ТВС. Если в кампании происходит значительное уменьшение делящихся веществ в ТВС, то будет наблюдаться уменьшение потока нейтронов в топливе ТВС с большим выгоранием. Такой случай соответствует режимам современных РБМК и САNDU. Технология суперпозиции в данном случае малоэффективна.

Если же к концу кампании количество делящихся веществ остается практически неизменным, то и количество генерируемых в ячейке нейтронов будет неизменным, а поток нейтронов в топливе может даже возрасти за счет убыли в нем сырьевой компоненты. В этом случае, хотя и не соблюдается принцип равенства потоков в различных временных зонах, цели технологии суперпозиции зон будут успешно достигаться. Данный факт подтвержден расчетами на модели реактора с двумя типами временных зон.

Методология более точного расчета характеристик кампании в этом случае должна учитывать изменение потока нейтронов в большем числе временных зонах в ходе кампании. Требуемая модификация программ существенно увеличит размерность программных продуктов и объем расчетов для корректного определения изменения потоков.

По оценкам ожидается, что будет возможен режим с хорошей стабилизацией мощности ТВС в ходе кампании при уровне потерь нейтронов около 5 %.

#### Дополнительные совершенствования

Проработки реактора с минимальными потерями нейтронов, обладающего высоким воспроизводством делящихся веществ, показали хорошую работоспособность следующих решений:

Использование жесткого спектра нейтронов. Ужесточение спектра нейтронов в канальном реакторе с тяжелой водой можно обеспечить за счет уменьшения шага расстановки ТВС. Так в расчетах [5, 6]рассматривались ячейки с шагом 15 – 18 см. Такая решетка увеличивает эффективные сечения сырьевых компонент топлива и несколько меньше делящихся веществ. Вследствие этого появляется возможность повышения концентрации делящихся веществ в топливе со снижением утечки нейтронов.

Сближение ТВС обеспечивает также эффект выравнивания полей нейтронов в ТВС различных временных групп.

Использование дополнительных источников нейтронов. Дополнительным источником нейтронов к реакции деления в реакторе с тяжеловодным замедлителем является реакция "n-2n", проходящая на ядрах дейтерия. Ее вклад в коэффициент размножения может приближаться к 0.2 % при потере на захват в этих же ядрах около 0.5 %.

Иное соотношение наблюдается на ядрах бериллия, введенного как конструкционный элемент в состав ТВС. Здесь реакция "n-2n" составляет в лучших вариантах до 2.8 % при доле реакции захвата около 1.2 %. Общий баланс реакций на бериллии становится положительным и значимым для генерации новых делящихся веществ в технологии суперпозиции зон.

Использование изотопного разделения конструкционных материалов. Известны предложения по применению изотопно обогащенных лития и азота для тепловых реакторов [7, 8]. В задаче создания теплового реактора с полным использованием сырья задача снижения паразитного поглощения нейтронов имеет максимальное значение. Здесь вполне оправданным будет даже использование изотопов циркония. Эффект от такого решения – около 1.0 % экономии нейтронов в реакторе РБМК [3]. Положительным свойством применения технологии разделения изотопов в данном случае является длительность обращения конструкционных материалов, превышающая длительность большого числа кампаний.

Использование трития в реакторах синтеза для преобразования тория в в <sup>233</sup>U. Высокая эффективность использования тяжелой воды при меньшем требуемом ее количестве в реакторе с жестким спектром делает такие реакторы предпочтительными в схеме с высоким использованием сырья. Недостатком тяжеловодного теплоносителя является образование трития. В работе [6] предложено использовать образуемый тритий для повышения эффективности получения новых делящихся веществ. Образующийся в реакторе деления тритий направляется в реактор синтеза для получения <sup>233</sup>U из <sup>232</sup>Th. Преимущества этой цепочки в сравнении с цепочкой <sup>239</sup>Ри из <sup>238</sup>Th обусловлены высоким периодом полураспада промежуточного <sup>233</sup>Ра (27 сут) в сравнении с <sup>239</sup>Np (2.7 сут). Это позволяет сделать технологию отделения делящегося нуклида из сырья более простой. Да и количество нейтронов на деление в <sup>233</sup>U выше.

Следует отметить:

- требуемая мощность реактора синтеза в такой кооперации, при выработке 1 % <sup>233</sup>U от величины выгорания в кампании, составляет около 0.1 % от мощности работающих в ней реакторов деления.
- реактор синтеза на основе современных технических решений (как источник нейтронов в режиме без производства энергии) может работать необходимое время.

Эффект от использования данного решения легко рассчитать, если принять, что <sup>233</sup>U будет заменять <sup>235</sup>U в начальном топливе без дополнительных положительных изменений (консервативный расчет). Величины использования сырья данного решения представлены в таблице 3.

Видно, что при уровне потерь нейтронов в реакторе деления, равном 6 % обеспечивается значимая добавка в использовании сырья, а при уровне потерь 5 %, использование сырья увеличивается в два раза и обеспечивается практически полное его использование.

Таблица 3. Сравнение величин использования сырья без использования реакторов синтеза (по таблице 1) и с использованием (синтез). Выработка <sup>233</sup>U составляет 1 % от выгорания топлива в реакторе.

| R, %  |            | 14.0 | 12.0 | 10.0 | 8.00  | 6.00  | 5.00  |
|-------|------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| D %   | По табл. 1 | 2.04 | 3.55 | 6.11 | 9.32  | 19,0  | 37.62 |
| F, 70 | синтез     | 2,35 | 4.0  | 6.67 | 10.60 | 25.70 | 79.48 |

### Замечания по ториевым реакторам

Один из недостатков ториевого топлива, указанный в[1], невозможность работы при потоках нейтронов больших  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>c<sup>-1</sup>. При работе на потоках меньших, но достаточно близких, будет наблюдаться неприятное следствие большого количества <sup>233</sup>Ра в топливе. Остановка реактора на длительный период будет сопровождаться большим ростом положительной реактивности за счет распада <sup>233</sup>Ра и образования <sup>233</sup>U.

Наиболее безопасным путем развития ториевого направления (обеспечивающего увеличения запасов для энергетики деления в ~4 раза) может быть использование технологии динамического нагружения. В этом случае, будет возможной работа на высоких потоках нейтронов, что снизит время замораживания топлива в активной зоне, уменьшит отрицательные эффекты реактивности при останове реактора, как за счет "йодной ямы", так и за счет преобразования <sup>233</sup>Ра в <sup>233</sup>U.

## Замечания по быстрым реакторам

Основной недостаток быстрых реакторов связан с малыми сечениями реакций, которые обязывают вводить в реактор большие количества действующих нуклидов. Вряд ли можно существенно уменьшить потребную массу топлива этих реакторов. При интенсификации развития энергетики деления по пути быстрых реакторов неизбежен рост стоимости природного урана на рынке. Если, как и сейчас, стоимость урана будет близка к стоимости органических топлив с равной производимой энергией, то следует ожидать рост цены на уран в 100 раз. Стоимость АЭС будет определяться стоимостью сырья и возрастет против нынешнего уровня в десятки раз. Перспективы для развития быстрых реакторов здесь не видно.

Принципиальным недостатком топлива с высокой концентрацией делящихся веществ, на котором работают быстрые реакторы, является опасность возникновения цепной реакции при работе с топливными материалами, опасность распространения делящихся материалов.

Другой недостаток этих реакторов пока не вскрывается. Он связан с удалением избытка нейтронов, образующихся в реакторе. Если в представленных вариантах теплового реактора величина избытка нейтронов составляет от 3 до 8 % от поглощенных в топливе и продуктах деления, то в быстрых реакторах она достигает 90 %! Это значит, что в них в 10 - 30 раз выше интенсивность активации конструкционных материалов. Соответственно, сложнее проблема устранения вреда для окружающей среды в последующей их переработке.

#### Заключение

Для достижения высокого использования уранового сырья в тепловых реакторах необходимо использовать технологию суперпозиции зон с равновесным содержанием плутониевых нуклидов в замкнутом цикле, использовать <sup>235</sup>U в качестве подпитки делящегося вещества из природной среды. Нужно стремиться обеспечить минимальные потери нейтронов в конструкционных материалах, на утечку и на управление реактором.

Показано, что модифицированный реактор типа РБМК может повысить степень использования сырья с 0.77 % до 3.5 % при обычном водном теплоносителе и до 6.0 при тяжеловодном теплоносителе, модифицированный реактор CANDU может использовать до 44 % сырья при тяжеловодном теплоносителе.

Тяжеловодные реакторы с оптимальными характеристиками могут использовать урановое сырье полностью.

Реакторы с потерями нейтронов меньшими 4 % обеспечивают высокое постоянство объемной топливной мощности в ходе развернутой кампании. Отдельные каналы реактора могут использоваться как элементы временных групп (в отличие от твэлов в особой ТВС [1] и [3].

В перспективе следует проработать:

- использование тяжеловодных реакторов с жестким спектром;
- использование конструкционных материалов с изотопным обогащением и наличием реакций n-2n;
- использование образующегося трития для выработки урана 233 в термоядерных реакторах,
- вопросы расширения использования тория в атомной энергетике.

Использование предлагаемых технологий может обеспечить возможность создания мировой атомной энергетики к концу 21 века с уровнем электрической мощности большей, чем для варианта быстрых реакторов (5 000 ГВт) при меньшем в 2 -20 раз потреблении природного урана.

## Литература

- 1. Котов В.М., Котов С.В., Тихомиров Л.Н. Возможность создания теплового реактора с полным использованием уранового и ториевого сырья // Атомная энергия.- 2003. т. 95, вып.5, с. 338 346.
- 2. Научно-техническая программа "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан", тема "Разработка ядерных
- реакторов с эффективным топливным циклом". Утверждена Постановлением Правительства РК № 405 от 12 апреля 2004 г.
- 3. Котов В.М., Котов С.В., Иркимбеков Р.А. Исследование потенциала воспроизводства реакторов РБМК. Настоящий Вестник НЯЦ РК №3, 2005.
- 4. Пономарев-Степной Н.Н., Алексеев П.Н., Давиденко В.Д. и др. Сравнение направлений развития ядерной энергетики в XXI в. на основе расчетов материальных балансов. "Атомная энергия", 2001, т. 91, вып.5, с. 331-336.

- Котов В.М., Котов С.В., Тихомиров Л.Н. и др. Концепция ядерного реактора на тепловых нейтронах с полным использованием уранового и ториевого сырья. Доклад на конференции "Атомная энергетика и топливные циклы", Москва-Димитровград, 1 -5 декабря 2003 г.
- Kotov V.M., Kotov S.V., Takibaev Zh.S., Tikhomirov L.N. Liquid-salt channel-tipe reactor with dynamic loading and core superposition. / Plasma Devices and Operations. Vol. 13, No. 3, September 2005, 213-221.
- 7. Блинкин В.Л., Новиков В.М. Жидкосолевые реакторы. М. Атомиздат. 1978 г. 111 стр.
- Гарусов Ю.В., Лебедев В.И., Павлов М.А. и др. Концепция развития канального направления ядерных реакторов. Литиевый высокотемпературный реактор канального типа (ЛВТР-К). Доклад на конференции "Канальные реакторы: проблемы и решения", Москва, 19 -22 октября 2004 г.

## УРАН ШИКІЗАТТАРЫН ЖЫЛУАРНАЛЫ РЕАКТОРЛАРДА ТОЛЫҒЫМЕН ПАЙДАЛАНУ

#### Котов В.М.

#### Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов

Аймақтардың суперпозицияларының технологиялары бойынша кампанияларға плутоний изотоптары бойынша тепе-теңдікте жұмыс істейтін реакторлардағы нейтрондардың жойылу деңгейінің шикізат пайдаланылуының қол жеткізілген деңгейіне, отын қуаттылығы көлемінің уақыт өткен сайын азаюына, реактивтіліктің өзгеру сипаты мен кампаниядағы қол жеткізілген жануға әсері зерттелді.

Плутоний изотоптары бойынша кампаниялардың тепе-теңдігі жүргізілуінің жағымды әсері көрсетілді және негізделді. Аймақтар суперпозицияларының оңтайлы режімінде жұмыс істейтін реакторлардың басқа түрлі реакторлардан басымдылығы көрсетілген.

## FULL USE OF URANIUM RAW MATERIALS FOR THERMAL CHANNEL-TYPE REACTORS

#### V.M. Kotov

#### National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov

It is studied an effect of neutron loss level in a reactor operating with technology of superposition of zones in plutonium isotope-equilibrated lifetime on an available level of the raw materials use, range of fuel power reduction in the course of time, change of optimum fuel composition, behavior of reactivity and available burn-up within the campaign.

A positive effect of plutonium isotope-equilibrated campaign was demonstrated and justified. Advantages of thermal reactors operating in optimal mode of zones superposition were shown in comparison with other types of reactors.

УДК 621.039.51

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВОСПРОИЗВОДСТВА РЕАКТОРОВ РБМК

<sup>1)</sup>Котов В.М., <sup>2)</sup>Котов С.В., <sup>3)</sup>Иркимбеков Р.А.

<sup>1)</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов <sup>2)</sup>Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан <sup>3)</sup>Семипалатинский государственный университет им.Шакарима, Казахстан

Определены потери нейтронов в моделях реактора РБМК, различающихся материалом теплоносителя (обычная вода, тяжелая вода), материалом топлива (диоксид урана, нитрид урана) и характером ведения кампании (неравновесная, равновесная по изотопам плутония).

Определены доли использования сырья в соответствующих моделях реактора. Показана стабилизация мощности в каналах в кампании с малыми потерями нейтронов. Оценены экономические выгоды для простейшей модернизации РБМК.

#### Введение

В Национальном ядерном центре Республики Казахстан проводятся исследования возможности реализации эффективного топливного цикла [1], в том числе на тепловых реакторах [2-3], с использованием технологий динамического нагружения и суперпозиции зон.

В работе [2] было показано, что при использовании технологии динамического нагружения и замкнутом цикле, в реакторе на природном уране становится возможным использовать до 20 % исходного сырья. В лучших современных реакторах данного типа CANDU в открытом цикле используется ~1.06 %, а при его переводе на замкнутый цикл можно повысить использование сырья до ~1.4 %.

Технология динамического нагружения требует создания новых реакторов, выполняющих специфические операции. Проведенные в последнее время в соответствии с [1] исследования показали возможность достижения высокой полноты использования сырья в технологии суперпозиции зон и равновесном составе топлива по плутониевым составляющим без использования технологии динамического нагружения. Этот факт заставляет рассмотреть возможности существующих в мире реакторов для повышения их эксплуатационных характеристик.

Помимо CANDU в мире есть, пожалуй, один реактор, который может использоваться для данной модернизации. Это канальный реактор РБМК с графитовым замедлителем, позволяющий проводить перегрузку топлива в отдельных каналах в режиме работы реактора на полной мощности.

Потенциал воспроизводства делящихся веществ графитового реактора заведомо меньше, чем тяжеловодного, поэтому настоящая работа может показать уровень минимального использования ядерного сырья, достижимый в тепловых реакторах.

### ТРЕБОВАНИЯ К РЕАКТОРУ, ЗАДАЧИ

#### ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные требования, которым должен удовлетворять тепловой реактор, работающий по технологии суперпозиции зон с равновесным составом топлива по плутониевым нуклидам, сводятся:

- 1. к минимизации потерь нейтронов в конструкционных материалах, на утечку и управление мощностью реактора в установившемся режиме.
- возможность установки и последующей замены малых порций топлива при работе реактора на мощности. В принципе такие замены могут проводиться с уменьшением и даже остановкой реактора, но технически это вызовет больше проблем, чем преимуществ.

Реактор РБМК удовлетворяет второму требованию, поэтому следует решить задачи:

- определить уровни потерь нейтронов в различных возможных вариантах загрузки его каналов топливом, (по концентрации делящихся нуклидов, составу делящихся нуклидов, химическому составу топлива) вариантах отличающихся составом теплоносителя.
- 2. рассчитать уровень использования сырья для каждого из вариантов.
- 3. рассмотреть возможность осуществления решения на практике и целесообразность его реализации.

#### Описание расчетной модели

Расчеты нейтронно-физических характеристик реактора РБМК проводились с использованием программы МСNP. В расчетной модели из состава активной зоны исключены ячейки с регулирующими стержнями. Несколько уменьшено количество топливных ячеек (с 1329 до шт.). Эти отклонения не могут существенно влиять на точность конечных результатов по двум причинам:

- Вводимая при установившемся режиме реактивность должна быть менее 0.5 β.
- Утечка, определяющая представительность масштаба модели, во всех последующих расчета практически не влияет на общий уровень потерь нейтронов.

В активную зону модели включены каналы четырех типов, которые можно заполнить топливом различного состава. Количество каналов типа "1, 3 и 5" по 332, каналов типа "4" - 333 шт.

Распределение этих каналов в активной зоне модели представлено на рисунке 1.



Рисунок 1. Расположение каналов типов "1, 3, 4, 5" в активной зоне модели реактора РБМК. Ячейки "2" – кладка отражателя

| Общие характеристики расчетной модели: |        |
|----------------------------------------|--------|
| Габариты ячейки канала, см             | .25×25 |
| Высота активной зоны, см               | .700   |
| Описанный диаметр активной зоны, см    | 1300   |
| Толщина бокового графитового           |        |
| отражателя, см                         | .76.4  |
| Высоты верхнего и нижнего              |        |
| слоя отражателя. см                    | .38    |

В верхнем и нижнем слоях отражателя реального реактора, в каждой ячейке проходят трубы теплоносителя. В модели они отсутствуют.

Размещение конструкционных материалов в ячейках модели реактора в районе активной зоны представлено на рисунке 2. Ячейка содержит графитовую кладку, корпус канала, 18 твэлов и центральный несущий стержень. Элементы, обеспечивающие фиксацию твэлов в канале в модели отсутствуют.



Рисунок 2. Элементы ячейки модели в районе активной зоны.

Твэлы, теплоноситель и несущий стержень гомогенизированы в пространстве ограниченном внутренним диаметром корпуса канала.

## Описание расчетных экспериментов

Для определения возможности повышения использования топливного сырья в современной конструкции реактора и при ее возможной модернизации были рассмотрены следующие варианты.

- Стартовое состояние современного варианта начало кампании реактора. В топливе этого варианта присутствует <sup>235</sup>U в количестве 1.8 % по отношению к общему количеству урана. Изотопы плутония отсутствуют. Теплоносителем является обычная вода.
- 2. Модернизированный вариант, отличающийся тем, что вместо обычной воды теплоносителем в нем является тяжелая вода. При этом сохраняется условие изменения концентрации теплоносителя по высоте топливного канала.
- 3. Вариант модернизации по составу делящихся нуклидов топлива. В нем в качестве делящегося вещества начального топлива используется смесь <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu и <sup>241</sup>Pu. Общее количество делящихся веществ в топливе Сдв по отношению к общей массе делящихся веществ и <sup>238</sup>U равно 1.3 %. Теплоноситель обычная вода. Распределение долей среди делящихся нуклидов и <sup>240</sup>Pu установлено оптимальное для данной кампании как в работе [4]. Химический состав топлива смесь UO<sub>2</sub> и PuO<sub>2</sub>. Рассчитывались характеристики для начала и окончания кампании.
- **4.** То же, что в варианте 3, но с заменой обычной воды в теплоносителе на тяжелую воду.

- 5. То же, что в варианте 3, но с изменением химического состава топлива. Устанавливалось нитридное топливо с азотом, обогащенным по <sup>15</sup>N. Количество <sup>15</sup>N в общем азоте 95 %. Плотность нитрида принималась равной 14 г см<sup>-3</sup>.
- **6.** То же, что и варианте 5, но с заменой теплоносителя на тяжелую воду.

#### Анализ расчетных данных

Характеристики данных вариантов представлены в таблице 1. Нумерация вариантов соответствует вышеприведенной. В таблице приведены составляющие потерь нейтронов по элементам реактора, а также их поглощение в <sup>238</sup>U. Показаны расчетные значения коэффициентов размножения, и величины использования топливного сырья для данных вариантов.

Потери нейтронов в данных вариантах монотонно убывают от варианта к варианту от 13.33 % до 6.67 % для начала кампаний за исключением варианта 5. Однако и в данном варианте потери нейтронов лишь на малую величину превышают потери предыдущего варианта с тяжелой водой в качестве теплоносителя.

Потери нейтронов в конце кампаний выше, чем в начале соответствующих кампаний. Для вариантов с начальной загрузкой топлива чисто ураном эти потери не рассчитывались.

Приняты следующие обозначения технологий в таблице: ОЦ – открытый топливный цикл, ЗЦ+СП+РП – закрытый топливный цикл с использованием суперпозиции зон и равновесием плутониевых нуклидов в кампании.

| Теппоноситель         H <sub>2</sub> O         D <sub>2</sub> O         <sub>2</sub> O         UO         UO<                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               |                                               |                  | 2               | 3                | 4               | 5                | 6        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|----------|
| Топливо         UO2         UO2         UO2         UO2         UO2         UN           Технология         OЦ         OU         3Ц+СП+РПВЦ+СП+РПВЦ+СП+РПВЦ+СП+РПВЦ+СП+РПВЦ+СП+РПВЦ+СП+РП           Содержание делящихся, %         1.8         1.8         1.3         1.15         1.10         1.05           Коэффициент размножения         1.20         1.226         1.102         1.105         1.07         1.081           Утечка нейтронов, %         0.525         0.845         0.426         0.707         0.46         0.788           Дейтерий/водород         3.93         0.00006         2.43         0.00004         2.43         0.00003           Графит         3.078         3.54         2.30         2.65         1.93         2.27           Киспород         0.161         0.154         0.158         0.16         0.051         0.051           Цирконий         2.75         3.05         2.116         2.41         1.703         2.01           Никобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Железо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Суммарные потери, %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               | Теплоноситель                                 | H <sub>2</sub> O | $D_2O$          | H <sub>2</sub> O | $D_2O$          | H <sub>2</sub> O | $D_2O$   |
| Технология         ОЦ         ОЦ         3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+СП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+РП3Ц+CП+PП3Ц+CП+PП3Ц+CП+PП3Ц+CП+PП3Ц+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PП3U+CП+PD40P         1.226         1.102        1.105        1.005           Чачало        1.016        0.157        0.47        0.324        0.394       3.54       2.30       2.67       1.115           Чироний        2.452        2.52        1.59        1.77        1.143        1.15           Чироний        2.452        2.94        2.35        2.47        2.582        2.721           Киспород        2.82        2.94        2.35        2.47        1.31        1.01        1.31        1.01       1.31       1.01                                                                                                                                                                                                                                                                                |               | Топливо                                       | UO <sub>2</sub>  | UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub>  | UO <sub>2</sub> | UN               | UN       |
| Содержание делящихся, %         1.8         1.8         1.3         1.15         1.10         1.05           Коэффициент размножения         1.20         1.226         1.102         1.105         1.07         1.081           Утечка нейтронов, %         0.525         0.845         0.426         0.707         0.46         0.788           Дейтерий/водород         3.33         0.00006         2.43         0.00004         2.43         0.00004           Графит         3.078         3.54         2.30         2.65         1.93         2.27           Киспород         0.161         0.154         0.158         0.16         0.051         0.055           Цирконий         2.75         3.05         2.116         2.41         1.703         2.01           Ниобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Уран 238         28.2         29.40         23.5         24.7         25.82         27.21           Суммарные потери, %         1.0631         9.396         8.167         8.50         6.67           Дейтерий/водород         0.033         0.694         1.061         1.036         0.943           Дейтерий/водоро                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |               | Технология                                    | ОЦ               | ОЦ              | ЗЦ+СП+РП         | ЗЦ+СП+РП        | ЗЦ+СП+РП         | ЗЦ+СП+РП |
| <ul> <li>Начало началония</li> <li>Начало (Дейтерий/водород)</li> <li>Началон (Дейтерий/водород)</li></ul> |               | Содержание делящихся, %                       | 1.8              | 1.8             | 1.3              | 1.15            | 1.10             | 1.05     |
| Утечка нейтронов, %0.5250.8450.4260.7070.460.788Дейтерий/водород3.930.00062.430.000042.430.00003Графит3.0783.542.302.651.932.27Киспород0.1610.1540.1580.160.0510.05Цирконий2.753.052.1162.411.7032.01Ниобий0.4360.5220.3760.470.3240.394Железо2.452.521.591.771.1431.15Уран 23828.229.4023.524.725.8227.21Суммарные потери, %13.3310.6319.3968.1678.506.67Дейтерий/водород2.990.000052.990.000042.4Уречка нейтронов, %2.990.00052.990.000052.90Дейтерий/водород2.2322.671.842.205Ниобий2.2322.671.842.205Нибий2.390.1640.1570.0530.052Цирконий2.390.470.3430.430.43Уран 2382382.011.351.41.45Уран 2382382.011.351.41.952.101.351.4Уран 2382382.035.556.76.510.51.4Уран 2382382.011.331.01.00.94Суммарные потери, %1.0739.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |               | Коэффициент размножения                       | 1.20             | 1.226           | 1.102            | 1.105           | 1.07             | 1.081    |
| Дейтерий/водород         3.93         0.00006         2.43         0.00004         2.43         0.00003           Графит         3.078         3.54         2.30         2.65         1.93         2.27           Кислород         0.161         0.154         0.158         0.16         0.051         0.051           Цирконий         2.75         3.05         2.116         2.41         1.703         2.01           Ниобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Железо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Уран 238         Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Утечка нейтронов, %         1         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         2.99         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.0005         2.90         0.00004         2.48         2.99         1.96                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |               | Утечка нейтронов, %                           | 0.525            | 0.845           | 0.426            | 0.707           | 0.46             | 0.788    |
| Графит         3.078         3.54         2.30         2.65         1.93         2.27           Киспород         0.161         0.154         0.158         0.16         0.051         0.05           Цирконий         2.75         3.05         2.116         2.41         1.703         2.01           Ниобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Жепезо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Уран 238         28.2         29.40         23.5         24.7         25.82         27.21           Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Козффициент размножения         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.99         0.0005         2.90         0.0002           Киспород         2.32         2.67         1.84         2.205           Цирконий         2.32                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |               | Дейтерий/водород                              | 3.93             | 0.00006         | 2.43             | 0.00004         | 2.43             | 0.00003  |
| Киспород         0.161         0.154         0.158         0.16         0.051         0.05           цирконий         2.75         3.05         2.116         2.41         1.703         2.01           Ниобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Железо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Уран 238         28.2         29.40         23.5         24.7         25.82         27.21           Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Козффициент размножения         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Прафит         2.48         2.99         1.96         2.4           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         2.32         2.67         1.84         2.205           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Киспород         1.95         2.10         1.35         1.4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Нацапо        | Графит                                        | 3.078            | 3.54            | 2.30             | 2.65            | 1.93             | 2.27     |
| Цирконий         2.75         3.05         2.116         2.41         1.703         2.01           Ниобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Железо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Уран 238         28.2         29.40         23.5         24.7         25.82         27.21           Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Утечка нейтронов, %         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Кислород         1.026         0.164         0.157         0.053         0.052           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205         1.4           Уран 238         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ачало         | Кислород                                      | 0.161            | 0.154           | 0.158            | 0.16            | 0.051            | 0.05     |
| Ниобий         0.436         0.522         0.376         0.47         0.324         0.394           Железо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Уран 238         28.2         29.40         23.5         24.7         25.82         27.21           Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Коэффициент размножения         1         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Окончание         Киспород         2.48         2.99         1.96         2.4           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         3.9         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         Сумарные потери, %         1.073         9.18         9.30         7.19                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | aivinanivivi  | Цирконий                                      | 2.75             | 3.05            | 2.116            | 2.41            | 1.703            | 2.01     |
| Железо         2.45         2.52         1.59         1.77         1.143         1.15           Уран 238         28.2         29.40         23.5         24.7         25.82         27.21           Суммарные потери, %         13.33         10.631         9.396         8.167         8.50         6.67           Коэффициент размножения         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Икопород         1.95         2.10         1.35         1.4           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.399         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>спользования         Первое приближение, %         2.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               | Ниобий                                        | 0.436            | 0.522           | 0.376            | 0.47            | 0.324            | 0.394    |
| Уран 23828.229.4023.524.725.8227.21Суммарные потери, %13.3310.6319.3968.1678.506.67Коэффициент размножения1.0161.0360.9981.021Утечка нейтронов, %0.4390.7960.3830.694Дейтерий/водород2.990.000052.900.00004Графит2.482.991.962.4ОкончаниеКиспород0.1640.1570.0530.052Цирконий2.322.671.842.205Ниобий0.390.470.3430.43Железо1.952.101.351.4Уран 23824.992.03.55.56.76.5Суммарные потери, %10.739.189.307.19Параметры<br>использование2.03.55.56.76.510.5Содержание делящихся после уточнения, %1.31.01.00.94СырьяРеальное использование, %0.774.75.66.312.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               | Железо                                        | 2.45             | 2.52            | 1.59             | 1.77            | 1.143            | 1.15     |
| Суммарные потери, %13.3310.6319.3968.1678.506.67Коэффициент размножения1.0161.0360.9981.021Утечка нейтронов, %0.4390.7960.3830.694Дейтерий/водород2.990.000052.900.00004Графит2.482.991.962.4Киспород0.1640.1570.0530.052Цирконий2.322.671.842.205Ниобий00.390.470.3430.43Железо1.952.101.351.4Уран 23824.9925.7327.1228.5Суммарные потери, %10.739.189.307.19Параметры<br>использование, %2.03.55.56.76.510.5Содержание делящихся после уточненной динамике, %4.75.66.312.2Реальное использование, %0.774.75.66.312.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               | Уран 238                                      | 28.2             | 29.40           | 23.5             | 24.7            | 25.82            | 27.21    |
| Коэффициент размножения         1.016         1.036         0.998         1.021           Утечка нейтронов, %         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Окончание         Киспород         0.164         0.157         0.053         0.052           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.433           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Сумарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Содержание делящихся после уточнения, %         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |               | Суммарные потери, %                           | 13.33            | 10.631          | 9.396            | 8.167           | 8.50             | 6.67     |
| Утечка нейтронов, %         0.439         0.796         0.383         0.694           Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Кислород         0.164         0.157         0.053         0.052           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.433           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Сумарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Содержание делящихся после уточнения, %         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование, %         0.77         5.6         6.3         12.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               | Коэффициент размножения                       |                  |                 | 1.016            | 1.036           | 0.998            | 1.021    |
| Дейтерий/водород         2.99         0.00005         2.90         0.00004           Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Кислород         0.164         0.157         0.053         0.052           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>Сырья         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               | Утечка нейтронов, %                           |                  |                 | 0.439            | 0.796           | 0.383            | 0.694    |
| Графит         2.48         2.99         1.96         2.4           Кислород         0.164         0.157         0.053         0.052           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>Сырья         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               | Дейтерий/водород                              |                  |                 | 2.99             | 0.00005         | 2.90             | 0.00004  |
| Кислород         Кислород         0.164         0.157         0.053         0.052           Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования         1.3         1.0         1.0         0.94           Киспород         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Содержание делящихся после уточнения, %         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |               | Графит                                        |                  |                 | 2.48             | 2.99            | 1.96             | 2.4      |
| Цирконий         2.32         2.67         1.84         2.205           Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>сырья         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Окончание     | Кислород                                      |                  |                 | 0.164            | 0.157           | 0.053            | 0.052    |
| Ниобий         0.39         0.47         0.343         0.43           Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>сырья         Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Кампании      | Цирконий                                      |                  |                 | 2.32             | 2.67            | 1.84             | 2.205    |
| Железо         1.95         2.10         1.35         1.4           Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>сырья         Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |               | Ниобий                                        |                  |                 | 0.39             | 0.47            | 0.343            | 0.43     |
| Уран 238         24.9         25.73         27.12         28.5           Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>сырья         Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Содержание делящихся после уточнения, %         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |               | Железо                                        |                  |                 | 1.95             | 2.10            | 1.35             | 1.4      |
| Суммарные потери, %         10.73         9.18         9.30         7.19           Параметры<br>использования<br>сырья         Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Использование сырья по уточненной динамике, %         1.3         1.0         1.0         0.94           Реальное использование, %         0.77         4.7         5.6         6.3         12.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |               | Уран 238                                      |                  |                 | 24.9             | 25.73           | 27.12            | 28.5     |
| Первое приближение, %         2.0         3.5         5.5         6.7         6.5         10.5           Спорьзования<br>сырья         Содержание делящихся после уточнения, %         1.3         1.0         1.0         0.94           Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |               | Суммарные потери, %                           |                  |                 | 10.73            | 9.18            | 9.30             | 7.19     |
| Содержание делящихся после уточнения, %         1.3         1.0         1.0         0.94           использования         Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Реальное использование, %         0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |               | Первое приближение, %                         | 2.0              | 3.5             | 5.5              | 6.7             | 6.5              | 10.5     |
| Использование сырья по уточненной динамике, %         4.7         5.6         6.3         12.2           Сырья         Реальное использование, %         0.77              12.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | араметры      | Содержание делящихся после уточнения, %       |                  |                 | 1.3              | 1.0             | 1.0              | 0.94     |
| Реальное использование, % 0.77                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | гопользования | Использование сырья по уточненной динамике, % |                  |                 | 4.7              | 5.6             | 6.3              | 12.2     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ырыл          | Реальное использование, %                     | 0.77             |                 |                  |                 |                  |          |

| Таблиі | ia 1. X | аракте | ристики | варі | иантов | моди | рикац | uu | реакто | ра | РБМІ |
|--------|---------|--------|---------|------|--------|------|-------|----|--------|----|------|
|        |         |        |         |      |        |      | , ,   |    |        |    |      |

Использование сырья в первом приближении соответствует данным, приведенным в [4]. Однако поглощение нейтронов в <sup>238</sup>U меньше ожидаемого во всех приведенных вариантах, что говорит о изменении соотношений сечений взаимодействия нейтронов с топливными нуклидами против принятой в [4] модели исключающей эффекты резонансного поглощения нейтронов для всех нуклидов, кроме <sup>238</sup>U. Были рассчитаны относительные сечения взаимодействия нейтронов с топливными нуклидами и проведены уточненные расчеты динамики кампании. В таблице 2 приведены полученные сечения поглощения ба и сечения деления об нейтронов для основных нуклидов топлива относительно сечения деления <sup>239</sup>Pu.

Таблица 2. Соотношение сечений взаимодействия топливных нуклидов в РБМК.

| σ \ Вариант          | 3     | 4     | 5     |
|----------------------|-------|-------|-------|
| of <sup>235</sup> U  | 0.534 | 0.529 | 0.536 |
| σa <sup>235</sup> U  | 0.538 | 0.542 | 0.584 |
| σa <sup>238</sup> U  | 1.576 | 1.544 | 1.76  |
| σf <sup>239</sup> Pu | 1     | 1     | 1     |
| σa <sup>239</sup> Pu | 1.419 | 1.42  | 1.43  |
| σa <sup>240</sup> Pu | 1.30  | 1.196 | 1.277 |
| σf <sup>241</sup> Pu | 0.734 | 0.74  | 0.736 |
| σa <sup>241</sup> Pu | 0.656 | 0.658 | 0.658 |

Были проведены расчеты динамики кампаний с уточненными сечениями взаимодействия нейтронов с топливными нуклидами. В таблице 1 приведены данные по использованию сырья, полученные на основе этих расчетов.

Уменьшение сечений взаимодействия 235U, особенно сечения деления, является фактором способствующим повышению потерь нейтронов в вариантах реактора 1 и 2. Тем самым появляется дополнительная предпосылка к снижению доли использования сырья в такой технологии.

Основными факторами малой эффективности применяемой сейчас технологии можно считать меньшее количество вторичных нейтронов после деления 235U против 239Pu и 241Pu, и использование дополнительных поглотителей нейтронов для компенсации избытка реактивности в начале кампании.

Рост сечения поглощения в 239Ри относительно его сечения деления увеличивает роль второго делящегося изотопа плутония - 241Ри. Эта роль удачно разыгрывается только в кампании с равновесием плутониевых нуклидов.

В варианте с начальным использованием чисто урановых изотопов с обычной водой в качестве теплоносителя и замкнутом топливном цикле достижима величина использования сырья около 2 %. Однако, равномерная загрузка в начале кампании, применение дополнительных поглотителей уменьшают долю использования сырья до 0.77 %.

#### АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ВАРИАНТОВ модернизации

В настоящее время, при пока еще низких ценах на природный уран, наибольший интерес вызывают варианты **3** и **5**, требующие минимальных затрат для своей реализации. Основное достоинство варианта **3** в том, что достаточно использовать минимальное обогащение урана для подготовки топлива без замены оксидного топлива. Требуемое содержание <sup>235</sup>U в топливе замены – 0.7943 %. Масса сырья составляет 1.138 массы заменяемого топлива. Стоимость обогащения сырья уменьшается в 16.4 раза против нынешнего РБМК (обогащение 1.8 %).

Снижение стоимости самого сырья по абсолютной величине существенно меньше снижения стоимости обогащения урана. Общее снижение затрат в варианте **3** оценочно составляет 20 – 25 млн долларов США в год на один реактор РБМК.

Вариант **5** при близких параметрах использования сырья с вариантом **4** является предпочтительным. Замена оксидного топлива на нитридное более привлекательна, чем замена обычной воды на тяжелую. Вариант **5** вовсе не требует проведения работ по обогащению урана.

Вариант **6** будет конкурентоспособен только по факту снижения потребности в сырье при последующем росте цен на природный уран. Необходимо отметить, что помимо лучшего использования сырья в данном варианте стабилизируется мощность канала в ходе кампании. Этот фактор будет дополнительным плюсом в отношении управляемости и безопасности эксплуатации реактора.

Следует отметить, что использование тяжелой воды в рассмотренных вариантах может быть оправданным, если ее потери будут возмещаться экономическими и техническими преимуществами, обусловленными ее введением. Эти преимущества включают уменьшение потребности в сырье, уменьшение затрат на обогащение урана, устранение положительного эффекта реактивности при росте температуры теплоносителя и повышение КПД АЭС за счет большей температуры кипения тяжелой воды. Оценка повышения КПД составляет 0.17 %. Только этот фактор позволяет довести годовые потери тяжелой воды до 2 тонн. Такие и меньшие потери могут быть реализованы при организации возврата утечек в контуре теплоносителя. Общие потребности в тяжелой воде лля контура теплоносителя много меньше. чем для замедлителя реактора CANDU.

Дальнейшее повышение использования уранового сырья реакторами РБМК может быть достигнуто при изменении геометрии твэлов и внедрении некоторых решений, представленных в [5].

### ИЗМЕНЕНИЕ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ В КАНАЛАХ ВО ВРЕМЕНИ

Был проведен расчетный эксперимент по определению изменения во времени потока нейтронов в каналах реактора, работающего по технологии суперпозиции зон. Для этого состав топливных материалов в ячейках 1, 3, 4, 5 по рисунку 1 изменялся, от начального к последующему, с шагом равным 1/5 длительности кампании. Использовался третий вариант модели реактора. Изменения скоростей деления и поглощения нейтронов в 238U показаны в таблице 3.

| Таблииа 3. | Изменения | скоростей делени                      | <i>ия и поглошения</i> | нейтронов в 238U |
|------------|-----------|---------------------------------------|------------------------|------------------|
|            |           | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |                        |                  |

| \ время работы, час                    | 0                 | 6000  | 12000 | 18000 |       |
|----------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                        | <sup>235</sup> U  | 2.732 | 1.37  | 0.623 | 0.023 |
| Скорость деления в                     | <sup>239</sup> Pu | 6.197 | 6.11  | 6.65  | 6.75  |
|                                        | <sup>241</sup> Pu | 1.15  | 1.245 | 1.27  | 1.397 |
| Относительная мощность                 | 1.00              | 0.86  | 0.848 | 0.811 |       |
| Скорость поглощение в <sup>238</sup> U | 1.00              | 1.039 | 0.99  | 0.99  |       |

При уменьшении количества делящихся веществ к последнему моменту времени в ~2.6 раза скорость деления в канале уменьшается всего в 1.23 раза. Уменьшение количества сырьевой компоненты на 5 % практически не сказывается на скорости поглощений в ней. Эти факты объясняются как уменьшением стока в ячейке гетерогенного реактора, так и влиянием изменений резонансных поглощений в месте расположения топлива.

В целом данный фактор является благоприятным для практики – стабилизируется мощность канала в ходе кампании, увеличивается эффект образования новых делящихся нуклидов.

Для методологии расчетов данный фактор является указанием для их совершен-ствования.

#### Заключение

Проведены расчеты характеристик реактора РБМК при переводе его в режим работы по технологии суперпозиции зон с равновесным содержанием плутониевых нуклидов в кампании с замкнутым топливным циклом.

Получены данные о возможности повышения использования сырья в реакторах РБМК в случае использования данной технологии при сохранении существующего оксидного топлива и обычной воды в качестве теплоносителя до 4.7 % вместо 0.77 %.

При использовании этой же технологии, того же топлива и применении тяжелой воды в качест-

ве теплоносителя доля использования сырья может быть повышена до 5.6 %. Однако затраты, связанные с использованием тяжелой воды, будут выше, чем достигнутый эффект в сравнении с предыдущим решением.

Применение нитридного топлива и обычной воды в качестве теплоносителя позволит повысить долю использования сырья до 6.3 %. Такое решение может быть с успехом использовано с целью перехода на более прогрессивное и по многим теплофизическим параметрам топливо.

Применение нитридного топлива и тяжелой воды в качестве теплоносителя позволит повысить долю использования сырья до 12.2 %. Такой вариант модернизации будет конкурентоспособным в течение длительного времени при последующем повышении цен на природный уран. При определенной модернизации реакторов РБМК по данному варианту, они могут превзойти по конкурентоспособности реакторы CANDU.

Проведенная работа позволила выявить направления совершенствования программных продуктов, используемых для расчетов характеристик реактора, работающего по технологии суперпозиции зон с равновесным содержанием плутониевых нуклидов топлива в кампании.

Необходимо продолжить работы в данном направлении в контакте с разработчиками РБМК.

#### Литература

- 1. Научно-техническая программа "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан", тема "Разработка ядерных реакторов с эффективным топливным циклом". Утверждена Постановлением Правительства РК № 405 от 12 апреля 2004 г.
- 2. Котов В.М., Котов С.В., Тихомиров Л.Н. Возможность создания теплового реактора с полным использованием уранового и ториевого сырья // Атомная энергия.- 2003. т. 95, вып.5, с. 338 346.
- Kotov V.M., Kotov S.V., Takibaev Zh.S., Tikhomirov L.N. Liquid-salt channel-tipe reactor with dynamic loading and core superposition. / Plasma Devices and Operations. Vol. 13, No. 3, September 2005, 213-221.
- 4. Котов В.М. Полное использование уранового сырья в тепловых канальных реакторах. / Вестник НЯЦ РК № 3, 2005.
- Гарусов Ю.В., Лебедев В.И., Павлов М.А. и др. Концепция развития канального направления ядерных реакторов. Литиевый высокотемпературный реактор канального типа (ЛВТР-К). Доклад на конференции "Канальные реакторы: проблемы и решения", Москва, 19 - 22 октября 2004 г.

## РБМК РЕАКТОРЛАРЫНЫҢ ӨНДІРІП ШЫҒАРУ ӘЛЕУЕТІН ЗЕРТТЕУ

<sup>1)</sup>Котов В.М., <sup>2)</sup>Котов С.В., <sup>3)</sup>Иркимбеков Р.А.

<sup>1)</sup>Казақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов <sup>2)</sup>КР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан <sup>3)</sup>Шәкәрім атындағы Семей Мемлекеттік университеті

Жылу жеткізгіш материалы жағынан (кәдімгі су, ауыр су), отын материалы жағынан (уран диоксиді, уран нитриді) және кампаниялар жүргізу сипаты жағынан (тепе-тең емес, плутоний изотоптары бойынша тепе-тең) айырмашылығы бар РБМК реакторлары моделдеріндегі нейтрондардың жоғалатындығы анықталды.

Шикізаттың реактордың тиісті моделдерінде пайдаланылуының үлестері анықталды. Арналардағы қуаттылықтың нейтрондардың аздап жоғалуымен кампаниялардағы бірқалыптыландырулары көрсетілген. РБМК қарапайым жаңғыртылуы үшін экономикалық тиімділіктер бағаланған.

## STUDY OF HIGH-POWER CHANNEL REACTORS (HPCR) BREEDING POTENTIAL

<sup>1)</sup>V.M. Kotov, <sup>2)</sup>S.V. Kotov, <sup>3)</sup>R.A. Irkimbekov

<sup>1)</sup>National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov <sup>2)</sup>Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan <sup>3)</sup>Shakarim Semipalatinsk State University

It was defined the neutron losses in HPCR reactors models which are different in coolant (water, heavy water), in fuel (uranium dioxide, uranium nitride) and in nature of campaign (plutonium isotope-equilibrated/inequilibrated).

The rate of raw materials use in relevant reactor model was determined. Stabilization of channel power within the campaign with low neutron losses was demonstrated. Economic benefits are evaluated for the simplest modernization of HPCR.

УДК 621.039.5.001.24

## ПРИМЕНЕНИЕ «FLUENT» ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ РАЗВИТИЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

#### Акаев А.С., Васильев Ю.С., Зверев В.В., Нугуманов Д.К.

#### Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

Данная работа посвящена проверке применимости современного программного комплекса «FLUENT v6.2» для моделирования таких теплогидравлических процессов, как кипение/конленсация и плавление/затвердевание, протекающих параллельно в многокомпонентных системах. В работе показан пример расчетного моделирования процессов, протекающих в экспериментах, проводимых в Национальном ядерном центре Республики Казахстан для исследования заключительных стадий аварии ядерного реактора. Результаты экспериментальных работ используются для обоснования безопасного использования ядерных установок в энергетике. Применение программного комплекса «FLUENT v6.2» позволяет восстановить последовательность событий, протекающих в экспериментах, и прогнозировать их развитие, что необходимо как для планирования экспериментов, так и для анализа их результатов.

#### Введение

В настоящее время в промышленно развитых странах мира работает более 100 атомных электрических станций, имеющих в своем составе более 400 действующих энергоблоков.

Практика эксплуатации промышленных и экспериментальных ядерных энергетических установок показала, что нарушение режима работы энергоблоков и другие аварийные события на АЭС могут привести к серьезным экологическим и социальным последствиям.

На сегодняшний день проблема обоснования безопасности эксплуатации АЭС является актуальной задачей, решением которой занимаются ученые и специалисты промышленно развитых стран мира, таких как США, страны Европейского сообщества, Россия, Япония, Корея и др.

Одним из направлений работ в обоснование безопасности атомной энергетики является экспериментальное моделирование процессов, сопровождающих отдельные стадии развития тяжелой аварии на АЭС с плавлением активной зоны реактора. Наименее исследованными являются в настоящее время заключительные стадии тяжелых аварий, характеризуемые взаимодействием расплавленных материалов активной зоны (кориума) с теплоносителем.

В рамках программы развития атомной энергетики Казахстана в Национальном ядерном центре создана стендовая база для проведения исследований в области безопасности атомной энергетики. Первые результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований, привлекли внимание зарубежных специалистов, занимающихся проблемами безопасности атомной энергетики. В частности, с 1995 года установлены прочные деловые контакты с корпорацией NUPEC (Япония). В рамках этого сотрудничества по ежегодным контрактам между НЯЦ РК и Marubeni Utility Services (Япония) на экспериментальных установках НЯЦ было проведено 6 серий экспериментов (более 50 успешных экспериментов различного масштаба).

Адекватная интерпретация результатов проводимых экспериментов требует расчетного сопровождения. В ходе выполнения работ по расчетноаналитическим исследованиям процессов, характеризующих поведение расплава активной зоны при аварии энергетического реактора, необходима разработка математических моделей, позволяющих описать процессы, сопровождающие тяжелую аварию реактора, и определить сценарии развития этих процессов.

В настоящее время идет бурное развитие программных кодов для проведения расчетов в области вычислительной гидродинамики. Одним из лидеров в этой области является программный комплекс «FLUENT».

Целью данной работы является – оценка практической применимости программного комплекса «FLUENT» для выполнения расчетноаналитических работ по исследованию процессов, описывающих взаимодействие расплава топливной композиции с теплоносителем в случае аварии энергетического реактора.

#### Описание экспериментальной установки

Отклонения в работе АЭС от нормального режима является аварийной ситуацией. Тяжелой аварией на АЭС является расплавление топливных сборок активной зоны, обрушение активной зоны вниз и проплавление корпуса реактора с выходом расплава кориума за его пределы. Для подавления аварийной ситуации на ядерных энергоустановках существуют пассивные и активные системы, главная задача которых – охлаждение расплава кориума. Одним из пассивных средств подавления аварийной ситуации является водный бассейн в подреакторном помещении.

Целью одной из серий экспериментов, проведенных в НЯЦ РК, было моделирование процесса FCI (Fuel Coolant Interaction) при падении расплава в водный бассейн и изучение характера процессов взаимодействия топлива с теплоносителем.

Экспериментальная установка «ЛАВА» (рисунок 1) включает в себя два основных функциональ-

ных блока: электроплавильную печь для подготовки расплава композиции материалов активной зоны реактора с требуемой температурой и устройство приема расплава (УПР), где моделируются процессы взаимодействия расплава с водой.



Рисунок 1. Экспериментальная установка «ЛАВА»

Корпус установки изготовлен из стали. На боковой стенке корпуса размещены технологические окна. Все окна закрыты герметично технологическими крышками. Через крышки подведены измерительные линии и трубопроводы подачи воды и газа. УПР и цилиндрический опорный сосуд позволяют изменять объем и глубину бассейна с водой без изменения газового пространства внутри экспериментального объема. Средства измерений позволяют измерять давление, температуру и состав газовой среды.

Таблица 1. Параметры экспериментальной установки «ЛАВА»

| Параметр                                    | Значение |
|---------------------------------------------|----------|
| Мощность ЭПП, кВт                           | до 200   |
| Температура расплава, К                     | до 3200  |
| Максимальная масса расплава, кг             | 60       |
| Высота слива расплава, м                    | 11.4     |
| Глубина воды в бассейне, м                  | до 1.0   |
| Объем воды, м <sup>3</sup>                  | до 0.4   |
| Объем газовой полости в УПР, м <sup>3</sup> | до 0.6   |
| Максимальное давление среды, МПа            | 10.0     |
| Максимальная температура газовой среды, К   | до 600   |

В электроплавильной печи (ЭПП) индукционным методом, при температуре около 3000°С, плавится 60 кг смеси материалов активной зоны энергетического реактора с топливом, содержащим UO<sub>2</sub>. Затем, после скола пробки тигля ЭПП, расплавленная топливная композиция сливается в водный бассейн устройства приема расплава. Система измерения фиксирует давление, температуру и состав газовой среды внутри устройства приема расплава.

По окончании экспериментов проводятся материаловедческие исследования, и изучается степень фрагментации расплава кориума.

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Применимость программного комплекса «FLUENT» можно оценить при выполнении следующих основных задач:

- Определение характера взаимодействия расплавленной топливной композицией с водой;
- Определение характера фрагментации струи расплава в ходе взаимодействия;
- Определение изменения температуры материалов в системе;
- 4. Определение изменения давления в системе «пар-вода».

Для проведения теплогидравлических расчетов была разработана расчетная модель, содержащая ~20 тыс. 4-х узловых расчетных ячеек (рисунок 2). Сеть конечных элементов создана с помощью про-граммного кода «GAMBIT v2.2».



Рисунок 2. Осесимметричная расчетная модель для проведения расчетов

Из всех предлагаемых во «Fluent» моделей многокомпонентных потоков для данного процесса более всего подходит модель объемной жидкости (VOF-модель). Эта модель предназначена для расчета взаимодействия многокомпонентных неперемешивающихся жидкостей, и она позволяет отследить изменение межфазовых границ между фракциями смеси. В VOF-модели для представления каждой фракции вводится дополнительная переменная, обозначающая содержание данной фракции в расчетной ячейке. Сумма всех переменных в пределах конечного объема равна 1. Теплофизические свойства можно задавать для каждой фракции отдельно в зависимости от температуры.

Теплофизические свойства жидкости, использующиеся в уравнениях неразрывности и импульса, определяются с учетом всех фракций жидкости, присутствующих в расчетном элементе. Например, плотность в расчетном элементе вычисляется по формуле:

$$\rho = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{q} \rho_{q} \tag{1}$$

где:  $\alpha_q$  и  $\rho_q$  – объемное содержание и плотность *q*-ой фракции; *n* – количество фракций.

Одну газовую фракцию решатель программы позволяет назначить сжимаемой, т.е. ее плотность будет зависеть от температуры и давления среды.

Уравнения неразрывности в VOF-модели применяются для каждой из фракций жидкости. Для q-ой фракции, это уравнение имеет следующую форму:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial \tau} + \nabla \cdot \overset{\mathbf{u}}{w} \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q}, \qquad (2)$$

где:  $S_{\alpha_q}$  – массовая добавка (источник, используется в модели кипения/конденсации, см. соотношения (6)) q-ой фракции;  $\tau$  – время; w – вектор скорости;  $\rho_q$  – плотность q-ой фракции;

$$\nabla \cdot \frac{\mathbf{r}}{W} = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r}$$

оператор Лапласа для двумерной осесимметричной системы.

Уравнение импульса в VOF-модели применяется для описания всех фракций жидкости одновременно, и теплофизические свойства, используемые в уравнении, определяются аналогично выражению (1) для определения плотности среды. Уравнение импульса в VOF-модели имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \rho w \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{u} \\ \rho w w \end{pmatrix} = = -\nabla p + \left[ \mu \left( \nabla w + \nabla w \right) \right] + \rho g + S$$
<sup>(3)</sup>

где:  $\overset{1}{g}$  – вектор гравитации (в данной задаче направлен по направлению оси Х);  $\mu$  – динамическая вязкость среды; p – гидростатическое давление; S– пористость среды (гашение импульса, используется в модели плавления/затвердевания, см. соотношение (5)).

Уравнение энергии в VOF-модели, аналогичное уравнению сохранения количества движения, применяется для описания всех фракций жидкости одновременно:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho E) + \nabla \cdot \left( \stackrel{\mathbf{u}}{w} (\rho E + p) \right) = -\nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T \right) + q_{v}, \quad (4)$$

где: T – температура;  $q_v$  – объемное энерговыделение (используется в модели кипения/затвердевания для учета скрытой энергии фазового перехода);  $k_{eff}$ 

- эффективный коэффициент теплопроводности.

В алгоритмах расчета затвердевания/плавления компонент жидкости используется техника энтальпийной пористости. С использованием этой методики граница «расплав-твердое тело» не определяется явно, а рассматриваются три зоны: «твердая» зона, «мягкая» зона и «жидкая» зона. Количество жидкой фазы в элементе представлено переменной, которая определяет долю расплавленного объема материала в элементе по отношению к полному объему элемента (пористость элемента).

В «жидкой» зоне доля жидкой фазы и пористость элемента равна единице. В полностью затвердевших областях пористость равна нулю: скорость движения жидкости в этих областях тоже становится нулевой. «Мягкая» зона – это область, в которой пористость системы находится в диапазоне между 0 и 1. Гашение импульса в «мягкой» зоне описывается следующей зависимостью:

$$S = \frac{\left(1 - \beta\right)^2}{\left(\beta^3 + \varepsilon\right)} A_{mush} \overset{\mathbf{u}}{W}, \qquad (5)$$

где:  $\beta$  – доля жидкой фазы в расчетном элементе;  $\varepsilon$  – малое число (0,001) для предотвращения деления на ноль;  $A_{mush}$  – постоянная «мягкой» зоны (10<sup>4</sup>-10<sup>7</sup>);  $\overset{\Gamma}{w_p}$  – скорость потока.

Величина пористости используется как дополнительный член в уравнении импульсов (3).

На начало расчета все жидкости находятся в жидком состоянии. При контакте с водой расплавленная топливная композиция будет переходить в твердое состояние.

Модель кипения/конденсации во «Fluent» не введена. Эту модель можно создать с использованием дополнительных (пользовательских) функций, которые перед подключением к решателю, необходимо скомпилировать и создать из них динамическую библиотеку. Назначением данной модели является описание фазового перехода одной жидкости в другую с другой плотностью. Для этого в уравнения неразрывности двух фракций добавляются дополнительные члены – массовые источники, величина которых вычисляется в подключаемой функции для каждого расчетного элемента, в котором происходит фазовый переход.

Величина массовой добавки вычисляется из условий массопереноса, определяемых корреляцией Wen Ho Lee (1979), которая записывается в следующем виде:

$$S_{\alpha_{v}} = \begin{cases} r_{v}\alpha_{l}\rho_{l}\left(T_{l}-T_{sat}\right)/T_{sat} & T_{l} \geq T_{sat} \\ 0 & T_{l} < T_{sat} \end{cases}$$

$$S_{\alpha_{l}} = \begin{cases} r_{l}\alpha_{v}\rho_{v}\left(T_{sat}-T_{v}\right)/T_{sat} & T_{v} \leq T_{sat} \\ 0 & T_{v} > T_{sat} \end{cases}$$
(6)

Здесь,  $S_{\alpha_v}$  и  $S_{\alpha_l}$  - массовые добавки паровой и жидкой фракции, соответственно. Величины  $r_l$  и  $r_v$  в соотношении являются постоянными времени релаксации процессов кипения и конденсации.

Энергия фазового перехода при кипении учитывается дополнительным членом в уравнении энергии VOF-модели (4). Эта энергия вычисляется, также в подключаемой функции, и величина ее зависит от массы фракции, содержащейся в расчетном элементе и участвующей в фазовом переходе.

Знаки добавочных членов в уравнениях неразрывности и энергии будут зависеть от направления фазового перехода (кипение или конденсация) и определяются как:

$$S_{\alpha_l} < 0, S_{\alpha_v} > 0, S_{\alpha_l} =$$
  
=  $-S_{\alpha_v}, q_v < 0$  — при кипении.  
 $S_{\alpha_l} > 0, S_{\alpha_v} < 0, S_{\alpha_l} =$   
=  $-S_{\alpha_v}, q_v > 0$  — при конденсации.

Для вычисления системы уравнений выбран неитеративный решатель, т.к. он обладает более высокой скоростью расчета в сравнении с итеративным. Настройки решателя приведены ниже:



Рисунок 3. Настройки неитеративного решателя

При проведении вычислений используется переменный размер шага по времени, который определяется автоматически средствами программы «Fluent». Размер шага зависит от величины максимального потока на границе расчетных объемов и числа Куранта (Courant-Friedrichs-Lewy), которое можно изменять в ходе расчета. Автоматический выбор размера временного шага позволяет достичь устойчивости при решении таких быстропротекающих процессов как взаимодействие высокотемпературного расплава с водой. Вычислительные ресурсы, при этом, расходуются более эффективно и сокращается время, необходимое для моделирования эксперимента.

Начальное распределение фракций приведено на рисунке 4. Начальная температура расплава – 3300 К.



Density (mixture) (kg/m3) (Time=0.0000e+00)

Рисунок 4. Поле плотностей материалов в начальный момент времени

Для нестационарных задач с VOF-моделью создатели программы «Fluent» рекомендуют использовать схему дискретизации для давления «PRESTO!» или «Body Forced Weighted», а для сопряжения давления и скорости алгоритм «Fractional Step» или «PISO». По предварительным оценкам получено, что с использованием схем «Fractional Step» и «Body Forced Weighted» ход процессов, по сравнению с экспериментальным, более медленный, решение неустойчиво. При выборе опций «PRESTO!» и «PISO» результаты хорошо согласуются с экспериментальными, ход расчета стабилен.

В ходе проведенных расчетов рассчитаны процессы, протекающие в первые 10 секунд взаимодействия. Кинограмма изменения поля плотностей в системе приведена ниже (рисунок 5).



Рисунок 5. Поле плотностей материалов в различные моменты времени процесса

Получено, что в начале процесса, при входе струи расплава в воду парообразование невелико. От удара о дно бассейна струя расплавленной топливной композиции начинает фрагментироваться (рисунок 5а). Образовавшиеся капли горячего расплава значительно увеличивают площадь контакта между топливом и водой, вследствие этого процесс кипения начинает бурно развиваться. Образовавшийся пар, подобно поршню, поднимает воду вверх (рисунок 5б). В ходе этого процесса общий уровень бассейна значительно повышается, давление в емкости становится выше давления в тигле, пар начинает заходить в полость тигля, затормаживая слив кориума.

Получено, что в начале процесса, при входе струи расплава в воду парообразование невелико. От удара о дно бассейна струя расплавленной топливной композиции начинает фрагментироваться (рисунок 5а). Образовавшиеся капли горячего расплава значительно увеличивают площадь контакта между топливом и водой, вследствие этого процесс кипения начинает бурно развиваться. Образовавшийся пар, подобно поршню, поднимает воду вверх (рисунок 5б). В ходе этого процесса общий уровень бассейна значительно повышается, давление в емкости становится выше давления в тигле, пар начинает заходить в полость тигля, затормаживая слив кориума.

В дальнейшем, столб воды, подброшенный паром, начинает оседать, пузыри пара, проходя через слой воды, частично конденсируются, и в емкости образуется пароводяная смесь (рисунок 5в), которая постепенно начинает оседать на дно (рисунок 5г).

При движении в воде поверхность струи расплава неустойчива. Это объясняется тем, что вода при контакте с расплавом вскипает. Парообразование протекает интенсивно, образованный пар движется с большой скоростью, создает локальные неравномерности давления, нестабильность в струе расплава и отрывает от струи капли (фрагментация). При прохождении струи расплава сквозь пароводяную смесь теплообмен между кориумом и теплоносителем ухудшается, так как пароводяная смесь состоит из пара и воды (пористая среда), скорость струй образованного при кипении пара снижается, что в свою очередь стабилизирует течение кориума. Поэтому с момента образования в УПР пароводяной смеси фрагментация расплава становится значительно ниже (рисунок 6).

До ~2.5 секунд с момента начала слива расплава в емкость процессы взаимодействия расплава с водой протекают очень бурно: струи образовавшегося пара «разбивают» падающую струю на мелкие осколки, весь расплав, попавший в емкость, фрагментирован. Далее, после образования «пористой» пароводяной смеси, теплообмен между расплавом и теплоносителем снижается и на дне емкости начинает формироваться слой нефрагментированного расплава (Рисунки 5д, 5е).



Рисунок 6. Фрагментация струи расплава

В большинстве экспериментов длительность первого пика давления, измеренного в экспериментальной секции, составила 0.5 секунд, далее следовал небольшой провал, вызванный замедлением слива кориума и конденсацией пара в УПР, затем наблюдался монотонный рост давления, постепенно в течение ~10 секунд приближающегося к своему квазистационарному значению. Большая часть слитого кориума была фрагментирована, и только незначительная часть расплава найдена на дне бассейна в виде застывшего слитка.

Рассчитанные диаграммы изменения давления пара в емкости и среднемассовой температуры пара показаны на рисунке (рисунок 7). На этом же рисунке приведены кривые изменения импульса давления в системе, полученные в ходе экспериментов.

Сравнение рассчитанной и экспериментальной кривых изменения давления показывает, что разра-

ботанная расчетная модель хорошо описывает первые 3...4 секунды процесса. Дальнейшие отличия в ходе процесса вызваны тем, что полной герметичности между тиглем и УПР в установке нет, а в модели рассматривалась герметичная система емкостьтигель. Разряжение давления в тигле при сливе расплава снижало его расход, который получился меньше экспериментального.

Для учета перетекания газа через неплотности устройства приема расплава необходимо усовершенствовать рассмотренную расчетную модель. Но полученные результаты расчетноаналитической работы уже позволяют провести оценку применимости использованного программного комплекса и дать заключение о дальнейшем его использовании в области обоснования безопасности атомной энергетики.



Рисунок 7. Основные параметры системы, полученные в результате расчета

#### Заключение

В работе показан пример расчетного моделирования процессов взаимодействия расплавленной топливной композиции активной зоны ядерного энергетического реактора в случае аварии с проплавлением корпуса реактора и выходом расплава за пределы реактора. По результатам проведенных расчетов видно, что программный комплекс «FLUENT» применим для моделирования процессов, описывающих поведение многокомпонентных потоков в различных фазовых состояниях, а также взаимодействие между отдельными компонентами этих потоков. С использованием современной компьютерной базы и программного обеспечения можно проводить численные эксперименты и компьютерное моделирование достаточно разнообразных задач. Прогнозирование сценариев развития событий, определение требуемых параметров путем численного моделирования способствует успешному проведению натурных экспериментов, оптимизации различных технологических процессов. Результаты численного моделирования, выполненные с помощью программного комплекса «FLUENT», могут быть использованы в области обоснования безопасного использования ядерных энергоустановок.

## ЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДАҒЫ АУЫР АПАТТЫ МОДЕЛДЕЙТІН ЖЫЛУГИДРАВЛИКАЛЫҚ ҮДЕРІСТЕРДІ СИПАТТАУҒА АРНАЛҒАН «FLUENT» ҚОЛДАНУ

#### Акаев А.С., Васильев Ю.С., Зверев В.В., Нұғыманов Д.Қ.

#### Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов

Берілген жұмыс қайнау/конденсация және балқу/қату сияқты көп компонентті жүйелерде қатар жүретін жылугидравликалық үдерістерді моделдеуге арналған «FLUENT v6.2» қазіргі заманғы бағдарламалық кешеннің қолданылуын тексеруге арналған. Жұмыста Қазақстан Республикасы ұлттық ядролық орталығында жүргізілген ядролық реактор апаттарының қорытынды сатыларын зерттеуге арналған тәжірибелерде жүретін үдерістерді есептік моделдеу мысалы көрсетілген. Тәжірибелік жұмыстар нәтижелері ядролық кондырғылардың энергетикада қауіпсіз қолданылуын негіздеу үшін пайдаланылады. «FLUENT v6.2» бағдарламалық кешеніу қолдану тәжірибелерде жүретін жағдайлардың бірізділігін қалыптастыруға, және олардың дамуын болжауға мүмкіндік береді, бұл тәжірибелерді жоспарлауға қанша қажет болса, олардың нәтижелерін талдауға соншалықты қажет.

## APPLICATION OF "FLUENT" TO DESCRIBE THERMO HYDRAULIC PROCESSES IN EXPERIMENTAL FACILITIES WHICH MODEL SEVERE ACCIDENT DEVELOPMENT IN NUCLEAR REACTOR

## A.S. Akaev, Yu.S. Vassiliev, V.V. Zverev, D.K. Nugumanov

#### National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov

The work is aimed at reviewing the applicability of the "FLUENT v6.2" up-to-date software system for modeling such thermo hydraulic processes as boiling/condensation and melting/solidification concurrently taking place in multicomponent systems. The work presents an example of calculation modeling of processes taking place in experiments performed by National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for research into final stages of an accident in nuclear reactor. Results of experimental works are used for nuclear facilities safety justification. Application of "FLUENT v6.2" software system enables to reproduce sequence of events taking place in experiments and to forecast their development that is necessary for design of experiments and for results analysis as well.

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА МОДУЛЬНОЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ ТРО НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕПЛАВА

Васильев Ю.С., Цынгаев В.М., Кукушкин С.М., Романенко Р.Ф., Супрунов В.И.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

В статье приведены сведения о результатах разработки концептуального проекта переработки твердых радиоактивных отходов, накопленных на территории РК, с помощью передвижных мобильных модулей.

В настоящее время дальнейшее развитие ядерной энергетики в мире встречает все большую обеспокоенность в связи с ее потенциальной экологической опасностью, главным образом, за счет большого накопленного объема РАО, ежегодно пополняемого.

В Казахстане к настоящему моменту в радиационной обстановке из числа накопленных объемов РАО весьма значительную долю составляют низко- и среднеактивные отходы, образовавшиеся в результате добычи и переработки урансодержащих материалов – отвалы горных пород, забалансовых руд и хвосты заводской переработки руд (около 226,5 млн. м<sup>3</sup>), грунты и почвы, загрязненные в результате ядерных испытаний на Семипалатинском ядерном полигоне (около 12,5 млн. м<sup>3</sup>), а также ТРО, образованные при добыче нефти в результате загрязнения радионуклидами почвы, нефтешламов (около 3 млн. м<sup>3</sup>). Эти огромные количества РАО распределены практически по всей территории республики на местах образования в неорганизованном виде и создают радиационный фон, в сотни и тысячи раз превосходящий уровень естественного глобального фона. Поэтому все больше возрастает актуальность разработок наиболее простых и более безопасных технологий переработки РАО различных видов активности.

Как показывает опыт России, только с помощью стационарных спецкомбинатов практически невозможно достичь полного успеха в обращении с РАО. Используемые на данный момент технологии, предполагающие сбор РАО в специальную тару и доставки их местам переработки и последующего захоронения, ухудшают радиационную обстановку и усиливают экологическую и социальную напряженность по маршрутам перевозки РАО. Требуется длительный период времени и огромные финансовые вливания, значительная доля которых потребуется для сбора РАО в специальную тару. Кроме того, экономически не обоснована транспортировка отходов к месту расположения перерабатывающего завода и далее к месту захоронения отходов.

Поэтому для стран с обширными территориями (Россия, США, Канада, Казахстан и др.) актуальной является разработка проектов мобильных установок переработки РАО, позволяющих кондиционировать отходы на местах их образования или скопления.

Решением проблемы для Казахстана может стать разработка варианта первичной обработки низко- и

среднеактивных ТРО (отвалов, хвостов, загрязненных грунтов) на местах их нынешнего базирования с помощью мобильных модулей, которые будут переводить РАО в компактную монолитную форму в виде блоков, не требующих спецтары для транспортировки и дополнительных контейнеров для захоронения.

Следует заметить, что исследования, а также разработка материалов концептуальной проектной проработки, направленные на создание мобильных установок кондиционирования РАО, ранее в Казахстане не проводились.

Для переработки и захоронения ТРО на местах их образования или современного базирования в мировой практике широко используется так называемая ISV-технология. На ее основе фирмой "Geosafe corp." разработана серия передвижных установок.

ISV-процесс предполагает электропереплав таких загрязненных материалов, как грунты, отложения, шламы и хвостовые отвалы, которые накопились на загрязненных площадках или специально привезены для обработки.

Стандартное применение ISV-технологии предполагает использование четырех электродов, которые опускают в грунт. Они подают электрический ток мощностью до 4 МВт, что обеспечивает расплавление грунта при температуре 1400-2000°С. В результате в обрабатываемом объеме грунта происходит полное разложение и удаление органики и стабильная (по оценкам, от тысяч до миллионов лет) иммобилизация неорганических материалов, включая радиоактивные материалы (рисунок 1). При этом происходит также сокращение объема обрабатываемых грунтов на 25-50%, и образуется стекловидный и кристаллический остеклованный продукт с отличными физическими свойствами, стойкий к воздействию различных природных факторов.

Новым в предлагаемом проекте по сравнению с известными ISV-установками фирмы Geosafe corp. является применение в установке электроплавильного котла многоразового использования (рисунок 2) и наличие специальной системы слива для формирования унифицированных остеклованных блоков (упаковок) ТРО, готовых для транспортировки и захоронения в специально оборудованных могильниках или ПЗРО без дополнительных защитных контейнеров.

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА МОДУЛЬНОЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ ТРО НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕПЛАВА



Рисунок 1. Схема обработки отходов по ISV – технологии



кожух; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – огнеупорный слой; 4 – электроды; 5 - электрододержатели.
 Рисунок 2. Общий вид электроплавильной печи

За период 2004-2005 годов были разработаны основные материалы концептуального проекта и проведены следующие работы:

- информационный поиск по разработке мобильных установок переработки ТРО, расчетное определение основных технико-экономических показателей, анализ и сравнительная их оценка для проектов мобильных установок переработки РАО, применяемых в мировой практике, а также сбор и систематизация данных по составу, типу, объемам, физико-химическим характеристикам и т.д. РАО по территории Казахстана с целью подбора соответствующих технологий их переработки;
- сбор и аналитические исследования характеристик существующих электроплавильных установок с целью возможного их использования для кондиционирования загрязненных грунтов, отвалов, хвостов и иных ТРО;
- разработка и обоснование решений по конструкции установки;
- установление особенностей установки, их конструкторская проработка;
- проведение расчетов, подтверждающих работоспособность и надежность конструкции;
- разработка материалов по организации работ с применением установки;
- расчет ожидаемых технико-экономических показателей работы установки.

В первую очередь был определен состав установки. В него вошли:

- модуль подачи ТРО;
- модуль плавки (плавильная печь);
- система слива;
- модуль очистки отходящих газов;
- модуль управления и контроля технологическими параметрами.

На основе литературных данных для каждого модуля был определен тип оборудования, необходимого для выполнения модулем требуемых функций. Для модуля подачи ТРО необходим передвижной автоматический загрузчик, скорость работы которого зависит от уровня расплава в печи. Для модуля плавки была выбрана печь ванного типа, широко используемая в стеклоплавильной промышленности. Подача тока с учетом местных условий должна осуществляться от автономного источника, в качестве которого был выбран дизельный передвижной электрогенератор. В систему слива были включены футерованные стояки, используемые в литейной промышленности. Разливка с учетом местных условий осуществляется в специально подготовленные земляные формы. Для модуля очистки отходящих газов необходимо оборудование, используемое в металлургической промышленности с тремя степенями очистки. Модуль управления и контроля включает в себя систему измерительных и регулирующих устройств, которые позволяют производить в процессе работ контроль за технологическими параметрами работы оборудования.

Были учтены свойства перерабатываемого материала и на их основе подобраны соответствующие материалы для печи, позволяющие работать в течение длительного времени без замены вследствие уменьшения физико-химикого взаимодействия с расплавом.

В процессе проработки конструкции установки выполнены задачи снижения общей массы установки, по возможности сокращения отдельных элементов конструкции для придания установке компактности и как следствие повышения мобильности. Была снижена масса футеровки за счет подбора низкоплотных материалов, изъятия из конструкции тяжеловесных механизмов поворота и наклона печи за счет принятия непрерывного разлива расплава через летку, замена печного свода на засыпку поверх расплава теплоизолятора, выбор генератора, размещаемого на одной грузовой платформе и др.

С учетом предполагаемых условий переработки были определены технологические параметры работы оборудования. По заданным технологическим параметрам было подобрано оборудование, позволяющее выполнять модулям заданные функции. Была определена компоновка оборудования на площадке для переработки ТРО. На основе параметров подобранного оборудования были определены режимы и последовательность работы оборудования. С учетом полученных режимов были определена последовательность выполнения работ персонала на оборудовании.

Был определен состав и квалификация персонала, а также составлен график работы. С учетом условий работы были определены основные вредные факторы и на их основе подобран комплекс мер, необходимых для предотвращения вредного воздействия на персонал.

Были освещены основные вопросы, касающиеся изготовления специального оборудования, которое является нестандартным и в серийном производстве не выпускается.

Также были подобраны транспортные средства, необходимые для транспортировки основного и вспомогательного оборудования.

С помощью пакета программ Ansys были проведены расчеты в обоснование работоспособности и надежности работы печи. Были получены значения механической и термической нагрузок на плавильную печь, являющуюся главным элементом установки, находящимся в критических условиях.

Ниже представлены расчетное распределение температуры (рисунок 3) печи и нагрузки (рисунок 4) на несущий кожух печи.

### РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА МОДУЛЬНОЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ ТРО НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕПЛАВА



Рисунок 3. Распределение температуры в материалах через 200 часов после образования расплава, °К



Рисунок 4. Распределение напряжений в материале кожуха печи, МПа

По результатам расчетов был сделан вывод, что значения тепловой и механической нагрузок не превышают критических значений. Тепловая нагрузка на кожух печи незначительна и составляет не более 200°С, что даже позволяет находиться вблизи печи. Механическая нагрузка менее 20МПа, что почти на порядок ниже допустимой.

Был проведен расчет себестоимости переработки радиоактивного грунта. Себестоимость переработки 1м<sup>3</sup> загрязненного грунта составила 250\$. При этом

стоимость переработки 1 м<sup>3</sup> ТРО с помощью ISVустановки фирмы Geosafe corp. оценивается примерно в 200 долл. США.

В результате проведенных работ получены новые данные для дальнейшего проектирования, экспериментальной отработки и промышленного внедрения

технологий и оборудования для переработки, надежной изоляции и безопасного долговременного хранения (захоронения) РАО, что приведет в конечном итоге к улучшению экологической и социальноэкономической ситуации в Казахстане.

## ЭЛЕКТРО ҚАЙТА БАЛҚЫТУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ НЕГІЗІНДЕ ҚРҚ ҚАЙТА ӨНДЕУ МОДУЛЬДІ ЖЫЛЖЫМАЛЫ ҚОНДЫРҒЫНЫҢ КОНЦЕПТУАЛДЫ ЖОБАСЫН ӘЗІРЛЕУ

### Васильев Ю.С., Цынгаев В.М., Кукушкин С.М., Романенко Р.Ф., Супрунов В.И.

## Қазақстан Республикасының РМК Ұлттық Ядролық орталығы

Осы мақалады ҚР аумағында жиналған қатты радиоактивті қалдықтарды жылжымалы қондырғы арқылы қайта өндеудің концептуалды жобасының әзірлеу нәтижелері көрсетілген.

# WORKING OF THE CONCEPTUAL PROJECT OF MODULAR MOBILE PLANT FOR PROCESSING THE SOLID RADIOACTIVE WASTE ON THE BASIS OF THE TECHNOLOGY OF ELECTRIC REFINING.

## Yu.S. Vassiliev, V.M. Tsyngaev, S.M. Kukushkin, R.T. Romanenko, V.I. Suprunov

## RSE "National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan"

In this chapter there were presented information about results of working of the conceptual project of processing solid radioactive waste, accumulated on territory of RK, with the mobile modules.

## РАДИАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСЕЛКА ПЕРВОМАЙСКИЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗДАНИЙ 22 И 22А БЫВШЕГО ИРТЫШСКОГО ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА И ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К ПУНКТУ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИХМЗ

<sup>1)</sup>Тухватулин Ш.Т., <sup>1)</sup>Пивоваров О.С., <sup>1)</sup>Тихомиров Л.Н., <sup>1)</sup>Цынгаев В.М., <sup>2)</sup>Лукашенко С.Н., <sup>3)</sup>Насонов С.Г.

<sup>1)</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов <sup>2)</sup>Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан <sup>3)</sup>Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье приведены сведения об основных результатах выполнения в 2005 году мероприятия «Проведение работ по радиационному обследованию, выгрузке и размещению и радиоактивных отходов Иртышского химико-металлургического завода на территориях, прилегающих к пункту захоронения радиоактивных отходов, цехов и поселка Первомайский» Республиканской бюджетной программы 011 «Обеспечение радиационной безопасности».

### Введение

Одним из отрицательных последствий развала СССР в Республике Казахстан является снижение уровня контроля над ядерными и радиоактивными материалами полностью либо частично остановленных и, по сути, брошенных предприятий оборонного комплекса бывшего Советского Союза. Одним из таких предприятий является Иртышский химикометаллургический завод, расположенный в пос. Первомайский Восточно-Казахстанской области. На заводе произошла значительная, а по некоторым видам производства и полная остановка производственных циклов.

Сложившаяся ситуация привела к тому, что контроль над радиоактивными отходами на ИХМЗ был утерян. Существует реальная опасность бесконтрольного распространения и использования радиоактивных материалов, угрожающих здоровью населения и нанесению ущерба окружающей среде, при этом вероятна возможность использования радиоактивных материалов и в террористических целях.

Поэтому поиск и изъятие источников ионизирующих излучений, а также принятие превентивных мер по предотвращению их возможного попадания в сферу незаконного оборота являются, на сегодняшний день, актуальной государственной задачей для Республики Казахстан.

В ходе предварительного радиационного обследования, выполненного специалистами РГП НЯЦ РК в мае 2003 г. было установлено, что по совокупности радиационно-опасных объектов, находящихся на территории ИХМЗ, и их современному состоянию ситуация может быть охарактеризована, как крайне неблагоприятная и даже чрезвычайная. Основными радиационно-опасными объектами на территории ИХМЗ, требующими консервации или ликвидации в ближайшее время, по степени радиационной опасности являются:

• Пункты захоронения ампульных источников ионизирующего излучения (АИИИ) и радиоак-

тивных отходов, находящиеся на неконтролируемой и неохраняемой территории;

- Локальные участки, загрязненные радиоактивными отходами производственной деятельности и источниками ионизирующего излучения, находящиеся на площадке ИХМЗ и прилегающих территориях;
- Загрязненное оборудование и территории цехов основного производства бывшего ИХМЗ;
- Бассейны шламонакопители.

В течение 2004 РГП НЯЦ РК и его дочерними предприятиями на бывшем ИХМЗ в рамках Республиканской бюджетной программы (РБП) 011 «Обеспечение радиационной безопасности» были проведены работы по мероприятию «Радиационное обследование, выгрузка и размещение на хранение на комплексе исследовательских реакторов «Байкал-1» ампульных источников ионизирующих излучений и высокоактивных радиоактивных отходов и проведение дезактивационных и восстановительных работ по приведению в радиационно-безопасное состояние пункта захоронения радиоактивных отхо-(ПЗРО) бывшего Иртышского лов химикометаллургического завода».

В результате выполнения комплекса организационных, исследовательских, проектных, инженерных и реабилитационных работ по указанному мероприятию РБП территория пункта хранения радиоактивных отходов и находящихся на ней сооружений, как одни из наиболее радиационно-опасных объектов ИХМЗ, приведены в радиационно-безопасное состояние.

Кроме того, в ходе выполнения работ на территории пункта захоронения радиоактивных отходов ИХМЗ было установлено, что основная часть источников ионизирующего излучения, находившихся в пункте захоронения АИИИ, была расхищена вместе со свинцовыми контейнерами, и существует большая вероятность их нахождения вблизи территории ПЗРО или непосредственно на территории пос. Первомайский.
Следующим этапом работ по ликвидации радиационно-опасной ситуации, представляющей угрозу здоровью людей и окружающей среде, на территории ИХМЗ и пос. Первомайский являются работы, проводимые РГП НЯЦ РК и его дочерними предприятиями в 2005 году по мероприятию «Проведение работ по радиационному обследованию, выгрузке и размещению источников ионизирующего излучения и радиоактивных отходов Иртышского химико-металлургического завода на территориях, прилегающих к пункту захоронения радиоактивных отходов, цехов и пос. Первомайский» в рамках той же РБП 011 «Обеспечение радиационной безопасности», целями которого являются получение достоверной информации о радиоактивном заражении территорий, прилегающих к бывшему ИХМЗ, и частичное снижение радиационной опасности путем обнаружения и удаления с обследованных территорий ампульных источников ионизирующего излучения (утерянных с ПЗРО) и высокоактивных РАО, возможно образованных при несанкционированном обращении с АИИИ.

При выполнении данного этапа мероприятий бюджетной программы решаются следующие основные задачи:

- Проведение радиационного обследования территории поселка Первомайский, включая пятисотметровую санитарно-защитную зону (СЗЗ), и территорий, прилегающих к ПЗРО ИХМЗ (на удалениях от ограждения ПЗРО до 500 метров), а также зданий 22 и 22а, расположенных на контролируемой территории ИХМЗ.
- Проведение отбора проб окружающей среды с обследованных объектов и их радиометрический, спектрометрический анализ в лабораторных условиях.
- Поиск и удаление источников ионизирующего излучения и высокоактивных радиоактивных отходов с обследованных территорий, их упаковка, транспортировка и размещение на долговременное хранение на КИР «Байкал-1».
- Разработка рекомендаций и долгосрочной научно-обоснованной программы работ по ликвидации всех радиационно-опасных объектов, расположенных как на контролируемой территории ИХМЗ, так и на территории ПЗРО.

# Основные результаты работ

Радиационное обследование проводилось на трех объектах: 1) на территории собственно поселка Первомайский с прилегающей СЗЗ, 2) на территории вокруг ПЗРО ИХМЗ, 3) в зданиях 22 и 22а бывшего ИХМЗ и на прилегающей к ним территории шириной 10 метров.

1) С помощью спутникового топопривязчика GPS «Globalmap» выполнены топо-геофизические работы по разбивке сетки радиологических измерений на территории посёлка и санитарно-защитной зоны (СЗЗ, полосы шириной 500 м вокруг жилой

зоны поселка), по прокладке маршрутов проведения обследования и сбору данных для разработки электронной карты обследуемой территории. Произведен выбор и обследование фонового участка площадью 100×100 м на территории поселка Северный, на котором по сетке 20×20 м проведены измерения мощности гамма-излучения (средняя величина МЭД гамма-излучения составляет 0,09 мкЗв/час), определены географические координаты точек изъятия проб грунта для лабораторных исследований.

Одна из полученных в результате топогеофизических работ карт-схем с нанесенными точками замеров радиационных параметров и указанием фонового участка приведена ниже (рисунок 1).



Рисунок 1. Карта-схема поселка Первомайский с указанием точек измерения радиационных параметров

С помощью переносных приборов ДКС-96 и ДРГ-О1Т выполнены работы по радиологическому обследованию поселка Первомайский путем проведения пешеходной гамма-съемки с замером уровня радиоактивного загрязнения на высотах 5 см и 1 м (на территории поселка по сетке 20×20 м, а на территории С33 по сетке 50×50 м), в результате которой:

 по территории СЗЗ, прилегающей к жилой зоне поселка, замерены радиационные параметры более чем в 1000 точках, и аналогичные замеры проведены (около 3000 точек) на площади жилой зоны поселка, включающей: жилые дома и прилегающие к ним земельные участки, 3 пункта приема металлолома, здание больницы и прилегающей к ней территории, территорию автостанции, площадь местного мини-рынка с находящимися на ней магазинами, киосками, торговыми палатками и т. д., школу, общественные и производственные здания и т. д. На

## РАДИАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСЕЛКА ПЕРВОМАЙСКИЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗДАНИЙ 22 И 22А БЫВШЕГО ИРТЫШСКОГО ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА И ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К ПУНКТУ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИХМЗ

указанных территориях, объектах, а также в жилых домах и на прилегающих к ним земельных участках измерены: плотность потока альфа-, бета-частиц и мощность экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения в фиксированных точках. При этом установлено, что в целом значения МЭД гамма-излучения составляют от 0,09 до 0,14 мкЗв/час (на уровне естественного глобального фона), плотность поверхностного загрязнения по бета-излучению не превышает 8 част/(мин×см<sup>2</sup>);

• выявлено 15 участков с площадями от 25 до 1600 м<sup>2</sup> с превышением по сравнению с фоновыми значений радиационных параметров (интенсивность гамма-излучения до 60 мкР/ч). При этом также обнаружены: в пункте приема металлолома металлическая конструкция, на поверхности которой было зафиксировано радиоактивное загрязнение альфа- и бетаизлучающими радионуклидами; в школе им. Карбышева источник гамма-излучения (0,6 мкЗв/ч) и на поселковой мусорной свалке два источника бета-излучения с интенсивностью 1300 част/(сек×см<sup>2</sup>) каждый. Обнаруженная конструкция и ИИИ изъяты и отправлены на захоронение на комплекс исследовательских реакторов (КИР) «Байкал-1» в г. Курчатов.

Для выяснения особенностей распределения загрязнений на всех выявленных аномальных земельных участках проведено детальное (по сетке 1×1 м) исследование радиационных параметров, и в точках с максимальными их значениями отобраны послойные пробы грунта для проведения радиометрического и спектрометрического анализа в лабораторных условиях.

Кроме того, согласно программе обследования в рамках отбора проб окружающей среды на территории поселка, СЗЗ и фонового участка были отобраны:

- 1. поверхностные и послойные пробы грунта;
- 2. пробы растительности;
- 3. пробы воды;
- пробы воздушных аэрозолей для определения объемной активности естественных и искусственных радионуклидов в воздухе поселка Первомайский;
- 5. пробы воздуха на содержание радона.

Отбор проб почвы проводился послойно (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 см) с шагом 500 м. Внутри поселка было отобрано 224 послойных пробы (из них 52 на аномальных участках). По периметру поселка было отобрано 128 проб почвы (из них на аномальных участках 33 пробы), на фоновом участке отобрано 144 послойные пробы.

Также были отобраны и измерены на месте пробы почво-грунтов для определения концентрации ртути, всего 380 проб.

Отбор проб воды проводился на имеющихся источниках на территории поселка и вокруг него с их

топопривязкой с помощью систем спутниковой навигации. Всего было отобрано 9 проб воды из поверхностных источников и 2-е пробы из скважин:

- местный водопровод (1 проба);
- родник, расположенный за поселком 05 (1 проба);
- р. Иртыш (2 пробы);
- отстойники ИХМЗ (пруды-шламонакопители) всего 4 пробы;
- в речке Жамансу, протекающей через ПЗРО;
- из артезианских скважин, расположенных на территории поселка в крестьянском хозяйстве и доме престарелых.

Пробы растительности отбирались в аномальных точках и в районе объектов возможного скопления местного населения. Всего было отобрано 18 проб. Пробы были измельчены, высушены и переданы для проведения аналитических работ.

Пробы воздуха отбирались в жилых помещениях, помещениях общественных и производственных зданий (школа, магазин, акимат, гостиница, административное здание завода ИХМЗ), в подвалах и погребах, на открытой местности. Всего отобрано 18 воздушно-аэрозольных проб и 49 проб на содержание радона.

В лабораторных условиях выполнены работы по определению элементного и радионуклидного составов всех проб, отобранных при обследовании пос. Первомайский.

Результаты микроэлементного анализа показывают, что во всех образцах почвы концентрации K, Ni, Cu, Zn, Br, Ba, всех редкоземельных элементов, W, Pb, Th, и U повышенные. Вероятнее всего, это является геохимической особенностью данного региона. Содержание ртути в почве в пределах 0,01-0,42 мг/кг, что соответствует фоновым концентрациям и значительно ниже предельно допустимой величины, равной 2,1 мг/кг.

Анализ проб на содержание стронция-90 и плутония-239+240 показал, что их концентрации находятся на уровне глобальных выпадений, и загрязнений этими радионуклидами обследованной территории нет.

Результат сравнения радионуклидного состава проб фонового участка и проб, изъятых на территории поселка и СЗЗ, приводит к выводу, что грунт поселка содержит в себе примеси отходов производства тория со значимыми загрязнениями на выявленных аномальных участках.

2) На территориях, прилегающих к ПЗРО ИХМЗ (ширина исследуемой полосы – 500 метров), произведены рекогносцировка и прокладка маршрутов поисковых работ вокруг ограждения ПЗРО с последующим их обследованием переносными приборами с шагом регулярной сетки при проведении гаммасъемки – 1 м и с шагом сетки при измерении альфаи бета- излучения – 20 метров. Во время обследований выполнено 1 440 000 измерений мощности эквивалентной дозы гамма излучения и по 3 600 измерений плотности потока альфа-, бета-частиц и мощности эквивалентной дозы нейтронов.

При этом обнаружено 50 пятен загрязнения территории радиоактивными веществами. Обнаруженные на начальном этапе обследования пятна загрязнений радиоактивными веществами имели относительно небольшие площади и были очищены (28 пятен) путем сбора на них РАО общим объемом 8 м<sup>3</sup> и вывоза их на КИР «Байкал-1». Однако ряд выявленных в дальнейшем пятен имеет очень значительные размеры и объемы. Вероятно, они пред-



ставляют собой траншейное захоронение радиоактивных отходов, которое было организовано еще в начале деятельности ИХМЗ, и информация о нем оказалась утерянной. Суммарная площадь загрязнения после зачистки ранее обнаруженных малых пятен составляет примерно 17 400 м<sup>2</sup>, общим объемом – 8 700 м<sup>3</sup>.

Картограммы гамма-загрязнений исследуемой территории с разбивкой на квадраты по сетке 100×100 м до удаления с них РАО и после этой операции приведены ниже (рисунок 2).



а - до удаления РАО б – после удаления РАО

Рисунок 2. Картограммы гамма-загрязнений территории вокруг ПЗРО

На обнаруженных загрязненных участках значения радиационных параметров варьируют в широких диапазонах: измеренная мощность эквивалентной дозы гамма-излучения лежит в пределах от 0,7 до 130 мкЗв/ч, плотность потока альфа-частиц – от менее 1 до 160 част/(мин×см<sup>2</sup>), плотность потока бета-частиц от 10 до 900 000 част/(мин×см<sup>2</sup>).

В точках, где МЭД превышает в несколько раз уровень естественного фона, проводились полевые гамма-спектрометрические измерения. Анализ этих измерений показал, что в большинстве загрязнений присутствуют гамма-линии продуктов распада <sup>232</sup>Th: <sup>228</sup>Ac, <sup>212</sup>Pb, <sup>212</sup>Bi, <sup>208</sup>Tl, а также изотопа <sup>40</sup>К. В одной из точек анализ показал наличие гамма-линий радиоизотопа <sup>133</sup>Ba.

Остальная обследованная территория вне загрязненных пятен может считаться условно «чистой», так как имеет следующие характеристики: мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в пределах от 0,15 до 0,24 мкЗв/ч, плотность потока альфа-частиц менее 1 част/(мин×см<sup>2</sup>), плотность потока бета-частиц менее 10 част/(мин×см<sup>2</sup>). Источников нейтронного излучения на обследованной территории не обнаружено.

В ходе рад обследования данной территории отбирались пробы грунта для последующего радиоизотопного анализа. Отбор проб производился по реперной сети с шагом 250 м и в каждом обнаруженном загрязненном участке. Из проб, отобранных по реперной сети, были выбраны 8 проб грунта для радиохимического определения <sup>90</sup>Sr и 4 пробы грунта для определения изотопов Ри. Всего с территории вокруг ПЗРО отобрано 85 проб (из них 3 пробы воды).

Отобранные на загрязненных участках территории, прилегающей к ПЗРО, пробы грунта проанализированы в лабораторных условиях на определение удельной активности радионуклидов. Результат анализов показывает, что, в основном, радиоактивность отобранных образцов грунта определяется наличием калия-40 (с максимальной удельной активностью в пробе около 4777 Бк/кг), тория-232 (до 99000 Бк/кг), урана-238 (до 24945 Бк/кг), радия-226 (до 28080 Бк/кг) и цезия-137 (до 80 Бк/кг), стронция-90 (до 2,1×10<sup>7</sup> Бк/кг).

Проведенные исследования показали, что основным загрязнителем территории является торий-232 и продукты его распада. Однако в некоторых пробах, отобранных в точках с аномально большим бета-загрязнением, гамма-спектрометрическим методом удалось обнаружить лишь тормозное излучение, что свидетельствует о наличии только бета-излучающего нуклида. Радиохимический анализ этих проб позволил предположить, что данным нуклидом служит стронций-90 в равновесии с дочерним нуклидом иттрием-90. В одной из проб гамма-спектрометрический анализ показал присутствие изотопа бария-133.

Исходя из полученных значений активности изотопов стронция-90 и бария-133, можно предположить, что эти загрязнения возникли в результате разрушения источников. Однако ни АИИИ, ни высокоактивных РАО на обследованной территории не обнаружено.

3) Радиоактивные загрязнения, возникавшие в результате производственной деятельности цехов в зданиях 22 и 22а, рассредоточены: в технологических трубопроводах, приемной баковой аппаратуре, в системе кислой канализации, на станции нейтрализации промышленных стоков, в донных осадках шламонакопителей и в сбросных водах, поступающих в реку Иртыш.

В процессе работ проводилось, как радиационное обследование территории, прилегающей к зданиям 22 и 22а (десятиметровая полоса вокруг каждого из зданий), так радиационное обследование внутри зданий. При этом на территории вне зданий выполнено измерение уровней гамма-излучения, а также радиоактивного загрязнения поверхности земли альфа- и бета-активными нуклидами, отбор проб грунта для последующего радиоизотопного анализа, проведение гамма-спектрометрии загрязненных участков. Внутри зданий - измерение уровней радиоактивного загрязнения поверхностей строительных конструкций и технологического оборудования цехов альфа- и бета-активными нуклидами, отбор проб для последующего радиоизотопного анализа, гамма-спектрометрия загрязненных участков. Процесс радиационного обследования внутри зданий иллюстрирует рисунок 3.

На территории вокруг зданий 22 и 22А обнаружены 10 радиоактивно загрязненных участков общей площадью ~ 17 м<sup>2</sup> с объемом загрязненного грунта ~ 0,24 м<sup>3</sup>, остальная территория – условно «чистая».

Обследование внутри зданий показало, что стены, потолки технологических помещений и короба приточной вентиляции радиоактивных загрязнений не имеют. Радиоактивно загрязненными являются:

- внутренние поверхности коробов вытяжной вентиляции (до 50 альфа частиц/(мин×см<sup>2</sup>);
- частично пол помещений обоих зданий (из общей площади помещений ~7 200 м<sup>2</sup> около 4 400 м<sup>2</sup> имеют радиоактивные загрязнения выше допустимых пределов); загрязнение обусловлено в зд. 22 в основном торием-232, в зд 22а ураном 238;
- технологическое оборудование (всего обследовано 157 емкостей, в том числе 9 прессов); при этом в 85 емкостях содержатся технологические отходы, в том числе 69 емкостей содержат РАО общим объемом 98,5 м<sup>3</sup> (42 м<sup>3</sup> ТРО и 56,5 м<sup>3</sup> ЖРО), а в остальных 72 емкостях технологических отходов не найдено, но 41 емкость из них имеет поверхностные радиоактивные загрязнения выше допустимых пределов.

На схемах приведены картограмма гаммаизлучения на первом этаже зд. 22 с обозначением положения радиоактивно загрязненных пятен вокруг него (рисунок 4) и картограмма гамма-излучения на первом этаже с обозначением положения радиоактивно загрязненных пятен вокруг зд. 22a (рисунок 5).

По ходу выполнения радобследования зданий отобрано и обработано 93 пробы (80 проб из емкостей, 8 проб грунта с территории вокруг цехов и 5 проб мусора из цехов), проведено 104 гамма спектрометрических анализа, которые показали, что все РАО, обнаруженные в зданиях 22 и 22а и на примыкающих к ним территориях, категорируются как низкоактивные. Общее количество твердых РАО, находящихся в зданиях (остатки сырья, радиоактивный мусор, трубопроводы и емкости, имеющие поверхностное радиоактивное загрязнение и т.п.), оценивается примерно в 500 тонн. Высокоактивных РАО и АИИИ не обнаружено.

Также выполненные измерения содержания радона (торона) в воздухе помещений показали, что ЭРОА радона (торона) в зд. 22 не превышает 139 Бк/м<sup>3</sup>, а в зд. 22а 84 Бк/м<sup>3</sup>, что меньше установленных норм (ЭРОА радона в производственных помещениях для персонала группы А не должна превышать 1200 Бк/м<sup>3</sup>, торона - 270 Бк/м<sup>3</sup>).



Рисунок 3. Радиационное обследование зд. 22 и 22а

## РАДИАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСЕЛКА ПЕРВОМАЙСКИЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗДАНИЙ 22 И 22А БЫВШЕГО ИРТЫШСКОГО ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА И ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К ПУНКТУ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИХМЗ





Рисунок 5. Картограмма гамма-излучения на 1 этаже зд. 22а

4) На основе результатов радиационного обследования поселка Первомайский, территорий вокруг ПЗРО и зданий 22 и 22а ИХМЗ, результатов аналитических работ по отобранным пробам на обследованных территориях и объектах, а также с учетом анализа современных методов ликвидации аналогичных радиационно-опасных ситуаций завершена разработка программы ликвидации радиационно-опасных объектов ИХМЗ на срок 2006-2008 годы, включающая:

• предложения по комплексу мероприятий на ПЗРО ИХМЗ, предполагающему расширение площади ПЗРО на 500 м для включения в него вновь оборудованных участков захоронения низко- и среднеактивных РАО, удаляемых с обследованных, радиоактивно загрязненных территорий ИХМЗ и к нему прилегающих, а также по комплексу мероприятий по ликвидации радиационной опасности, вызываемой обнаруженными на северо-западе от территории ИХМЗ 8-ю неизвестными ранее траншеями с захоронениями РАО, предполагающему обнаруженные траншеи бетонировать методом цементации под давлением на месте без вскрытия траншей и перевозки РАО на ПЗРО, так как это может усугубить экологическую обстановку в регионе и увеличить коллективную дозу облучения, получаемую населением и персоналом, выполняющим природоохранные мероприятия;

- предложения по комплексу дезактивационных и демонтажных работ по ликвидации радиационно-опасной ситуации, которые необходимо выполнить на обследованных зданиях 22 и 22а ИХМЗ, включая мероприятия по технике безопасности и промсанитарии;
- предварительные, предпроектные экономические оценки с определением основных технико-экономических показателей выполнения мероприятий, предусмотренных предлагаемой программой;
- график производства работ по предлагаемой программе;
- предварительный сметный расчет стоимости проведения работ в соответствии с предлагаемой программой по ликвидации радиационноопасных объектов ИХМЗ в 2006-2008 г.г., который дает оценку общей стоимости работ в сумме около 430 млн. тенге.

# Заключение

В результате проведенных работ по реализации мероприятия «Проведение работ по радиационному обследованию, выгрузке и размещению источников

## РАДИАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОСЕЛКА ПЕРВОМАЙСКИЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗДАНИЙ 22 И 22А БЫВШЕГО ИРТЫШСКОГО ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА И ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К ПУНКТУ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИХМЗ

ионизирующего излучения и радиоактивных отходов Иртышского химико-металлургического завода на территориях, прилегающих к пункту захоронения радиоактивных отходов, цехов и пос. Первомайский» в рамках РБП 011 «Обеспечение радиационной безопасности» поставленные задачи по проведению радиационного обследования территории поселка Первомайский, включая пятисотметровую СЗЗ, и территорий, прилегающих к ПЗРО ИХМЗ, производственных зданий 22 и 22а бывшего ИХМЗ с отбором проб окружающей среды с обследованных объектов и их радиометрическим, спектрометрическим анализом в лабораторных условиях, а также с поиском и удалением источников ионизирующего излучения и высокоактивных радиоактивных отходов с обследованных территорий выполнены в полном объеме, что позволило получить достоверные данные о радиоактивном заражении территорий, прилегающих к бывшему ИХМЗ, и произвести частичное снижение радиационной опасности путем удаления с обследованных территорий трех источников ионизирующего излучения (в том числе утерянных с ПЗРО) и 8 кубических метров твердых РАО, находившихся на неконтролируемой территории вокруг ПЗРО.

С учетом данных, полученных при измерениях радиационных параметров на обследованных территориях, разработана программа мероприятий по ликвидации в 2006-2008 годах радиационно-опасных объектов, связанных с бывшим ИХМЗ, предполагающая проведение реабилитационных работ в означенный период на сумму около 430 млн. тенге, и которая должна стать основным документом для принятия решений Правительством Казахстана о финансировании этих работ в предстоящие годы.

# ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫНЫҢ ПЕРВОМАЙ ПОСЕЛКЕСІН, БҰРЫНҒЫ ЕРТІС ХИМИЯ-МЕТАЛЛУРГИЯ ЗАУЫТЫНЫҢ 22 ЖӘНЕ 22А ҒИМАРАТТАРЫ МЕН ЕХМЗ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРЫН КӨМУ ПУНКТІНЕ ЖАНАСЫП ЖАТҚАН АУМАҚТАРЫН РАДИАЦИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

<sup>1)</sup>Тухватулин Ш.Т., <sup>1)</sup>Пивоваров О.С., <sup>1)</sup>Тихомиров Л.Н., <sup>1)</sup>Цынгаев В.М., <sup>2)</sup>Лукашенко С.Н., <sup>3)</sup>Насонов С.Г.

<sup>1)</sup>Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов <sup>2)</sup> ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан <sup>3)</sup>ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Мақалада 2005 жылы 001 «Радиациялық қауіпсіздікті қамтамасыздау» Республикалық бюджеттік бағдарламасының «Ертіс химия-металлургия зауытының радиоактивті қалдықтарды көму пунктіне жанасып жатқан аумақтарының, цехтердің және Первомай поселкесінің иондауыш сәулелендіру көздері мен радиоактивті қалдықтарын радиациялық зерттеу, түсіру және орналастыру бойынша жұмыстар жүргізу» шарасын орындаудың негізгі нәтижелері туралы мағлұматтар келтірілген.

# RADIATION SURVEY OF PERVOMAYSKIY SETTLEMENT IN EAST-KAZAKHSTAN REGION, FORMER IRTYSHSKIY CHEMICAL-METALLURGICAL FACTORY'S 22 AND 22A BUILDINGS, AND TERRITORIES AROUND ICMF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

<sup>1)</sup>Sh.T. Tukhvatulin, <sup>1)</sup>O.S. Pivovarov, <sup>1)</sup>L.N. Tikhomirov, <sup>1)</sup>V.M. Tsyngaev, <sup>2)</sup> S.N. Lukashenko, <sup>3)</sup> S.G. Nasonov

<sup>1)</sup>National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov <sup>2)</sup>Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan <sup>3)</sup>Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

In this article there is information about achieved in 2005 main results of realization of the Republic Budget Program 011 "Providing of Radiation Safety" in the part "Accomplishment of Radiation Survey of territories around ICMF radioactive waste disposal, factory sections and Pervomayskiy settlement, and Removal and Disposal of Irtyshskiy Chemical-Metallurgical Factory's ionizing radiation sources and radioactive wastes from there".

# РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СТАНЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНОК МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

#### Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Краев Ю.А.

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

В статье представлены некоторые результаты исследований, проводимых Геофизической службой РАН в рамках проекта «Кинематическая калибровка сейсмических станций Международной системы мониторинга в Северной Евразии», направленных на улучшение оценок станциями Международной системы мониторинга (МСМ) местоположения сейсмических источников.

## Введение

Настоящая публикация продолжает ряд статей и докладов на международных конференциях [1-7], описывающих результаты исследований по проблеме региональной сейсмической калибровки применительно к станциям Международной системы мониторинга (МСМ) и годографу IASPEI-91 [8]. Одним из важных этапов в решении этой задачи является построение региональных годографов для различных геотектонических провинций Северной Евразии. В [1,2] изложены основные направления исследований и результаты одного из этапов этих работ с использованием данных о подземных ядерных взрывах, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне. Подобные работы проводились для всей территории Северной Евразии на основе известных мирных ядерных взрывов и испытаний, наиболее значительных по магнитуде, В данной статье представлены результаты построения региональных годографов, их обобщения для целей кинематической калибровки станций МСМ и оценка эффективности применения построенных поправок к годографу IASPEI-91.

#### Основные исходные данные

Калибровочные источники. На завершающем этапе исследований в качестве калибровочных событий использовались только подземные ядерные взрывы (ПЯВ), для которых были опубликованы точные данные о времени в очаге и координатах эпицентра. Это - выборка из 197 калибровочных событий, которая включает ПЯВ, произведенные в мирных целях в разных районах СССР [14], ПЯВ на Семипалатинском испытательном полигоне [9] и на о. Амчитка, США [12, 13].

Данные о временах пробега. Основу для получения данных о временах пробега составили результаты сейсмических наблюдений, проведенных в 1965 – 1990 гг., в ГС РАН, КСЭ ОИФЗ РАН и ССК МО РФ. Были собраны и проанализированы значения времен пробега для основных региональных фаз сейсмических волн (Pn/P, Pg, Sn/S и Lg). Общее количество станций ГС РАН, данные которых использованы для исследований, составило около 300, КСЭ – около 200, а ССК МО РФ – около 50. Кроме того, были использованы данные около 300 зарубежных станций из бюллетеней Международного сейсмологического центра (ISC, Англия, Ньюбери). Общее число сейсмических фаз, собранных в специализированную Базу данных из различных источников для 197 калибровочных событий Северной Евразии, составило: P – 4733, Pn – 5442, Pg – 1222, S –1460, Sn – 2702, Lg –3241.

# РЕГИОНАЛИЗАЦИЯ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ И ПОСТРОЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГОДОГРАФОВ И ПОПРАВОК К ГОДОГРАФУ IASPEI-91

Регионализация Северной Евразии была проведена, главным образом, на базе недавних публикаций по неотектонике, геодинамике и сейсмическому районированию [10, 11], а также на основе анализа данных о временах пробега Pn/Sn волн, полученных авторами. В итоге, территория Северной Евразии подразделена на 13 регионов (рисунок 1а): Центрально-Восточно-Европейский, Тимано-Печорская провинция, Скифская и Туранская плиты, Кайнозойские складчатые области, Урал, Западно-Сибирская платформа, Казахский массив, Алтай и Саяны, Сибирская платформа, Байкальская рифтовая зона, Приамурье и Приморье, Северо-Восточный регион и Чукотский полуостров, регион Камчатки, Курил и Сахалина.

Географические координаты углов контура регионов представлены в таблице 1.

Годографы основных сейсмических фаз для региональных расстояний (200 – 2000 км) построены на основе метода линейной регрессии с использованием одной или двух линий регрессии для представления совокупности экспериментально наблюденных данных о временах пробега волн. Модельные ошибки рассчитаны как стандартные отклонения экспериментальных значений от линий регрессии в скользящем двухградусном окне с 50–% перекрытием. Основное уравнение и параметры построенных годографов представлены в таблице 2.



Рисунок 1. Регионализация Северной Евразии: а – общая; б-г: укрупненная (б – по Pn, Sn; в – по Lg; г – по Pg-волнам)

Таблица 1. Регионализация Северной Евразии

| №<br>п/п | Регион                                                                                   | Координаты углов контуров, сев. широта – вост. долгота                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I        | Центрально–Восточно–<br>Европейский                                                      | 70–48 67–48 67–49 66–49 66–50 65–50 65–51 64–52 63–53 62–53 62–53 62–54 61–54 61–56 60–<br>57 57–57 57–56 46–56 46–49 47–49 47–47 48–46 49–46 49–40 47–40 47–27 48–27 08–26 49–26<br>49–25 50–25 50–10                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| П        | Тимано–Печорская<br>провинция                                                            | 69–48 69–62 68–62 68–64 67–64 67–63 66–63 66–59 65–59 65–58 63–58 63–57 60–57 60–56 61–<br>56 61–54 62–54 62–53 63–53 63–52 64–52 64–51 65–51 65–50 66–49 67–49 67–48                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ш        | Урал                                                                                     | 77-58 77-69 76-69 76-66 75-66 75-61 74-61 74-58 73-58 73-57 72-57 72-56 71-56<br>71-61 70-61 70-68 67-68 67-67 66-67 66-64 65-64 65-62 64-62 64-61 58-61 58-62<br>54-62 54-63 51-63 51-62 49-62 49-61 48-61 48-59 47-59 47-56 57-56 57-57 63-57<br>63-58 65-58 65-59 66-59 66-63 67-63 67-64 68-64 68-62 69-62 69-58 70-58 70-54<br>71-54 71-52 73-52 73-54 74-54 74-55 75-55 75-56 76-56 76-58                                                                        |
| IV       | Скифская и<br>Туранская плиты                                                            | 51-62 51-65 47-65 47-66 46-66 46-67 44-67 44-68 42-68 42-67 43-67 43-64 38-64 38-61 37-61 37-59 38-59 38-57 39-57 39-56 38-56 38-55 37-55 37-54 39-54 39-52 40-52 40-50 41-50 41-49 42-49 42-48 43-48 43-44 44-43 45-43 45-33 46-33 46-30 47-30 47-40 49-40 49-46 48-46 48-47 47-47 47-49 46-49 46-56 47-56 47-59 48-59 48-61 49-61 49-62                                                                                                                              |
| v        | Кайнозойские<br>складчатые<br>области (Карпаты, Крым,<br>Кавказ, Копетдаг,<br>Тянь–Шань) | 50-20 50-25 49-25 49-26 48-26 48-27 47-27 47-30 46-30 46-33 45-33 45-43 44-43 44-44<br>43-44 43-48 42-48 42-49 41-49 41-50 40-50 40-52 39-52 39-54 37-54 37-55 38-55 38-56<br>39-56 39-57 38-57 38-59 37-59 37-61 38-61 38-64 43-64 43-67 42-67 42-68 44-68 44-67<br>45-67 45-69 44-69 44-70 43-70 43-75 44-75 44-77 45-77 45-79 46-79 46-81 49-81 49-84<br>48-84 48-86 47-86 47-87 46-87 46-90 45-90 45-100 40-100 40-76 34-76 34-40 41-40 41-20                      |
| VI       | Казахский массив                                                                         | 53–63 53–65 54–65 54–70 53–70 53–72 52–72 52–75 51–75 51–81 46–81 46–79 45–79 45–77<br>44–77 44–75 43–75 43–70 44–70 44–69 45–69 45–67 46–67 46–66 47–66 47–65 51–65 51–63                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| VII      | Западно–Сибирская<br>платформа                                                           | 77-69 77-113 74-113 74-106 73-106 73-105 72-105 72-101 71-101 71-90 70-90 70-86 67-86<br>67-87 66-87 66-88 63-88 63-89 62-89 62-90 60-90 60-91 59-91 59-92 57-92 57-89<br>56-89 56-86 57-86 57-85 56-85 56-83 54-83 54-82 52-82 52-81 51-81 51-75 52-75<br>52-72 53-72 53-70 54-70 54-65 53-65 53-63 54-63 54-62 58-62 58-61 64-61 64-62<br>65-62 65-64 66-64 66-67 67-67 67-68 70-68 70-61 71-61 71-56 72-56 72-57 73-57 73-58<br>74-58 74-61 75-61 75-66 76-66 76-69 |
| VIII     | Алтай и Саяны                                                                            | 59–92 59–94 55–94 55–99 54–99 54–101 53–101 53–102 43–102 45–90 46–90 46–8747–87 47–86 48–86 48–84 49–84 49–81 52–81 52–82 54–82 54–83 56–83 56–85 57–85 57–86 56–86 56–89 57–89 57–92                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

# РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СТАНЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНОК МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

| №<br>п/п | Регион                                            | Координаты углов контуров, сев. широта – вост. долгота                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ıх       | Байкальская рифтовая зона                         | 52–102 52–105 53–105 53–107 54–107 54–108 56–108 56–109 57–109 57–111 58–111 58–113<br>59–113 59–117 58–117 58–121 57–121 57–123 56–123 56–125 55–125 55–120 54–120 54–117<br>53–117 53–112 52–112 52–110 50–110 50–102                                                                                                                                                                                                                                                    |
| x        | Сибирская<br>платформа                            | 74–106 74–127 69–127 69–125 68–125 68–124 67–124 67–125 65–125 64–127 64–130 63–130<br>63–136 59–136 59–134 58–134 58–133 57–133 57–131 56–131 56–128 55–128 55–125 56–123<br>57–123 57–121 58–121 58–117 59–117 59–113 58–111 57–111 57–109 56–109 56–108 54–108<br>54–107 53–105 52–105 52–102 53–102 53–101 54–101 54–99 55–99 55–94 59–94 59–91<br>60–91 60–90 62–90 62–89 63–89 63–88 66–88 66–87 67–87 67–86 70–86 70–90<br>71–90 71–101 72–101 72–105 73–105 73–106 |
| хі       | Северо–Восточный регион и<br>Чукотский полуостров | 73–127 73–170W 60–170W 60–160 59–160 59–140 55–140 55–128 59–160 59–140 55–140<br>55–128 56–128 56–131 57–131 57–133 58–133 58–134 59–134 59–136 63–136 63–130<br>64–130 64–127 65–127 65–125 67–125 67–124 68–124 68–125 69–125 69–127                                                                                                                                                                                                                                    |
| XII      | Приамурье и<br>Приморье                           | 55–120 55–140 44–140 44–120                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| XII      | Камчатка-Курилы-Сахалин                           | 159–160 60–160 60–164 50–164 50–157 48–157 48–154 46–154 46–150 43–150 43–140                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

| Таблииа 2. Параметры                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | годографов (глубина | = 0 км). Базовое уравнени | e: $T-R/Vred$ | $= (A \pm \sigma A) - (B)$ | $\pm \sigma B \times R$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------|
| The second |                     |                           |               |                            | - /                     |

| Фаза | ΔR, км    | V <sub>red</sub> , км/с            | Α           | $\sigma_A$         | В               | $\sigma_{\rm B}$ | Ν   | r     | SD, c |
|------|-----------|------------------------------------|-------------|--------------------|-----------------|------------------|-----|-------|-------|
|      |           | І. Цеі                             | нтрально–В  | осточно-           | Европейский     |                  |     | -     |       |
| Pn   | 220-1100  | 8.0                                | 7.78        | 0.36               | 0.0040          | 0.0004           | 43  | 0.83  | 0.7   |
|      | 1101–2200 | 8.0                                | 13.24       | 0.60               | 0.0089          | 0.0004           | 108 | 0.92  | 1.1   |
| Sn   | 220–2200  | 4.62                               | 14.86       | 1.88               | 0.0046          | 0.0018           | 50  | 0.34  | 3.1   |
| Pg   | 220–1400  | 6.0                                | 0.88        | 0.87               | 0.0066          | 0.0010           | 29  | 0.80  | 1.5   |
| Lg   | 220-2200  | 3.5                                | 2.86        | 2.42               | 0.0077          | 0.0021           | 167 | 0.13  | 5.0   |
|      |           | <ol> <li>Тимано Печорск</li> </ol> | ая провинц  | ия; IV. Скі        | ифская и Турано | ская плиты       |     |       |       |
| Pn   | 200–2000  | 8.0                                | 8.26        | 0.69               | 0.0042          | 0.0011           | 29  | 0.58  | 0.9   |
| Sn   | 350–1400  | 4.62                               | 16.08       | 1.47               | 0.0031          | 0.0020           | 20  | 0.35  | 2.0   |
| Pg   | 350-1000  | 6.0                                | -1.16       | 2.31               | 0.0044          | 0.0034           | 17  | 0.31  | 2.6   |
| Lg   | 350–1500  | 3.5                                | 3.20        | 2.23               | 0.0085          | 0.0030           | 23  | 0.52  | 3.4   |
|      |           |                                    |             | I. Урал            |                 |                  |     |       |       |
| Pn   | 300–2000  | 8.0                                | 8.89        | 0.36               | 0.0047          | 0.0003           | 33  | 0.95  | 0.7   |
| Sn   | 300–2000  | 4.62                               | 12.54       | 1.90               | -0.0006         | 0.0015           | 30  | 0.08  | 3.2   |
| Pg   | 300–1200  | 6.0                                | 1.13        | 2.80               | 0.0074          | 0.0030           | 14  | 0.57  | 2.8   |
| Lg   | 300-2000  | 3.5                                | -2.80       | 3.16               | 0.0026          | 0.0025           | 20  | 0.24  | 4.8   |
|      |           | V. Ka                              | айнозойские | складча            | гые области     |                  |     |       |       |
| Pn   | 200–990   | 8.0                                | 8.20        | 0.41               | 0.0018          | 0.0006           | 91  | 0.32  | 1.2   |
|      | 991–2000  | 8.0                                | 10.88       | 0.88               | 0.0048          | 0.0006           | 51  | 0.75  | 1.1   |
| Sn   | 200–2000  | 4.62                               | 14.19       | 0.82               | 0.0001          | 0.0009           | 51  | 0.01  | 2.1   |
| Pg   | 200–1100  | 6.0                                | 0.77        | 1.04               | 0.0039          | 0.0014           | 29  | 0.49  | 1.4   |
| Lg   | 220–2200  | 3.5                                | 2.86        | 2.42               | 0.0077          | 0.0021           | 167 | 0.13  | 5.0   |
|      | 1         | 1                                  | VI. Каза    | хский мас          | СИВ             | r                |     | -     |       |
| Pn   | 200–1800  | 8.0                                | 9.42        | 0.22               | 0.0050          | 0.0002           | 64  | 0.94  | 0.7   |
| Sn   | 200–1800  | 4.62                               | 15.10       | 0.82               | 0.0029          | 0.0008           | 51  | 0.47  | 2.3   |
| Pg   | 300–1200  | 6.0                                | 1.13        | 2.80               | 0.0074          | 0.0030           | 14  | 0.57  | 2.8   |
| Lg   | 300–2000  | 3.5                                | -2.80       | 3.16               | 0.0026          | 0.0025           | 20  | 0.24  | 4.8   |
|      |           | VII.                               | Западно-С   | ибирская           | платформа       |                  |     |       |       |
| Pn   | 220-2200  | 8.0                                | 8.22        | 0.22               | 0.0061          | 0.0002           | 70  | 0.90  | 1.3   |
| Sn   | 220-2200  | 4.62                               | 12.82       | 1.47               | 0.0021          | 0.0010           | 56  | 0.28  | 3.5   |
| Pg   | 250-1200  | 6.0                                | 1.26        | 2.17               | 0.0083          | 0.0022           | 22  | 0.64  | 2.4   |
| Lg   | 220–2200  | 3.5                                | -2.96       | 2.77               | 0.0038          | 0.0018           | 44  | 0.30  | 6.3   |
|      |           |                                    | VIII. Ал    | тай и Сая          | НЫ              |                  |     |       |       |
| Pn   | 200-2200  | 8.0                                | 8.71        | 0.24               | 0.0021          | 0.0002           | 113 | 0.66  | 1.0   |
| Sn   | 220-2200  | 4.62                               | 14.85       | 0.72               | -0.0017         | 0.0006           | 47  | 0.35  | 2.0   |
| Pg   | 200-1200  | 6.0                                | 0.54        | 1.03               | 0.0038          | 0.0012           | 36  | 0.47  | 1.7   |
| Lg   | 200–2200  | 3.5                                | -2.52       | 1.12               | 0.0011          | 0.0009           | 57  | 0.16  | 3.4   |
|      | 000.0000  | IX. Байкальская                    | рифтовая    | <u>зона XII. I</u> | Іриамурье и Пр  | иморье           |     | 0 = 0 |       |
| Pn   | 200-2000  | 8.0                                | 7.01        | 0.27               | 0.0011          | 0.0003           | 44  | 0.56  | 0.9   |
| Sn   | 200-2000  | 4.62                               | 12.26       | 0.90               | -0.0032         | 0.0009           | 33  | 0.54  | 2.7   |
| Рg   | 200-1200  | 6.0                                | -0.88       | 0.77               | 0.0030          | 0.0010           | 28  | 0.50  | 1.5   |
| Lg   | 200–2200  | 3.5                                | <u> </u>    | 0.79               | 0.0016          | 0.0006           | 41  | 0.34  | 2.6   |
|      | 000.000   |                                    | Х. Сибирс   | кая плато          | рорма           | 0.0010           |     | 0.00  |       |
| Pn   | 220-999   | 8.0                                | 7.75        | 0.74               | 0.0043          | 0.0010           | 33  | 0.62  | 1.1   |
| 0.5  | 1000-2200 | 8.0                                | 10.89       | 0.69               | 0.0074          | 0.0004           | 80  | 0.90  | 1.3   |
| Sn   | 200-2000  | 4.62                               | 15.78       | 1.11               | 0.0057          | 0.0007           | 91  | 0.63  | 3.3   |
| Рg   | 200-1100  | 6.0                                | -1.80       | 1.36               | 0.0035          | 0.0015           | 39  | 0.36  | 2.3   |
| Lg   | 220-2200  | 3.5                                | -4.57       | 1.28               | 0.0002          | 0.0008           | 82  | 0.01  | 4.1   |

## РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СТАНЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНОК МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

|                                                    |                                                                                  | ~                                                                                                                                                                                               | $\sigma_A$                                                                                                                                                                                                                                                                                   | В                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | σΒ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | N                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | r                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | SD, c                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|
| ХІ. Северо–Восточный регион и Чукотский полуостров |                                                                                  |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |  |  |  |
| 220-1900                                           | 8.0                                                                              | 7.57                                                                                                                                                                                            | 0.51                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.0020                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0004                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 26                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.68                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |
| 220-2000                                           | 4.62                                                                             | 11.17                                                                                                                                                                                           | 1.73                                                                                                                                                                                                                                                                                         | -0.0033                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.0013                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.54                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |
| 200–1200                                           | 6.0                                                                              | -0.76                                                                                                                                                                                           | 1.77                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.0020                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0024                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0.35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1.9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |
| 200-2200                                           | 3.5                                                                              | -0.71                                                                                                                                                                                           | 2.09                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.0018                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0013                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 21                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.29                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 4.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |
|                                                    | XI                                                                               | II. Камчатка                                                                                                                                                                                    | –Курилы-                                                                                                                                                                                                                                                                                     | -Сахалин                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |  |  |  |
| 200–1800                                           | 8.0                                                                              | 6.99                                                                                                                                                                                            | 0.51                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.0015                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0004                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 43                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.47                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |
| 220-2000                                           | 4.62                                                                             | 17.89                                                                                                                                                                                           | 2.96                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.0010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 21                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |
|                                                    | 220-1900<br>220-2000<br>200-1200<br>200-2200<br>200-1800<br>200-1800<br>220-2000 | 220–1900         8.0           220–2000         4.62           200–1200         6.0           200–2200         3.5           XII           200–1800         8.0           220–2000         4.62 | 220–1900         8.0         7.57           220–2000         4.62         11.17           200–1200         6.0         -0.76           200–2200         3.5         -0.71           XIII. Камчатка           200–1800         8.0         6.99           220–2000         4.62         17.89 | 220–1900         8.0         7.57         0.51           220–2000         4.62         11.17         1.73           200–1200         6.0         -0.76         1.77           200–2200         3.5         -0.71         2.09           XIII. Камчатка–Курилы-           200–1800         8.0         6.99         0.51           220–2000         4.62         17.89         2.96 | 220–1900         8.0         7.57         0.51         0.0020           220–2000         4.62         11.17         1.73         -0.0033           200–1200         6.0         -0.76         1.77         0.0020           200–2200         3.5         -0.71         2.09         0.0018           ХІІІ. Камчатка-Курилы-Сахалин           200–1800         8.0         6.99         0.51         0.0015           220–2000         4.62         17.89         2.96         0.0010 | 220–1900         8.0         7.57         0.51         0.0020         0.0004           220–2000         4.62         11.17         1.73         -0.0033         0.0013           200–1200         6.0         -0.76         1.77         0.0020         0.0024           200–2200         3.5         -0.71         2.09         0.0018         0.0013           XIII. Камчатка–Курилы–Сахалин           200–1800         8.0         6.99         0.51         0.0015         0.0004           220–2000         4.62         17.89         2.96         0.0010         0.0021 | 220–1900         8.0         7.57         0.51         0.0020         0.0004         26           220–2000         4.62         11.17         1.73         -0.0033         0.0013         18           200–1200         6.0         -0.76         1.77         0.0020         0.0024         7           200–2200         3.5         -0.71         2.09         0.0018         0.0013         21           XIII. Камчатка-Курилы-Сахалин           200–1800         8.0         6.99         0.51         0.0015         0.0004         43           220–2000         4.62         17.89         2.96         0.0010         0.0021         21 | 220–1900         8.0         7.57         0.51         0.0020         0.0004         26         0.68           220–2000         4.62         11.17         1.73         -0.0033         0.0013         18         0.54           200–1200         6.0         -0.76         1.77         0.0020         0.0024         7         0.35           200–2200         3.5         -0.71         2.09         0.0018         0.0013         21         0.29           XIII. Камчатка-Курилы-Сахалин           200–1800         8.0         6.99         0.51         0.0015         0.0004         43         0.47           220–2000         4.62         17.89         2.96         0.0010         0.0021         21         0.10 |  |  |  |  |  |

Примечание: Т – время пробега, с; R – эпицентральное расстояние, км; V<sub>red</sub> – скорость редукции, км/с; N – объем выборки;

r – коэффициент корреляции; SD – остаточное стандартное отклонение, с.

По завершении обработки данных проведен анализ полученных региональных годографов для каждого из 13 регионов с целью исследования возможности построения обобщенных годографов для больших территорий Северной Евразии, объединенных по их сейсмотектонической общности. Объединение областей проведено по геологическому возрасту и значениям скоростей распространения региональных сейсмических волн. В результатк, в первую группу были включены обширные платформенные области Северной Евразии: Центрально-Восточно-Европейская территория, Запално-Сибирская и Сибирская платформы. Значения кажущейся скорости распространения Рп-волн для этих регионов составляют 8.2-8.3 км/с при расстояниях до 800-1100 км; 8.4-8.6 км/с - при расстояниях до расстояний 2000-2200 км, а значения кажущейся скорости Sn-волн – 4.8 км/с во всем диапазоне расстояний для всех регионов.

Вторую группу составили области палеозойского возраста: Уральский складчатый пояс, Казахский массив и молодые плиты - Скифская, Тимано– Печорская и Туранская. Значения кажущейся скорости распространения Рп-волн для этих регионов составляют 8.3 км/с, а кажущейся скорости Sn- волн – 4.5–4.6 км/с для диапазона расстояний 200–2000 км.

Третью группу составили тектонически активные области Северной Евразии: кайнозойские складчатые регионы - горный Крым, Кавказ, Копет– Даг, Тянь–Шань;- Алтай и Саяны, Байкальская рифтовая зона, Приморье и Приамурье, Северо– Восток и Чукотка, Камчатка, Курилы и Сахалин. Кажущаяся скорость распространения Рп-волн для этих регионов составляет 8.1–8.2 км/с, а кажущаяся скорость Sn-волн – 4.4 – 4.5 км/с для диа пазона расстояний 200–2000 км.

Значения кажущейся скорости распространения Рд-волн для областей первой и второй групп территорий составляют 6.2–6.3 км/с, а для третьей – 6.0– 6.1 км/с. Значения кажущейся скорости распространения Lg-волн практически не подразделяются для территорий первой, второй и третьей групп и лежат в диапазоне 3.5–3.6 км/с.

С учетом полученных результатов было выдвинуто предположение о возможном объединении геолого-тектонических провинций в три обобщенные области по скоростям Рп- и Sn-волн: платформенные; палеозойские массивы и молодые платформы: тектонически активные области (рисунок 1б); в две обобщенные области по скоростям Pg-волн: платформенные, палеозойские массивы, молодые платформы и тектонически активные области (рисунок 1в); в единую геологотектоническую область по скоростям Lg-волн (рисунок 1г). Для подтверждения гипотезы о возможном объединении провинций и построении обобщенных региональных годографов для трех больших территорий Северной Евразии статистически проверено предположение о случайном характере отклонений уравнений регрессии, описывающих региональные годографы в отдельных геотектонических провинциях в пределах каждой из трех выделенных территорий. Для всех областей выдвинутая гипотеза подтвердилась. В таблице 3 приведены географические координаты углов контуров обобщенных областей.

Для каждой из трех укрупненных областей, объединены выборки данных, методом линейной регрессии, рассчитаны региональные годографы Pn-, Pg-, Sn- и Lg-волн и оценены модельные ошибки этих годографов. Параметры обобщенных региональных годографов представлены в таблице 4, а соответствующие модельные ошибки приведены в таблице 5.

Таблица 3. Укрупненная регионализация Северной Евразии

| №<br>п/п | Регион                                            | Координаты углов контуров, сев. широта – вост. долгота                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Платформенные<br>области                          | 70–10 70–48 67–49 66–49 66–50 65–50 65–51 64–51 64–52 63–52 63–53 62–53 62–54 61–54 61–56 60–56 60–57 57–57 57–56 46–56 46–49 47–49 47–47 48–47 48–46 49–46 49–40 47–40 47–27 48–27 48–26 49–26 49–25 50–25 50–10 77–69 77–127 69–127 69–125 68–125 68–124 67–124 67–125 65–125 65–127 64–127 64–130 63–130 63–136 59–136 59–134 58–134 56–123 57–123 57–121 58–121 58–117 59–117 59–113 58–113 58–111 57–111 57–109 56–109 56–108 54–107 53–107 53–105 52–105 52–102 53–102 53–101 54–101 54–99 55–99                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|          | USIACTV                                           | 55-94 59-94 59-92 57-89 56-86 57-86 57-86 57-85 56-85 56-83 54-83 54-82 52-82 52-81 51-81 51-75 52-75 52-72 53-72 53-70 54-70 54-86 57-86 57-85 53-63 54-63 54-62 58-62 58-61 64-61 64-62 65-62 65-64 66-64 66-67 67-67 67-68 70-68 70-61 71-61 71-56 72-56 72-57 73-57 73-58 74-58 74-61 75-61 75-66 76-66 76-69                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 11       | Палеозойские<br>массивы<br>и молодые<br>платформы | 77-58 77-69 76-69 76-66 75-66 75-61 74-61 74-58 73-58 73-57 72-57 72-56 71-56 71-61 70-61 70-68<br>67-68 67-67 66-67 66-64 65-64 65-62 64-62 64-61 58-61 58-62 54-62 54-63 53-63 53-65 54-65 54-70<br>53-70 53-72 52-72 52-75 51-75 51-81 46-81 46-79 45-79 45-77 44-77 44-75 43-75 43-70 44-70 44-69<br>45-69 45-67 44-67 44-68 42-68 42-67 43-67 43-64 38-64 38-61 37-61 37-59<br>38-59 38-57 39-57 39-56 38-56 38-55 37-55 37-54 39-54 39-52 40-52 40-50 41-50 41-49 42-49 42-48<br>43-48 43-44 44-44 44-43 45-43 45-33 46-33 46-30 47-30 47-40 49-40 49-46 48-46 48-47 47-47 47-49<br>46-49 46-56 57-56 57-57 60-57 60-56 61-56 61-56 61-54 62-53 63-53 63-52 64-52 64-51 65-51 65-50<br>66-50 66-49 67-49 67-48 70-48 70-51 72-51 72-52 73-52 73-54 74-54 74-55<br>75-55 75-56 76-56 76-58                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|          | Тектонически<br>активные<br>области               | $\begin{array}{c} 77-127 & 77-170W \ 60-170W \ 60-170 & 50-170 & 50-157 & 45-157 & 45-140 & 42-140 & 42-100 & 40-100 & 40-90 & 35-90 \\ 35-70 & 30-70 & 30-20 & 50-20 & 50-25 & 49-25 & 49-26 & 48-26 & 48-27 & 47-27 & 47-30 & 46-30 & 46-33 & 45-33 & 45-43 & 44-43 & 44-44 & 43-44 & 43-48 & 42-48 & 42-49 & 41-49 & 41-50 & 40-50 & 40-52 & 39-52 & 39-54 & 37-54 & 37-55 & 38-55 & 38-56 \\ 39-56 & 39-57 & 38-57 & 38-57 & 38-59 & 37-61 & 38-61 & 38-64 & 43-64 & 43-67 & 42-67 & 42-68 & 44-68 & 44-67 & 45-67 \\ 45-69 & 44-69 & 44-70 & 43-70 & 43-75 & 44-75 & 44-77 & 45-77 & 45-79 & 46-79 & 46-81 & 52-81 & 52-82 & 54-83 \\ 56-83 & 56-85 & 57-85 & 57-86 & 56-86 & 56-89 & 57-92 & 59-92 & 59-94 & 55-94 & 55-99 & 54-99 & 54-101 & 53-101 \\ 53-102 & 52-102 & 52-105 & 53-105 & 53-107 & 54-107 & 54-108 & 6-108 & 56-109 & 57-109 & 57-111 & 58-111 & 58-113 & 59-113 & 59-117 & 58-117 & 58-121 & 57-123 & 56-123 & 56-125 & 55-128 & 56-138 & 56-131 & 57-131 & 57-133 \\ 58-133 & 58-133 & 59-134 & 59-136 & 63-136 & 63-130 & 64-130 & 64-127 & 65-127 & 65-125 & 67-126 & 67-124 & 68-124 & 68-125 & 69-125 & 69-127 \\ \end{array}$ |

Таблица 4. Параметры обобщенных годографов (глубина = 0 км Базовое уравнение:  $T-R/V_{red} = (A \pm \sigma_A) - (B \pm \sigma_B) \times R$ 

| Фаза | ΔR, км    | V <sub>red</sub> ,<br>км/с | Α                   | σ <sub>A</sub> | В             | σ <sub>B</sub> | N   | r    | SD,<br>c |
|------|-----------|----------------------------|---------------------|----------------|---------------|----------------|-----|------|----------|
|      |           |                            | I. Пла <sup>.</sup> | гформенны      | ые области    |                |     |      |          |
| Dn   | 220-1190  | 8.0                        | 8.18                | 0.36           | 0.0049        | 0.0004         | 103 | 0.75 | 1.0      |
| FII  | 1191-2200 | 8.0                        | 12.49               | 0.49           | 0.0085        | 0.0003         | 262 | 0.88 | 1.3      |
| Sn   | 220-2200  | 4.62                       | 14.54               | 0.73           | 0.0043        | 0.0005         | 246 | 0.50 | 3.6      |
| Pg   | 220-1400  | 6.0                        | -0.44               | 0.73           | 0.0047        | 0.0010         | 109 | 0.42 | 2.1      |
| Lg   | 200-2500  | 3.5                        | -1.69               | 0.59           | 0.0020        | 0.0005         | 462 | 0.20 | 5.3      |
|      |           | II. П                      | алеозойские         | масивы и       | молодые плато | рормы          |     |      |          |
| Pn   | 200–2200  | 8.0                        | 8.95                | 0.17           | 0.0047        | 0.0002         | 153 | 0.93 | 0.9      |
| Sn   | 350-1400  | 4.62                       | 14.40               | 0.70           | 0.0016        | 0.0007         | 100 | 0.24 | 2.7      |
| Pg   | 220-1400  | 6.0                        | -0.44               | 0.73           | 0.0047        | 0.0010         | 109 | 0.42 | 2.1      |
| Lg   | 200–2500  | 3.5                        | -1.69               | 0.59           | 0.0020        | 0.0005         | 462 | 0.20 | 5.3      |
|      |           |                            | III. Тектон         | ически акт     | ивные области |                |     |      |          |
| Pn   | 200-1800  | 8.0                        | 8.54                | 0.17           | 0.0024        | 0.0002         | 342 | 0.62 | 1.2      |
| Sn   | 200-2000  | 4.62                       | 13.18               | 0.57           | -0.0018       | 0.0005         | 165 | 0.25 | 3.0      |
| Pg   | 200–1400  | 6.0                        | -0.44               | 0.52           | 0.0026        | 0.0007         | 98  | 0.37 | 1.6      |
| Lg   | 200-2500  | 3.5                        | -1.69               | 0.59           | 0.0020        | 0.0005         | 462 | 0.20 | 5.3      |

Примечание: Т – время пробега, с; R – эпицентральное расстояние, км; V<sub>red</sub> – скорость редукции, км/с; N – объем выборки; г – коэффициент корреляции; SD – остаточное стандартное отклонение, с.

Как можно заметит из таблиц, количество данных, использованных при построении годографов для обобщенных областей, существенно увеличилось, а модельные ошибки значительно уменьшились в сравнении с годографами, построенными для 13 провинций Северной Евразии.

Годографы сейсмических волн Pn, Pg, Sn и Lg на региональных расстояниях для трех обобщенных зон Северной Евразии показаны на рисунке 2 в сравнении с годографом IASPEI–91 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior – 91).

По одномерным годографам, построенным для каждой из 13 провинций, восстановлены скоростные модели Рп- и Sn-волн (рисунок 3, а путем их объединения и интерполяции построена трехмерная модель Северной Евразии, которая была также использована для построения площадных станционных поправок.

# РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СТАНЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНОК МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

|             |                      |        |         |        |             |             |             |           | 1           |          |           |         |
|-------------|----------------------|--------|---------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|----------|-----------|---------|
| Б           | I - Пла <sup>-</sup> | тформе | нные о  | бласти | II - Палеоз | ойские масс | ивы и моло  | дые плиты | III - Terte | онически | активные  | области |
| т.,<br>град | Мод                  | цельны | е ошибн | (И, С  |             | Модельны    | е ошибки, с |           | N           | Іодельны | е ошибки, | С       |
| град.       | Pn                   | Pg     | Sn      | Lg     | Pn          | Pg          | Sn          | Lg        | Pn          | Pg       | Sn        | Lg      |
| 2           | 0.6                  | 1.4    | 0.4     | 3.4    | 0.5         | 1.4         | 2.6         | 3.4       | 0.9         | 1.2      | 2.7       | 3.4     |
| 3           | 0.6                  | 1.2    | 0.3     | 3.2    | 0.5         | 1.2         | 2.1         | 3.2       | 1.0         | 1.4      | 2.9       | 3.2     |
| 4           | 0.8                  | 1.8    | 2.3     | 3.3    | 0.8         | 1.8         | 2.0         | 3.3       | 0.9         | 1.3      | 2.4       | 3.3     |
| 5           | 0.8                  | 2.2    | 2.1     | 3.7    | 0.8         | 2.2         | 2.0         | 3.7       | 0.9         | 1.3      | 2.0       | 3.7     |
| 6           | 0.8                  | 2.4    | 1.9     | 3.8    | 0.8         | 2.4         | 2.2         | 3.8       | 1.2         | 1.3      | 2.3       | 3.8     |
| 7           | 1.0                  | 2.7    | 2.8     | 3.9    | 0.9         | 2.7         | 2.7         | 3.9       | 1.2         | 1.6      | 2.7       | 3.9     |
| 8           | 1.5                  | 2.2    | 2.9     | 4.1    | 0.9         | 2.2         | 2.9         | 4.1       | 1.2         | 2.0      | 3.6       | 4.1     |
| 9           | 1.2                  | 2.1    | 3.3     | 5.6    | 1.0         | 2.1         | 3.1         | 5.6       | 1.4         | 2.0      | 3.8       | 5.6     |
| 10          | 1.2                  | 3.0    | 3.4     | 5.3    | 1.0         | 3.0         | 1.7         | 5.3       | 1.3         | 2.0      | 3.4       | 5.3     |
| 11          | 1.3                  | 2.8    | 3.3     | 5.1    | 1.0         | 2.8         | 2.8         | 5.1       | 1.3         | 1.9      | 4.2       | 5.1     |
| 12          | 1.3                  |        | 3.8     | 6.7    | 0.9         |             | 4.1         | 6.7       | 1.2         |          | 4.4       | 6.7     |
| 13          | 1.3                  |        | 3.7     | 6.3    | 1.2         |             | 3.4         | 6.3       | 1.3         |          | 3.2       | 6.3     |
| 14          | 1.3                  |        | 3.4     | 6.4    | 1.1         |             | 3.2         | 6.4       | 1.4         |          | 3.1       | 6.4     |
| 15          | 1.4                  |        | 4.2     | 6.4    | 0.9         |             | 3.5         | 6.4       | 1.2         |          | 3.1       | 6.4     |
| 16          | 1.3                  |        | 4.5     | 6.4    | 1.0         |             | 3.4         | 6.4       | 1.5         |          | 4.4       | 6.4     |
| 17          | 1.4                  |        | 3.9     | 6.3    | 0.9         |             | 3.5         | 6.3       | 1.5         |          | 3.1       | 6.3     |
| 18          | 1.3                  |        | 3.4     | 5.7    | 0.9         |             | 3.3         | 5.7       | 1.5         |          | 2.3       | 5.7     |
| 19          | 1.3                  |        | 3.5     | 5.3    |             |             |             | 5.3       |             |          |           | 5.3     |
| 20          | 1.1                  |        |         | 6.2    |             |             |             | 6.2       |             |          |           | 6.2     |

|                                         | ~ \               |                                       |                                       | <i>a</i> .  | -       |
|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|---------|
|                                         | OUUNDIMI ATC      | a wirnwallailli 18 22000 01rm 010111/ | 101MIN 1010011111111111               | 1 000011011 | Hondonn |
| I U U I U U U U U U U U U U U U U U U U | <i>ОШИОКИ ОЛУ</i> | я уклупненных сеотектониче            | ских тровиници                        | Севернои    | гализии |
|                                         |                   |                                       | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |             |         |



1 – время, к - расстояние

Рисунок 2 Годографы сейсмических волн для Северной Евразии: a - Pn /P; б - Pg; в - Sn; г - Lg

Площадные станционные поправки к временам пробега региональных фаз сейсмических волн были рассчитаны для 36 станций, входящих в Международную систему мониторинга (МСМ), на основе метода пропорционального годографа [15], для одномерных годографов и по программе SSSC2 [16] для трехмерной модели Северной Евразии. В таблице 6 приведены результаты расчета отклонений наблюденных времен от рассчитанных для 9 станций MCM.



Рисунок 3. Скоростные модели Северной Евразии

Таблица 6. Отклонения наблюденных времен пробега от рассчитанных по годографам IASPEI–91, , региональным годографам и трехмерным моделям

| C           | 0                | <b>D</b> | <b>.</b> |    | IASPEI-    | -91    | Региональные г | одографы | Трехмерные | модели |
|-------------|------------------|----------|----------|----|------------|--------|----------------|----------|------------|--------|
| станция мсм | станция-суррогат | к, км    | Фаза     | N  | Среднее, с | CKO, c | Среднее, с     | CKO, c   | Среднее, с | CKO, c |
|             |                  |          | Pn       | 37 | -3.1       | 1.6    | 0.7            | 1.1      | 0.3        | 1.2    |
|             |                  | 0.0      | Sn       | 20 | -11.7      | 4.0    | -1.5           | 2.8      | 0.8        | 3.2    |
| OBN         | OBIN             | 0,0      | Pg       | 13 | -3.2       | 3.6    | 0.4            | 1.6      | _          | -      |
|             |                  |          | Lg       | 17 | -2.3       | 2.4    | 2.6            | 2.7      | 1.3        | 5.2    |
|             |                  |          | Pn       | 48 | -3.3       | 1.7    | 0.2            | 1.2      | 0.5        | 1.8    |
|             |                  | 0.0      | Sn       | 33 | -7.2       | 4.8    | 0.6            | 4.2      | 2.4        | 4.1    |
| ARU         | ARU              | 0,0      | Pg       | 13 | -3.4       | 2.3    | -1.1           | 2.2      | 6.9        | 2.4    |
|             |                  |          | Lg       | 24 | -6.1       | 3.9    | -2.0           | 5.7      | 0.4        | 11.0   |
| KIV0        | PYA              | 28,9     | Pn       | 20 | -2.6       | 1.4    | -0.7           | 0.7      | 0.5        | 1.0    |
|             |                  |          | Pn       | 21 | -3.6       | 2.5    | 0.0            | 1.5      | -1.4       | 1.5    |
| VAK         | VAK              | 0.0      | Sn       | 16 | -12.4      | 5.7    | -1.9           | 3.3      | -0.6       | 2.7    |
| TAN         | TAN              | 0,0      | Pg       | 6  | -2.8       | 1.9    | -0.3           | 1.9      | _          | -      |
|             |                  |          | Lg       | 14 | -2.8       | 4.2    | 2.2            | 4.1      | -6.4       | 5.8    |
|             |                  |          | Pn       | 18 | -4.0       | 1.3    | 0.3            | 1.3      | 0.0        | 1.3    |
| TIVI        | ТІК              | 0,0      | Sn       | 16 | -10.8      | 4.3    | -0.2           | 2.5      | 2.6        | 3.7    |
|             |                  |          | Pg       | 4  | -4.6       | 2.1    | -2.2           | 2.0      | -          | -      |
|             |                  |          | Lg       | 13 | -2.5       | 3.4    | 2.4            | 3.6      | -5.3       | 5.9    |
|             |                  |          | Pn       | 22 | -1.9       | 2.5    | 0.0            | 1.3      | 0.8        | 1.3    |
| ті у        | וסג              | 75.0     | Sn       | 15 | -12.0      | 4.1    | -3.2           | 3.0      | 2.8        | 3.1    |
| 161         | INN              | 15,9     | Pg       | 8  | -1.7       | 1.2    | 1.1            | 1.0      | _          | -      |
|             |                  |          | Lg       | 15 | -3.2       | 3.9    | 2.4            | 3.1      | -5.8       | 6.4    |
| MA2         | MA1              | 0,0      | Pn       | 10 | -2.7       | 1.3    | 0.6            | 1.1      | 0.7        | 1.1    |
|             |                  |          | Pn       | 24 | -1.1       | 3.0    | 0.9            | 1.3      | 1.2        | 1.4    |
| 741         | FLT              | 121 0    | Sn       | 24 | -3.6       | 4.3    | 1.0            | 2.5      | 2.8        | 3.2    |
| 276         |                  | 121,0    | Pg       | 3  | -          | -      | -              | -        | -          | -      |
|             |                  |          | Lg       | 9  | -1.6       | 2.8    | 2.3            | 2.1      | -3.2       | 5.1    |
|             |                  |          | Pn       | 28 | -3.1       | 2.9    | 0.1            | 2.1      | 0.9        | 2.9    |
| NDI         | NDI              | 10       | Sn       | 32 | -9.2       | 7.5    | -1.3           | 6.0      | -0.7       | 4.9    |
| ININI       |                  | 48       | Pg       | 15 | -3.0       | 3.3    | -0.8           | 3.0      | -          | -      |
|             |                  |          | Lg       | 27 | -4.9       | 5.7    | -0.5           | 5.6      | -11.6      | 8.2    |

## Эксперименты по релокации

Эксперименты по релокации выполнены для 65 исторических ПЯВ, произведенных в мирных целях и на Семипалатинском испытательном полигоне, по которым были публикованы точные данные о времени в очаге и координатах эпицентров [9,14]. При релокации были использованы как годографы IASPEI-91, так и региональные годографы, построенные для укрупненных провинций Северной Евразии, и станционные поправки, рассчитанные по одномерным и трехмерным скоростным моделям. Станционные поправки для волн Pn, Pg, Sn и Lg были получены с использованием данных по 82 станциям - суррогатам (Станции, совпадающие по местоположению с современными станциями МСМ или вблизи них (удаление не более чем на 300 км), и расположенные в пределах одной и той же сейсмотектонической зоны.).

Результаты экспериментов приведены в таблице 7 и могут быть обобщены следующим образом:

 среднее значение отклонения оценок местоопределения калибровочных источников улучшилось с 24,2 км ,при применении только годографа IASPEI–91, до 9,4 км и 13.2 км – при использовании поправок, рассчитанных с применением региональных годографов и трехмерных моделей, соответственно;

- при применении только годографа IASPEI-91 внутри 90-% эллипсов ошибок находится 42% эпицентров калибровочных источников. При использовании поправок, рассчитанных с применением региональных годографов и трехмерных моделей - 84% и 60%, соответственно;
- среднее значение площади эллипса ошибок составляет 863 км<sup>2</sup> при использовании годографов IASPEI–91, тогда как эта площадь составляет 539 км<sup>2</sup> и 539 км<sup>2</sup> при использовании поправок, рассчитанных с применением региональных годографов и трехмерных моделей, соответственно;
- среднее значение смещения оценок времен в очаге составило 2,5 сек (стандартное отклонение 1,6 сек) для годографов IASPEI-91 и (- 0,2) сек (стандартное отклонение 1,0 с) и (- 0,6) сек (стандартное отклонение 1,3 с) – при использовании поправок, рассчитанных с применением региональных годографов и трехмерных моделей, соответственно.

|    |            |                     | IASPEI-91                 |                                        |                               |                                            | Pe                       | гиональнь                              | е годогра                     | афы                                        | Трехмерные модели         |                                        |                               |                                            |
|----|------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Nº | Дата       | N<br>ст/фаз/<br>GAP | Ошибка<br>место<br>опр км | Площадь<br>эллипса,<br>км <sup>2</sup> | Ошибка<br>врем. в<br>очаге, с | Истинное<br>местопол.<br>внутри<br>эллипса | Ошибка<br>местоопр<br>км | Площадь<br>эллипса,<br>км <sup>2</sup> | Ошибка<br>врем. в<br>очаге, с | Истинное<br>местопол.<br>внутри<br>эллипса | Ошибка<br>место<br>опр км | Площадь<br>эллипса,<br>км <sup>2</sup> | Ошибка<br>врем. в<br>очаге, с | Истинное<br>местопол.<br>внутри<br>эллипса |
| 1  | 69/09/02   | 9/18/120            | 25.8                      | 641                                    | 4.2                           | нет                                        | 2.3                      | 475                                    | -0.4                          | да                                         | 12.6                      | 490                                    | -0.5                          | нет                                        |
| 2  | 69/09/08   | 9/23/121            | 33.3                      | 423                                    | 3.6                           | нет                                        | 7.4                      | 366                                    | -0.3                          | да                                         | 14.8                      | 375                                    | -0.5                          | нет                                        |
| 3  | 69/09/69   | 7/14/106            | 23.2                      | 798                                    | 2.7                           | нет                                        | 15.2                     | 459                                    | 0.1                           | да                                         | 17.8                      | 611                                    | 0.7                           | да                                         |
| 4  | 69/12/06   | 8/10/146            | 59.2                      | 632                                    | 1.2                           | нет                                        | 15.0                     | 425                                    | 1.3                           | да                                         | 25.3                      | 546                                    | -0.3                          | нет                                        |
| 5  | 70/12/23   | 8/12/82             | 8.9                       | 648                                    | 1.8                           | да                                         | 14.6                     | 435                                    | 0.0                           | нет                                        | 13.8                      | 471                                    | 0.6                           | нет                                        |
| 6  | 71/07/02   | 8/18/129            | 17.1                      | 784                                    | 4.9                           | нет                                        | 10.6                     | 432                                    | -0.4                          | да                                         | 15.1                      | 438                                    | -0.9                          | нет                                        |
| 7  | 71/07/10   | 11/15/104           | 10.8                      | 625                                    | 4.2                           | да                                         | 16.6                     | 429                                    | -1.3                          | нет                                        | 17.7                      | 447                                    | -1.7                          | нет                                        |
| 8  | 71/09/19   | 7/20/143            | 23.4                      | 377                                    | 1.6                           | нет                                        | 4.6                      | 330                                    | -0.6                          | да                                         | 7.9                       | 326                                    | -1.3                          | да                                         |
| 9  | 71/10/04   | 8/19/130            | 12.7                      | 430                                    | 3.5                           | нет                                        | 6.8                      | 343                                    | -0.7                          | да                                         | 3.7                       | 331                                    | -0.9                          | да                                         |
| 10 | 72/08/20   | 8/14/102            | 20.5                      | 922                                    | 2.9                           | нет                                        | 7.7                      | 482                                    | -0.2                          | да                                         | 6.3                       | 516                                    | 0.6                           | да                                         |
| 11 | 72/09/21   | 7/14/132            | 33.4                      | 928                                    | 2.4                           | нет                                        | 11.6                     | 539                                    | -0.4                          | да                                         | 7.4                       | 637                                    | 0.7                           | да                                         |
| 12 | 72/10/03   | 9/12/94             | 31.7                      | 778                                    | 3.5                           | нет                                        | 11.9                     | 471                                    | 0.6                           | да                                         | 22.1                      | 527                                    | 1.1                           | нет                                        |
| 13 | 72/11/24_1 | 7/15/141            | 16.9                      | 774                                    | 2.9                           | нет                                        | 3.4                      | 491                                    | -0.8                          | да                                         | 11.9                      | 516                                    | -0.6                          | нет                                        |
| 14 | 72/11/24_2 | 4/12/174            | 4.2                       | 1159                                   | 2.5                           | да                                         | 10.8                     | 743                                    | -1.8                          | да                                         | 8.8                       | 789                                    | -2.2                          | да                                         |
| 15 | 73/08/15   | 7/13/157            | 22.1                      | 1047                                   | 1.6                           | да                                         | 9.1                      | 543                                    | 0.3                           | да                                         | 11.2                      | 593                                    | 0.3                           | да                                         |
| 16 | 73/08/28   | 6/12/122            | 4.9                       | 1569                                   | 1.6                           | да                                         | 1.6                      | 418                                    | -0.3                          | да                                         | 6.8                       | 434                                    | -0.8                          | да                                         |
| 17 | 73/09/19   | 5/12/158            | 27.2                      | 1002                                   | 0.7                           | нет                                        | 10.8                     | 604                                    | -0.7                          | да                                         | 1.9                       | 743                                    | -1.5                          | да                                         |
| 18 | 74/08/14   | 5/8/224             | 44.4                      | 3940                                   | 3.3                           | нет                                        | 4.5                      | 2192                                   | 1.4                           | да                                         | 20.2                      | 2068                                   | -0.6                          | да                                         |
| 19 | 74/08/29   | 8/16/192            | 35.8                      | 1495                                   | 2.2                           | нет                                        | 12.4                     | 709                                    | 0.2                           | да                                         | 14.6                      | 784                                    | -0.7                          | нет                                        |
| 20 | 75/08/12   | 6/10/114            | 24.6                      | 957                                    | 3.1                           | нет                                        | 18.2                     | 430                                    | 0.2                           | нет                                        | 5.8                       | 535                                    | 0.5                           | да                                         |
| 21 | 75/09/29   | 6/13/177            | 48.9                      | 719                                    | 2.8                           | нет                                        | 11.1                     | 867                                    | -1.4                          | да                                         | 20.1                      | 879                                    | -1.0                          | да                                         |
| 22 | 76/05/11   | 7/19/109            | 17.3                      | 425                                    | 4.3                           | нет                                        | 4.5                      | 324                                    | 0.0                           | да                                         | 5.5                       | 357                                    | 0.1                           | да                                         |
| 23 | 77/07/26   | 6/13/210            | 62.3                      | 941                                    | 2.6                           | нет                                        | 12.5                     | 1265                                   | -1.0                          | да                                         | 21.5                      | 1192                                   | -0.5                          | нет                                        |
| 24 | 77/08/10   | 4/12/220            | 12.4                      | 1596                                   | 0.2                           | да                                         | 3.0                      | 896                                    | 0.7                           | да                                         | 32.1                      | 999                                    | 1.6                           | нет                                        |
| 25 | 77/08/20   | 7/18/120            | 1.5                       | 567                                    | 4.6                           | да                                         | 7.9                      | 434                                    | 0.1                           | да                                         | 14.6                      | 422                                    | 1.1                           | нет                                        |
| 26 | 77/09/10   | 5/16/156            | 66.6                      | 1181                                   | 1.9                           | нет                                        | 22.4                     | 707                                    | -0.8                          | да                                         | 39.6                      | 684                                    | -1.0                          | нет                                        |
| 27 | 77/09/30   | 6/12/206            | 35.7                      | 2603                                   | 1.6                           | да                                         | 6.6                      | 1179                                   | –1.6                          | да                                         | 18.8                      | 1196                                   | -1.9                          | да                                         |
| 28 | 78/08/09   | 6/16/99             | 19.7                      | 683                                    | 2.7                           | нет                                        | 11.9                     | 379                                    | 0.6                           | да                                         | 7.4                       | 400                                    | 0.4                           | да                                         |
| 29 | 78/08/24   | 8/19/97             | 31.8                      | 451                                    | 5.2                           | нет                                        | 12.6                     | 365                                    | 1.0                           | нет                                        | 21.7                      | 376                                    | 0.5                           | нет                                        |
| 30 | 78/09/21   | 7/18/118            | 53.4                      | 426                                    | 4.7                           | нет                                        | 11.2                     | 294                                    | 0.3                           | да                                         | 13.0                      | 304                                    | 0.5                           | да                                         |
| 31 | 78/10/17_1 | 8/17/105            | 23.9                      | 667                                    | 3.3                           | нет                                        | 5.8                      | 360                                    | -0.3                          | да                                         | 10.3                      | 403                                    | 0.1                           | да                                         |
| 32 | 78/10/17_2 | 6/17/117            | 23.7                      | 541                                    | 6.3                           | нет                                        | 6.2                      | 297                                    | 0.7                           | да                                         | 5.1                       | 441                                    | 0.3                           | да                                         |
| 33 | 79/08/12   | 8/16/94             | 34.4                      | 604                                    | 2.8                           | нет                                        | 15.1                     | 376                                    | 0.4                           | нет                                        | 24.4                      | 393                                    | 0.5                           | нет                                        |
| 34 | 79/09/06   | 8/15/92             | 2.1                       | 594                                    | 4.8                           | да                                         | 5.1                      | 432                                    | 0.3                           | да                                         | 11.7                      | 406                                    | 2.1                           | нет                                        |

Таблица 7. Результаты экспериментов по релокации калибровочных источников.

# РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА СТАНЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОЦЕНОК МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

|    |            |                     |                           | IASF                                   | PEI-91                        |                                            | Pe                       | гиональнь                              | е годогра                     | афы                                        |                           | Трехмерн                               | ые модел                      | пи                                         |
|----|------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Nº | Дата       | N<br>ст/фаз/<br>GAP | Ошибка<br>место<br>опр км | Площадь<br>эллипса,<br>км <sup>2</sup> | Ошибка<br>врем. в<br>очаге, с | Истинное<br>местопол.<br>внутри<br>эллипса | Ошибка<br>местоопр<br>км | Площадь<br>эллипса,<br>км <sup>2</sup> | Ошибка<br>врем. в<br>очаге, с | Истинное<br>местопол.<br>внутри<br>эллипса | Ошибка<br>место<br>опр км | Площадь<br>эллипса,<br>км <sup>2</sup> | Ошибка<br>врем. в<br>очаге, с | Истинное<br>местопол.<br>внутри<br>эллипса |
| 35 | 79/10/04   | 7/17/123            | 10.1                      | 580                                    | 3.8                           | да                                         | 4.6                      | 445                                    | 0.7                           | да                                         | 15.5                      | 461                                    | -0.8                          | нет                                        |
| 36 | 80/10/08   | 7/13/96             | 23.8                      | 939                                    | 4.5                           | нет                                        | 4.8                      | 447                                    | 1.2                           | да                                         | 6.5                       | 508                                    | 0.8                           | да                                         |
| 37 | 81/09/26_1 | 8/14/106            | 27.7                      | 894                                    | 3.0                           | нет                                        | 10.9                     | 455                                    | -0.4                          | да                                         | 11.9                      | 489                                    | -0.7                          | нет                                        |
| 38 | 82/10/16   | 8/14/107            | 28.6                      | 870                                    | 2.9                           | нет                                        | 4.1                      | 476                                    | 0.4                           | да                                         | 3.8                       | 515                                    | 0.3                           | да                                         |
| 39 | 83/07/10_1 | 7/16/132            | 24.0                      | 498                                    | 2.2                           | нет                                        | 7.4                      | 437                                    | -0.9                          | да                                         | 12.6                      | 515                                    | 1.2                           | да                                         |
| 40 | 83/09/24_1 | 7/14/137            | 20.8                      | 984                                    | 3.7                           | нет                                        | 6.7                      | 508                                    | 1.2                           | да                                         | 11.9                      | 556                                    | 1.1                           | да                                         |
| 41 | 84/07/21_1 | 9/18/80             | 12.2                      | 526                                    | 3.3                           | да                                         | 6.5                      | 339                                    | 0.1                           | да                                         | 6.4                       | 349                                    | 0.4                           | да                                         |
| 42 | 84/09/17   | 6/15/114            | 50.8                      | 935                                    | 2.6                           | нет                                        | 13.9                     | 478                                    | -0.4                          | да                                         | 18.7                      | 498                                    | -0.8                          | нет                                        |
| 43 | 85/07/18   | 8/17/104            | 26.9                      | 506                                    | 3.5                           | нет                                        | 14.9                     | 347                                    | -1.3                          | нет                                        | 19.6                      | 392                                    | -0.8                          | нет                                        |
| 44 | 88/08/22   | 7/17/98             | 25.8                      | 359                                    | 4.2                           | нет                                        | 12.7                     | 340                                    | 0.1                           | нет                                        | 5.2                       | 443                                    | 0.5                           | да                                         |
| 45 | 88/09/06   | 8/16/84             | 6.2                       | 378                                    | 4.6                           | да                                         | 13.4                     | 330                                    | 0.6                           | нет                                        | 18.1                      | 324                                    | 0.3                           | нет                                        |
| 46 | 64/11/16   | 5/13/120            | 18.7                      | 670                                    | 0.4                           | да                                         | 7.4                      | 537                                    | -1.3                          | да                                         | 6.1                       | 602                                    | -1.9                          | да                                         |
| 47 | 65/11/21   | 5/12/118            | 26.6                      | 746                                    | 0.6                           | нет                                        | 11.6                     | 576                                    | -0.7                          | да                                         | 11.3                      | 592                                    | -2.1                          | да                                         |
| 48 | 66/03/20   | 5/12/167            | 35.4                      | 627                                    | 2.2                           | нет                                        | 18.3                     | 517                                    | 0.6                           | нет                                        | 9.2                       | 636                                    | -1.5                          | да                                         |
| 49 | 66/06/29   | 6/16/115            | 12.8                      | 657                                    | 0.9                           | да                                         | 6.4                      | 399                                    | -0.7                          | да                                         | 20.7                      | 529                                    | -1.4                          | нет                                        |
| 50 | 66/10/19   | 6/13/119            | 9.5                       | 632                                    | 0.0                           | да                                         | 4.2                      | 500                                    | -0.8                          | да                                         | 7.6                       | 508                                    | -1.5                          | да                                         |
| 51 | 67/02/26   | 7/13/121            | 5.5                       | 585                                    | 1.9                           | да                                         | 10.3                     | 469                                    | 0.8                           | да                                         | 5.3                       | 496                                    | -0.7                          | да                                         |
| 52 | 67/10/17   | 6/13/117            | 11.3                      | 642                                    | 0.4                           | да                                         | 5.1                      | 503                                    | -1.1                          | да                                         | 16.1                      | 527                                    | -1.6                          | нет                                        |
| 53 | 68/06/19   | 6/18/116            | 3.5                       | 440                                    | 1.0                           | да                                         | 6.5                      | 325                                    | -1.1                          | да                                         | 6.9                       | 332                                    | -1.5                          | да                                         |
| 54 | 68/09/29   | 7/14/118            | 5.7                       | 555                                    | 1.9                           | да                                         | 10.1                     | 440                                    | 0.9                           | да                                         | 5.1                       | 493                                    | -0.2                          | да                                         |
| 55 | 69/03/07   | 5/11/157            | 106.6                     | 903                                    | -1.1                          | нет                                        | 28.1                     | 573                                    | -1.1                          | нет                                        | 40.2                      | 646                                    | -3.5                          | нет                                        |
| 56 | 69/11/30   | 4/13/121            | 22.8                      | 930                                    | 0.8                           | да                                         | 6.1                      | 508                                    | -1.5                          | да                                         | 7.8                       | 510                                    | -2.5                          | да                                         |
| 57 | 70/01/29   | 5/12/233            | 3.9                       | 1554                                   | 1.1                           | да                                         | 9.8                      | 999                                    | -0.4                          | да                                         | 9.9                       | 1042                                   | -1.6                          | да                                         |
| 58 | 70/06/28   | 5/13/126            | 16.7                      | 667                                    | 2.2                           | нет                                        | 5.6                      | 506                                    | -0.5                          | да                                         | 5.7                       | 494                                    | -1.3                          | да                                         |
| 59 | 71/04/25   | 7/17/114            | 10.6                      | 406                                    | 2.5                           | да                                         | 8.7                      | 315                                    | 0.6                           | да                                         | 3.5                       | 325                                    | -0.8                          | да                                         |
| 60 | 71/06/30   | 6/18/117            | 22.7                      | 443                                    | 1.1                           | нет                                        | 6.4                      | 340                                    | -1.3                          | да                                         | 17.1                      | 335                                    | -1.7                          | нет                                        |
| 61 | 71/12/30   | 6/16/113            | 11.5                      | 558                                    | 1.6                           | да                                         | 3.7                      | 383                                    | -0.5                          | да                                         | 4.2                       | 391                                    | -1.8                          | да                                         |
| 62 | 72/02/10   | 4/13/117            | 13.1                      | 916                                    | 1.1                           | да                                         | 5.6                      | 478                                    | -1.2                          | да                                         | 9.0                       | 481                                    | -2.2                          | да                                         |
| 63 | 72/06/07   | 3/9/233             | 38.1                      | 2884                                   | -2.2                          | да                                         | 17.6                     | 1447                                   | -3.3                          | да                                         | 21.5                      | 1495                                   | -5.0                          | да                                         |
| 64 | 72/11/02   | 5/15/117            | 19.6                      | 765                                    | 2.0                           | да                                         | 0.2                      | 439                                    | -0.5                          | да                                         | 4.2                       | 455                                    | -1.2                          | да                                         |
| 65 | 72/12/10_1 | 4/9/122             | 10.6                      | 1102                                   | 0.7                           | да                                         | 10.8                     | 668                                    | -1.2                          | да                                         | 16.4                      | 652                                    | -2.0                          | нет                                        |
| Ср | еднее      |                     | 24.2                      | 863                                    | 2.5                           | 42%                                        | 9.4                      | 539                                    | -0.2                          | 84%                                        | 13.2                      | 573                                    | -0.6                          | 60%                                        |
| СК | СКО        |                     | 18.3                      | 600                                    | 1.6                           |                                            | 5.2                      | 306                                    | 1.0                           | 0 + 70                                     | 8.1                       | 296                                    | 1.3                           | 0070                                       |

## Выводы

1. Построены региональные годографы для различных геолого-тектонических провинций Северной Евразии. Проведено их сопоставление с годографами IASPEI-91. Установлено, что полученные региональные годографы существенно отличаются от годографов IASPEI-91 в платформенных областях, палеозойских массивах и на молодых плитах. Показано, что для исследовательских целей по сейсмической калибровке все многообразие геолого-тектонических провинций Северной Евразии может быть представлено тремя генерализованными провинциями для Pn/Sn- волн, двумя провинциями для Pg- волн и одной провинцией для Lg- волн.

2. Эксперименты по проверке достоверности полученных результатов на выборке из 65 ПЯВ

координат эпицентров ПЯВ существенно улучшаются, а эллипсы ошибок значительно уменьшаются при использовании построенных региональных годографов. 3. Построенные региональные годографы явля-

показали, что оценка времени в очаге и оценка

5. Построенные региональные годографы являются эффективным средством для местоопределения сейсмических источников на территории Северной Евразии, несмотря на факт их одномерности.

Работа выполнена в рамках контракта № 00/20/5020 между Подготовительной Комиссии ОДВЗЯИ и Федеральным государственным унитарным предприятием Научно-исследовательский институт импульсной техники (ФГУП НИИИТ).

# Литература

- Кириченко В.В., Краев Ю.А. Использование подземных ядерных взрывов, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне, для сейсмической калибровки центральной части Северной Евразии. //Геофизические проблемы нераспространения/Вестник НЯЦ РК, 2001. - вып.2.- С. 69–76.
- Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Краев Ю.А. Использование региональных годографов сейсмических волн для улучшения оценок местоположения калибровочных взрывов в Казахстане//Геофизические проблемы нераспространения /Вестник НЯЦ РК, 2001. - вып.2.- С. 77–79.
- O. Starovoit, I. Gabsatarova, Y. Kraev. Regional travel time curves at East European Platform for improvement location of the seismic events//Presented at the informal meeting IDC Technical Experts Group on Seismic Event Location Calibration - Oslo, Norway, 20 – 24 March 2000.

- O. Starovoit, I.Gabsatarova, Y.Kraev. Selection of Reference Events in Northern Caucasus for calibration IMS stations//Presented at the Third Location Workshop/IDC Technical Experts Group on Seismic Event Location Calibration - Oslo, Norway, 23–27 April 2001.
- I.P. Gabsatarova O.Ve. Starovoit, Yu.A. Kraev. V.V. Kirichenko Selection of Candidate Reference Events in Northern Caucasus Region//Presented at the Forth Workshop on IMS Location Calibration. - Oslo, Norway, 22–26 April 2002.
- Starovoit O.E., Gabsatarova I.P, Kraev Yu.A., Mamsurov M.S., Babkina V.F, Kosarev G.L.Application of 1–D and 3–D Crust and Upper Mantle Velocity Model of western and central parts of Northern Eurasia and comparison results of relocation GT events//The Fifth Workshop on IMS Location Calibration. - Oslo, Norway, 4–9 May, 2003.
- V.V. Kovalenko, M. S. Mamsurov, I.P. Gabsatarova, O. Ye. Starovoit Experience of Kinematic Calibration of the IMS Seismic Stations in Western and Central Parts of the Northern Eurasia//The Fifth Workshop on IMS Location Calibration. - Oslo, Norway, 4–9 May, 2003.
- 8. B. Kennett (editor). IASPEI 1991 Seismological Tables, Research School of Earth Sciences. Australian National University, 1991.
- 9. Бочаров В.С., Зеленцов С.А., Михайлов В.Н. Характеристики 96 подземных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне//Атомная энергия, 1989. т.67, вып. 3. С. 210–214.
- 10. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии//под редакцией А.Ф. Грачева. М.: изд. «ПРОБЕЛ», 2000.
- 11. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. вып. 2–3.
- D.L.Springer, R.L.Kinnaman Seismic Source Summary for U.S. Underground Nuclear Explosions, 1961–1970. //Bull. Seism. Soc. Am., 1971 - V.61. - P. 1073–1098.
- D.L Springer, R.L.Kinnaman Seismic Source Summary for U.S. Underground Nuclear Explosions, 1971–1973//Bull. Seism. Soc. Am., 1975. - V.65. - P. 343–349.
- D.D. Sultanov, J.R. Murphy, Kh.D. Rubinstein A Seismic Source Summary for Soviet Peaceful Nuclear Explosions. 1999//Bull. Seism. Soc. Am., 1999. - V.89. - P. 640–647.
- 15. Xioping Yang, Keith McLaughlin, Robert North. SSSCs for Regional Phases at IMS Stations in North America and Fennoscandia//Technical Report CMR-98/46.
- Firbas P. Location Calibration Based on 3–D Modeling//Advances in Seismic Event Location, 2000, Kluwer Academic Publishers. – P.135–161.

# КӨЗДЕР ОРНАЛАСҚАН ЖЕРЛЕРІН БАҒАЛАУЫН ЖАҚСАРТУ ҮШІН ХАЛЫҚАРАЛЫК МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕСІНІҢ СТАНЦИЯЛАРЫН АУМАҚТЫҚ СЕЙСМИКАЛЫҚ КАЛИБРЛЕУ

## Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Краев Ю.А.

# РҒА Геофизикалық қызметі, Обнинск, Ресей

Мақалада Халықаралық мониторинг жүйесінің (ХМЖ) станциялары сейсмикалық көздерін бағалауын жақсартуға бағытталған РҒА Геофизикалық қызметі «Халықаралық мониторнг жүйесінің Солтүстік Еуразиядағы сейсмикалық станцияларының кинематикалық калибрлеуі» жобасының шегінде өткізген зерттеулерінің кейбір нәтижелері келтірілген.

# REGIONAL SEISMIC CALIBRATION OF INTERNATIONAL MONITORING STATIONS FOR BETTER ASSESSMENTS OF SOURCE LOCATIONS

# O.E. Starovoit, I.P. Gabsatarova, Yu.A. Krayev

## Geophysical Survey RAS, Obninsk, Russia

This paper presents some investigative results of Geophysical Survey Russian Academy of Sciences conducted within the framework of "Kinematical calibration of seismic stations being part of International system of monitoring in the Northern Eurasia" for improving localization accuracy for the sources of stations of International Monitoring System (IMS).

# НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ КАК СЛЕДСТВИЕ НАЛИЧИЯ В НЕЙ ПОЛОСТЕЙ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

#### Мурзадилов Т.Д., Логвинов О.В., Гринштейн Ю.А., Жолдыбаев А.К.

# Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Разработаны алгоритм и программа расчета напряженного состояния геологической среды, включающей полости ядерных взрывов. На примере участка Балапан Семипалатинского испытательного полигона и объекта Лира в Западном Казахстане показано, что к местам с наибольшей плотностью взрывов приурочены общирные зоны трещиноватости, которые могут служить коллекторами подземных вод и радиоактивных продуктов взрыва.

При проведении подземных камуфлетных взрывов в геологической среде образуются ядерные полости, окаймленные зонами интенсивной трещиноватости. B настоящее время полости, образовавшиеся в результате проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ), находятся в механическом квазиравновесии с вмещающими их горными породами за счет созданного избыточного напряжения. Практический интерес представляют не столько абсолютные значения механических напряжений, сколько отклонения этих напряжений от ранее существовавших нагрузок. Эти отклонения характеризуют степень нарушения первичного равновесия и возможность возникновения деструктивных процессов в геологической среде.

Реальное распределение напряжения может быть получено на основе натурных измерений в естественных условиях. Однако этот способ требует существенных материальных затрат. Более приемлемым может быть теоретический прогноз динамики и статики интегрального напряженного состояния земпервую ных недр, В очередь, физикоматематический. Методам расчета горного давления в геологических структурах посвящено достаточно много работ как общих, так и специальных. Однако они неприменимы при использовании ограниченного объема данных по физическим свойствам пород, как это имеет место при изучении мест проведения ПЯВ. Поэтому здесь разработан специальный алгоритм и программа для расчета напряжений в геологической среде при использовании ограниченных исходных данных.

Методика расчетов напряженного состояния геологической среды изучаемого объекта, базировалась на следующих допущениях:

 постядерновзрывное механическое состояние геологической среды с ядерными полостями квазистатично, т.е. релаксационные процессы в ней протекают достаточно медленно;

- квазистатичное состояние отлично от равновесия, сформированного до образования ядерных полостей (первоначального состояния);
- переход в исходное состояние происходит скачком (при достижении критических напряжений и деформаций), или плавно механизмом вязкого течения (по прошествии относительно длительного времени);
- напряженное поствзрывное состояние среды определяется линейными размерами полостей, тектонической обстановкой и механическими характеристиками вмещающих пород;
- квазистатичное напряженное состояние среды можно формально описать в рамках теории упругости.

Стратегия расчетов строилась на решении задачи раздельно для каждой полости, а затем для совокупности полостей (на основе анализа силового взаимодействия между полостями). При этом рассчитывались избыточные значения упругодеформационных характеристик (напряжения, деформации, свободной энергии и др.), т.е., значений каждого из параметров за вычетом их значений, обусловленных литостатическим давлением. При этом рассматривались следующие вопросы:

1. Оценка линейных размеров зоны интенсивного дробления горных пород в окрестности единичных камуфлетных ядерных взрывов с целью задания на их границах граничных условий в задаче теории упругости.

2. Оценка упругих деформаций, вызванных наличием единичной ядерной полости в геологической среде.

3. Оценка упругих деформаций от многих полостей.

4. Оценка времен релаксаций напряженного состояния геологической среды.

Ниже приводится формальная основа избранной стратегии и результаты расчетов для двух мест проведения ПЯВ - объекта Лира и площадки Балапан (Семипалатинский испытательный полигон)

# К ОЦЕНКЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ИНТЕНСИВНОГО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ЕДИНИЧНОГО КАМУФЛЕТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

При расчетах напряженного состояния горных пород в рамках теории упругости целесообразно использование моделей сплошных сред. Однако ядерные полости имеют в своей окрестности некоторые симметричные, пространственно ограниченные, зоны дроблено-трещиноватых пород. Поэтому, с целью исключения этих зон из теоретического рассмотрения, необходима оценка их размеров и, впоследствии, задание граничных условий именно на этих границах. Для этого использована теория сильного взрыва Седова – Неймана [1]. Обоснованность применения данной теории определяется тем, что на начальных стадиях развития взрывного процесса плотность энергии в ударной волне столь велика, по сравнению с энергией межфазовых границ минеральных образований, слагающих горные породы, что последние ведут себя подобно жидкостям, а фронт волны имеет практически сферическую симметрию.

Не останавливаясь подробно на самом выводе, приведем окончательный результат. Давление за фронтом ударной волны, распространяющейся в горных породах, описывается уравнением:

$$P(r) = 1.522 E_{_{B}} / R_{_{3}}^{3} \Big[ 0.718 \big( r / R \big)^{4} + 0.1 \Big]$$
(1)

где,  $E_{B}$ , Дж – энергия взрыва; R, м – положение ударной волны относительно эпицентра взрыва;  $r \le R$  – расстояние от эпицентра в котором P =P(r), н/м<sup>2</sup>.

Для определения границы зоны интенсивного дробления были использованы эмпирические данные, полученные при мониторинге взрыва «Рейниер» (США) [2]. При прямой проходке разведочными штольнями в область эпицентра взрыва было установлено, что горные породы были раздроблены ударной волной на уровне давления вдвое превышавшим прочность пород на сжатие в условиях естественного залегания. Из данного факта и уравнения (1) следует уравнение для определения границ зоны интенсивного дробления:

$$2[\sigma_{cw}] = 1.245 E_{e} / R_{3}^{3}$$
 (2)

$$\mathbf{R}_{3} = \left[ 0.622 E_{e} / \left[ \sigma_{cx} \right] \right]^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

где,  $[\sigma_{c*}]$ ,  $H/M^2$  – предел прочности на сжатие в естественных условиях залегания пород;  $E_{a}$ , Д\* – энергия взрыва;  $R_3$ , м – линейный размер границы зоны интенсивного дробления горных пород.

Определение (3) и было использовано для дальнейших расчетов как эффективный расчетный радиус ядерной полости.

# К ОЦЕНКЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ВЫЗВАННЫХ НАЛИЧИЕМ ЕДИНИЧНОЙ ЯДЕРНОЙ ПОЛОСТИ

Рассмотрим некоторую неоднородную структурированную (в механическом смысле) геологическую среду, ограниченную сверху плоской дневной поверхностью  $S_{дн}$ , в которой на глубине  $Z_0$  имеется сферическая область радиуса  $R_3$ .

Введем систему координат ОХҮZ, такую, что плоскость ОХҮ совпадет с дневной поверхностью, а ось Z направлена вертикально вниз. Тогда уравнения отмеченных поверхностей будут иметь вид:

$$Z = 0$$
, если X, Y,Z э  $S_{dH}$  (4)

$$\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^2 + (\mathbf{y} - \mathbf{y}_0)^2 + (\mathbf{z} - \mathbf{z}_0)^2 = R_3^2}{ecnu},$$
(5)

где,  $x_{0,}\;y_{0,}\;z_{0}-$  координаты центра сферической полости;  $S_{_{\rm ZH}}-$  дневная поверхность (плоскость);  $S_{c\varphi}-$  поверхность сферы.

Пусть известны распределения механических свойств горных пород среды – модуля Юнга Е и коэффициента Пуассона v (в общем случае, произвольное). Тогда, с учетом вышеотмеченных допущений, можно сформулировать следующую задачу теорию упругости: определить поле деформации и напряжений в геологической среде с заданными распределениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона, вызванных наличием в ней единичной пустотной области радиуса R<sub>3</sub>, если напряжения описываются системой уравнений вида [3]:

$$\partial \sigma'_{xx} / \partial x + \partial \sigma'_{xy} / \partial y + \partial \sigma'_{xz} / \partial z = 0$$
(6)

$$\partial \sigma'_{yx} / \partial x + \partial \sigma'_{yy} / \partial y + \partial \sigma'_{yz} / \partial z = 0$$
 (7)

$$\partial \sigma'_{zx} / \partial x + \partial \sigma'_{zy} / \partial y + \partial \sigma'_{zz} / \partial z = -\rho g$$
 (8)

где,  $\sigma'_{ik} = \sigma'_{ki}(x, y, z)$  – компоненты тензора напряжений;  $\rho(x, y, z)$  – плотность геологической сре-

ĉ

пряжении, p(x,y,z) – плотность теологической среды, g – напряженность гравитационного поля (ускорение свободного падения).

База исходных данных по двум исследуемым участкам не позволила получить детальные закономерности распределения  $\rho(x,y,z)$ , хотя их анализ показал, что относительные вариации  $\rho$  не велики, поэтому в дальнейшем принято  $\rho = \text{Const} = \rho_{cp}$ , где  $\rho_{cp}$  – среднее значение по участку, определенное для типов пород, слагающих рассматриваемую геологическую среду.

Задача (6) – (8) должна быть дополнена граничными условиями

$$\sigma_{n} = 0$$
, если х, у, z э  $S_{дH}$ ,  $S_{c\phi}$  (9)

где  $\sigma_n$  – нормальная составляющая напряжений на границах среды.

Решение (6) – (9) искалось в виде:

$$\sigma'_{ik} = \sigma_{ik} + \sigma_{ik}$$
(10)

где:  $\sigma_{ik}^{"}$  – решение неоднородной задачи (6) – (8) в отсутствии области R  $\leq$  R<sub>3</sub>;  $\sigma_{ik}$  – решение однород-

ной задачи:

$$\partial \sigma_{xx} / \partial x + \partial \sigma_{xy} / \partial y + \partial \sigma_{xz} / \partial z = 0$$
 (11)

$$\partial \sigma_{yx} / \partial x + \partial \sigma_{yy} / \partial y + \partial \sigma_{yz} / \partial z = 0$$
 (12)

$$\partial \sigma_{zx} / \partial x + \partial \sigma_{zy} / \partial y + \partial \sigma_{zz} / \partial z = 0$$
(13)

$$\sigma_n = 0, ecnu \quad x, y, z \in S_{dH}$$
 (14)

$$\sigma_{xx}Cos\Theta + \sigma_{xy}Cos\Theta_2 + \sigma_{xz}Cos\Theta_3 = k\rho g Z_0 Cos\Theta_1 \quad (15)$$

$$\sigma_{yx}Cos\Theta_1 + \sigma_{yy}Cos\Theta_2 + \sigma_{yz}Cos\Theta_3 = k\rho g Z_0 Cos\Theta_2$$
(16)

$$\sigma_{zx}Cos\Theta_1 + \sigma_{zy}Cos\Theta_2 + \sigma_{zz}Cos\Theta_3 = k\rho g Z_0 Cos\Theta_3$$
(17)

Здесь:  $Z_0$  – координата центра полости; { $Cos\Theta_1$ ,  $Cos\Theta_2$ ,  $Cos\Theta_3$ } – вектор нормальный поверхности  $S_{c\varphi}$ ; k – коэффициент «ослабления» литостатического давления на границе зоны интенсивного дробления  $R = R_3$ .

Из физических соображений следует, что  $\sigma_{ik}$  являются напряжениями возмущения от полостей на фоне невозмущенных напряжений  $\sigma''_{ik}$ , связанных с естественными деформациями первоначальной среды в поле тяжести. При этом задача (11) – (17) эквивалентна задаче о полости радиуса  $R_{3}$ , нагруженной изнутри давлением  $P = k\rho g Z_0$  и находящейся в полупространстве  $Z \ge 0$ .

Значение коэффициента k можно оценить из следующих соображений. Напряжение в геологической среде в целом изменяется по закону R<sup>-3</sup> [3]. Следовательно, при отсутствии полости в ее центре давление имеет значение  $P_0 = \rho g Z_0$ , тогда как на границе области R = R<sub>3</sub> оно должно составить величину

$$P = (R_1 / R_3)^3 P_0 = (R_1 / R_3)^3 \cdot \rho g Z_0 =$$
  
= (R\_1 / R\_3)^3 P\_0 = k P\_0 (17\*)

где  $R_1$  – радиус некоторой эффективной «точечной» полости с равномерным распределением литостатического давления на ее поверхности. В данном случае принято  $R_1 \approx 0.1$  м.

В [4] показано, что подобные задачи относительно просто (методически и численно) решаются методами вариационного исчисления – в частности, путем сведения к алгебраическим уравнениям Ритца, получаемым при минимизации функционала:

$$L = \int_{V} \varphi(\mathbf{U}) dv - \int_{V} (\mathbf{f}\mathbf{U}) dv - \int_{S} (\mathbf{P}\mathbf{U}) ds \Rightarrow \min \qquad (18)$$

где  $\varphi(\mathbf{U})$  – функция тензора деформации и механических свойств среды, имеющая физический смысл плотности свободной энергии,  $\mathbf{U}$  – вектор смещения,  $\mathbf{f}$  – объемные силы, действующие на систему,  $\mathbf{P}$  – силы (давления) на границах среды.

Применительно к решаемой задаче,

$$\mathbf{f} = 0 \tag{19}$$

$$\begin{cases} \{ kP_0 \ Cos\Theta_1, kP_0Cos\Theta_2, kP_0Cos\Theta_3 \} ecnu \ x, y, z \ni S_{c\phi} (20) \\ P = 0 ecnu \ x, y, z \ni S_{\partial u} (21) \end{cases}$$

$$2\varphi = A(U_{xx}^{2} + U_{yy}^{2} + U_{zz}^{2}) +$$
  
+2B(U\_{xx}U\_{yy} + U\_{xx}U\_{zz} + U\_{yy}U\_{zz}) + (22)  
+C(U^{2} + U^{2} + U^{2})

$$A = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$
 (23)

$$B = \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{24}$$

$$C = \frac{E}{1+\nu} \tag{25}$$

$$\left(U_{zz} = \partial U_{z} / \partial z \right) \tag{28}$$

$$U_{xy} = 1/2 \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right)$$
(29)

$$\left[U_{xz} = 1/2 \left(\partial U_x / \partial z + \partial U_z / \partial x\right)\right]$$
(30)

$$\int U_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right)$$
(31)

Здесь  $P_0 = \rho g Z_0$  литостатическое давление; Е – модуль Юнга; v – коэффициент Пуассона.

Как уже отмечалось, в случае произвольных распределений коэффициентов А, В и С, отыскание минимума функционала (18) целесообразно вести методом Ритца на классе некоторых базовых функций. Поскольку в прикладных сложных задачах приходится считаться с ограничением вычислительных возможностей, количество последних должно быть таким, чтобы удовлетворить необходимой погрешности оценки вычисляемых параметров (деформации, напряжения). Применительно к данной задаче, при выборке количества базисных функций, прежде всего, учитывалась симметрия поля распределения коэффициентов А, В и С. Оказалось, что необходимое приближение можно получить, ограничившись десятью гармоническими функциями, обеспечивающими приближение второго порядка. Кроме того, условия (18), (15) и (16) требуют выполнения условий:

$$\begin{cases} \int_{V} U \, dv = 0 \\ \int_{v} [R \times U] \, dv = 0 \end{cases}$$
(32)

$$\begin{cases} \int_{v}^{v} f dv + \int_{s}^{v} p ds = 0\\ \int_{v}^{v} [R \times f] dv + \int_{v}^{v} [R \times P] ds = 0 \end{cases}$$
(33)

где R - радиус вектор точек системы; U– смещения точек системы; f = 0 – объемные силы; P – эквивалентное давление на поверхность полости; U– базисные функции.

Физическая интерпретация условий заключается в требовании покоя центра масс системы, отсутствия углового поворота системы как целого, равновесия внешних действующих сил.

В [3] приведен пример решения задачи о полости в неограниченной однородной среде. Показано, что решением такой задачи является гармоническая функция, убывающая с расстоянием для смещения |U| как 1/  $\mathbb{R}^2$ . Следовательно, было бы логичным выбрать в качестве базисных функций асимметричный набор гармонических функций, учитывающих симметрию рассматриваемой геологической среды. Поэтому для второго порядка приближения был выбран следующий базис  $U_{\delta}$ :

$$\begin{cases} U_{\delta 1} = \Delta x / R^{3}; & U_{\delta 2} = \Delta y / R^{3}; \\ U_{\delta 3} = (\Delta z + \Delta z_{1}) / R^{3}; & U_{\delta 4} = (\Delta z + \Delta z_{1}) / R^{3}; \\ U_{\delta 5} = \Delta x \Delta z / R^{3}; & U_{\delta 6} = \Delta y \Delta z / R^{4}; \\ U_{\delta 7} = (\Delta x^{2} - \Delta y^{2}) / R^{4}; & U_{\delta 8} = (\Delta x^{2} - \Delta z^{2}) / R^{4}; \\ U_{\delta 9} = (\Delta x^{2} + \Delta x_{1}^{2}) / R^{4}; & U_{\delta 10} = (\Delta y^{2} + \Delta y_{1}^{2}) / R^{4} \end{cases}$$
(34)

где все U<sub>δ</sub> удовлетворяют условиям (32), (33).

$$\Delta x_{1} = \Delta x = x - x_{0}; \qquad \Delta y_{1} = \Delta y = y - y_{0}; \Delta z_{1} = \Delta z = z - z_{0}; \qquad \mathbf{R}_{1} = \mathbf{R}^{2} = \Delta x^{2} + \Delta y^{2} + \Delta z^{2}$$
(36)

$$\Delta z_{1\zeta} = \Delta z_1 = 2z_0 / [6(z_0 / R_3) - 1]$$
(37)

$$\Delta z_{2\zeta}^2 = \Delta z_2^2 = z_0^2 [3 - 8(z_0/R_3)^3 / [8(z_0/R_3)^3 - 1]$$
(38)

$$\Delta x_{1\zeta}^2 = \Delta y_{2\zeta}^2 = \Delta x_2^2 = \Delta y_1^2 = = 0.25 \cdot z_0^2 [6 - 32(z_0/R_3)^3] / [8(z_0/R_3)^3 - 1]$$
(39)

Приближенное решение задачи для всех  $\sigma_{ik}$  может быть найдено в виде:

$$U_{x} = \sum_{j=1}^{10} U_{\delta j} a_{j}$$

$$U_{y} = \sum_{j=1}^{10} U_{\delta j} a_{j+10} , \qquad (40)$$

$$U_{z} = \sum_{j=1}^{10} U_{\delta j} a_{j+20}$$

где U={ $U_x, U_y, U_z$ } – вектор смещения, определяющий тензоры U<sub>ik</sub> и  $\sigma_{ik}$ ; а<sub>j</sub> – коэффициенты, удовлетворяющие условию минимума функционала L.

Тензор σ<sub>ik</sub> связан со смещениями следующими соотношениями согласно (26) – (31):

$$\sigma_{xx} = AU_{xx} + B(U_{yy} + U_{zz})$$
(41)

$$\sigma_{yy} = AU_{yy} + B(U_{xx} + U_{zz})$$
(42)

$$\sigma_{zz} = AU_{zz} + B(U_{xx} + U_{yy})$$
(43)

$$\sigma_{xy} = CU_{xy} \tag{44}$$

$$\sigma_{xz} = CU_{xz} \tag{45}$$

$$\sigma_{\rm vz} = CU_{\rm vz}$$
 (46)

Плотность свободной энергии определяется функцией:

$$2\varphi = \sigma_{xx} U_{xx} + \sigma_{yy} U_{yy} + \sigma_{zz} U_{zz} + \sigma_{xy} U_{xy} + \sigma_{xz} U_{xz} + \sigma_{yz} U_{yz}$$

$$(47)$$

Подставляя (38) – (40) в (26) – (31), а затем в (41) – (47) и (18), получаем условие минимальности функционала (18):

$$\partial L/\partial a_{j} = 0$$
 (48)

После несложных, но громоздких вычислений можно показать, что система (48) является системой линейных уравнений относительно коэффициентов а<sub>i</sub>

$$\sum \omega_{ij} a_j = b_j, \qquad (49)$$

где

$$\omega_{ij} = \int_{V_0} g_{ij} dv \tag{50}$$

$$\mathbf{g}_{ij} = \begin{bmatrix} A(d_{1i}d_{1j} + d_{2i}d_{2j} + d_{3i}d_{3j}) + \\ +B(d_{2i}d_{1j} + d_{1i}d_{2j} + d_{3i}d_{1j} + \\ +d_{1i}d_{3j} + d_{3i}d_{2j} + d_{2i}d_{3j}) + \\ +C(d_{4i}d_{4j} + d_{5i}d_{5j} + d_{6i}d_{6j}) \end{bmatrix}$$
(51)

$$d_{1.1} = \frac{1}{R_e^3} - \frac{3\Delta x_e}{R_e^5}$$
(52)

$$d_{1,2} = -\frac{3\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^5}$$
(53)

$$\begin{cases} d_{1.3} = -\frac{1}{R_e^5} (3\Delta x_e \Delta z_e + 3\Delta x_e \Delta z_{1\xi}) \\ (\Delta y_e - 4\Delta x^2 \Delta y_e) \end{cases}$$
(54)

$$d_{1.4} = \left(\frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^6}\right)$$
(55)

$$\left[ d_{1.5} = \left( \frac{\Delta z_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e \Delta z_e}{R_e^6} \right)$$
(56)

 $\mathbf{d}_{1.11} = \mathbf{d}_{1.12} = \dots \mathbf{d}_{1.27} = \mathbf{0} \tag{62}$ 

$$\begin{pmatrix}
d_{2.1} = \frac{8}{3} \left( \frac{\Delta z_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right) \\
d_{2.1} = d_{2.1} = d_{2.1} = 0
\end{cases}$$
(63)

$$d_{2.2} = \frac{d_{2.3}}{d_{2.5}} = \frac{\Delta z_e}{p^4} - \frac{4\Delta y_e^2 \Delta z_e}{p^6}$$
(64)

$$\begin{cases} n_e & n_e \\ d_{2.6} = d_{2.7} = \dots d_{2.10} = 0 \\ 3\Delta x \Delta y \end{cases}$$
(66)

$$d_{2.11} = -\frac{5\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^5}$$
(67)

$$d_{2.12} = \frac{1}{R_e^3} - \frac{3\Delta y_e}{R_e^5} - \frac{8}{3} \frac{\Delta z_e}{R_e^4} + \frac{32\Delta z_e \Delta y_e}{3R_e^6}$$
(68)  
$$d_{2.13} = -\frac{3\Delta y_e \Delta z_e + 3\Delta y_e \Delta z_{1\varsigma}}{R^5}$$
(69)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_{3,1} = \mathbf{d}_{3,2} = \dots \mathbf{d}_{3,19} = \mathbf{0} \\ 22 \mathbf{A} \mathbf{u}_{1} \mathbf{A} \mathbf{z}^{2} = \mathbf{8} \mathbf{A} \mathbf{u}_{2} - 2 \mathbf{A} \mathbf{u}_{1} \mathbf{A} \mathbf{z} \end{bmatrix}$$
(77)

$$d_{3.20} = \frac{32\Delta x_e \Delta z_e^2}{3R_e^6} - \frac{8}{3} \frac{\Delta x_e}{R_e^4} + \frac{3\Delta x_e \Delta z_e}{R_e^5}$$
(78)

$$\begin{cases} d_{3,21} = \frac{32\Delta y_e \Delta z_e^2}{3R_e^6} - \frac{8}{3} \frac{\Delta y_e}{R_e^4} + \frac{3\Delta y_e \Delta z_e}{R_e^5} \end{cases}$$
(79)

$$d_{3,22} = \frac{1}{R_e^3} - \frac{3\Delta z_e^2}{R_e^5} - \frac{3\Delta z_{1\varsigma}\Delta z_e}{R_e^5}$$
(80)  
$$d_{3,23} = -\frac{4\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{R_e^5}$$
(81)

$$\begin{cases}
d_{1.6} = -\frac{4\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{R_e^6}
\end{cases}$$
(57)

$$d_{1.7} = \left(\frac{2\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^3}{R_e^6} + \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y^2}{R_e^6}\right)$$
(58)

$$\begin{cases} d_{1.8} = \left(\frac{2\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^3}{R_e^6} - \frac{4\Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6}\right) \tag{59}$$

$$d_{1.9} = -\left(\frac{4\Delta x_e \Delta y_e^2}{R_e^6} + \frac{4\Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6}\right)$$
(60)

$$d_{1.10} = -\left(\frac{4\Delta z_e^2 \Delta x_e}{R_e^6} + \frac{4\Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6}\right)$$
(61)

$$d_{2.14} = \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^2 \Delta x_e}{R_e^6}$$
(70)

$$d_{2.15} = -\frac{4\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{R_e^6}$$
(71)

$$d_{2.16} = \frac{4\Delta y_e^3}{R_e^6} - \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} + \frac{2\Delta y_e}{R_e^4}$$
(72)

$$\left\{ d_{2.17} = -\left( \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} + \frac{4\Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(73)

$$d_{2.18} = \frac{2\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^3}{R_e^6} + \frac{4\Delta y_{l\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^4}$$
(74)

$$d_{2.19} = -\left(\frac{4\Delta z_{e}^{2}\Delta y_{e}}{R_{e}^{6}} + \frac{4\Delta z_{2\varsigma}^{2}\Delta y_{e}}{R_{e}^{6}}\right)$$
(75)

$$\mathbf{d}_{2.20} = \mathbf{d}_{2.21} = \dots \mathbf{d}_{2.27} = \mathbf{0} \tag{76}$$

$$d_{3.24} = -4 \frac{\Delta x_e^2 \Delta z_e - \Delta y_e^2 \Delta z_e}{R_e^6}$$
(82)

$$\int d_{3.25} = -4 \frac{\Delta x_e^2 \Delta z_e + \Delta x_{l\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}$$
(83)

$$d_{3.26} = -4 \frac{\Delta y_e^2 \Delta z_e + \Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}$$
(84)

$$d_{3.27} = \frac{2\Delta z_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta z_e^3}{R_e^6} - \frac{4\Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}$$
(85)

$$\begin{pmatrix} d_{4.1} = -0.5 \left( \frac{3\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^5} + \frac{32\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{3R_e^6} \right)$$

$$(86)$$

$$d_{4,2} = 0.5 \left( \frac{1}{R_e^3} + \frac{5\Delta y_e^2}{R_e^5} \right)$$
(87)

$$d_{4.3} = -0.5 \left( \frac{3\Delta y_e \Delta z_e}{R_e^5} + \frac{3\Delta y_e \Delta z_{1\varsigma}}{R_e^5} \right)$$
(88)

$$d_{4.4} = 0.5 \left( \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right)$$
(89)

$$d_{4.5} = -\frac{4\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{R_e^6}$$
(90)

$$d_{4.6} = 0.5 \left( \frac{\Delta z_e}{R_e^4} + \frac{4\Delta y_e^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right)$$
(91)

$$d_{4.7} = -0.5 \left( \frac{2\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^3}{R_e^6} + \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(92)

$$d_{4.8} = -0.5 \left[ \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y_e + 4\Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right]$$
(93)

$$d_{4.9} = 0.5 \left( \frac{2\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^3}{R_e^6} + \frac{4\Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(94)

$$d_{4.10} = -0.5 \left[ \frac{4\Delta y_e \Delta z_e^2 + 4\Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right]$$
(95)

$$d_{5.1} = -1.5 \frac{\Delta x_e \Delta z_e}{R_e^5}$$
(106)

$$d_{5.2} = -1.5 \frac{\Delta y_e \Delta z_e}{R_e^5}$$
(107)

$$\begin{cases} d_{5.3} = 0.5 \left( \frac{1}{R_e^3} - \frac{3\Delta z_e^2}{R_e^5} - \frac{3\Delta z_{1\varsigma} \Delta z_e}{R_e^5} \right) \tag{108}$$

$$d_{5.4} = -\frac{2\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{R_e^6}$$
(109)

$$d_{5.5} = 0.5 \left( \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta z_e^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right)$$
(110)

$$\left(d_{4.11} = 0.5 \left(\frac{1}{R_e^3} + \frac{3\Delta x_e^2}{R_e^5}\right)$$
(96)

$$d_{4.12} = 0.5 \left( \frac{32\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{3R_e^6} - \frac{3\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^5} \right)$$
(97)

$$d_{4.13} = -0.5 \left( \frac{3\Delta x_e \Delta z_e}{R_e^5} + \frac{3\Delta x_e \Delta z_{1\varsigma}}{R_e^5} \right)$$
(98)

$$d_{4.14} = 0.5 \left( \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(99)

$$\begin{cases} d_{4.15} = 0.5 \left( \frac{\Delta z_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right) \end{cases}$$
(100)

$$d_{4.16} = 0.5 \left( \frac{2\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^3}{R_e^6} + \frac{4\Delta y_e^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right)$$
(101)

$$d_{4.17} = 0.5 \left( \frac{2\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^3}{R_e^6} - \frac{4\Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right)$$
(102)

$$d_{4.18} = -0.5 \left[ \frac{4\Delta x_e \Delta y_e^2 + 4\Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right]$$
(103)

$$d_{4.19} = -0.5 \left[ \frac{4\Delta x_e \Delta z_e^2 + 4\Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right]$$
(104)

$$\left| \mathbf{d}_{4,20} = \mathbf{d}_{4,21} = \dots \mathbf{d}_{4,27} = \mathbf{0} \right|$$
(105)

$$d_{5.6} = 0.5 \left( \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta z_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(111)

$$d_{5.7} = 2 \left[ \frac{\Delta y_e^2 \Delta z_e - \Delta x_e^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right]$$
(112)

$$\left\{ d_{5.8} = -2 \left[ \frac{\Delta x_e^2 \Delta z_e + \Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right]$$
(113)

$$d_{5.9} = -2\left[\frac{\Delta y_e^2 \Delta z_e + \Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}\right]$$
(114)

$$d_{5.10} = \frac{\Delta z_e}{R_e^4} - \frac{2\Delta z_e^3}{R_e^6} - \frac{2\Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}$$
(115)

$$\begin{pmatrix} d_{5.11} = d_{5.12} = \dots d_{5.19} = 0 & (116) \\ d_{5.20} = 0.5 \begin{pmatrix} \frac{1}{2} - \frac{3\Delta x_e^2}{2} - \frac{8}{2} \frac{\Delta z_e}{2} + \frac{32\Delta z_e \Delta x_e^2}{22} \end{pmatrix} & (117)$$

$$d_{5.21} = -0.5 \left( \frac{32\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{3R_e^6} - \frac{3\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^5} \right)$$
(118)

$$d_{5.22} = -0.5 \left[ \frac{3\Delta x_e \Delta z_e + 3\Delta z_{15} \Delta x_e}{R_e^5} \right]$$
(119)

$$d_{5.23} = 0.5 \left( \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta x_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(120)

$$d_{6.1} = \frac{4}{3} \left( \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e \Delta z_e^2}{R_e^6} \right)$$
(125)

$$d_{6.2} = d_{6.3} = d_{6.4} = 0 \tag{126}$$

$$d_{6.5} = 0.5 \left( \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta z_e \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(127)

$$d_{6.6} = d_{6.7} = d_{6.8} = d_{6.9} = d_{6.10} = 0$$
(128)

$$d_{6.11} = -1.5 \frac{\Delta X_e \Delta Z_e}{R_e^5}$$
(129)

$$d_{6.12} = -0.5 \left( \frac{3\Delta y_e \Delta z_e}{R_e^5} + \frac{8}{3} \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta z_e^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right)$$
(130)

$$\begin{cases} d_{6.13} = 0.5 \left( \frac{1}{R_e^3} - \frac{3\Delta z_e^2}{R_e^5} - \frac{3\Delta z_{1\varsigma} \Delta z_e}{3R_e^5} \right) \end{cases}$$
(131)

$$d_{6.14} = -2 \frac{\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{R_e^6}$$
(132)

$$d_{6.15} = 0.5 \left( \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta z_e^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right)$$
(133)

$$\left| d_{6.16} = -2 \left\lfloor \frac{\Delta x_e^2 \Delta z_e - \Delta y_e^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right\rfloor$$
(134)

$$d_{6.17} = -2 \left[ \frac{\Delta x_e^2 \Delta z_e + \Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6} \right]$$
(135)

Решение (49) дает однозначные значения  $a_j$ , подстановка которых в (26) – (31) позволяет определить поля избыточных деформаций и напряжений. Полное поле напряжений  $\sigma_{ik}$ , с учетом поля тяготения вычисляется по формулам:

$$\sigma_{XX}^{0} = \sigma_{XX} - \frac{1}{2} \frac{\gamma}{1+\gamma} \rho gz \qquad (146)$$

$$\sigma_{yy}^{0} = \sigma_{yy} - \frac{1}{2} \frac{\gamma}{1+\gamma} \rho gz \qquad (147)$$

$$\sigma_{ZZ}^{0} = \sigma_{ZZ} - \frac{1}{2} \frac{\gamma}{1+\gamma} \rho gz \qquad (148)$$

$$\left[ d_{5.24} = \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{2\Delta x_e^3}{R_e^6} + \frac{2\Delta x_e \Delta y_e^2}{R_e^6} \right]$$
(121)

$$d_{5.25} = \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{2\Delta x_e^3}{R_e^6} - \frac{2\Delta x_{1\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6}$$
(122)

$$\begin{cases} d_{5.26} = -2 \left[ \frac{\Delta y_e^2 \Delta x_e + \Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right] \end{cases}$$
(123)

$$d_{5.27} = -2\left[\frac{\Delta z_e^2 \Delta x_e + \Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta x_e}{R_e^6}\right]$$
(124)

$$\left[d_{6.18} = -2\left[\frac{\Delta y_e^2 \Delta z_e + \Delta y_{1\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}\right]$$
(136)

$$d_{6.19} = \frac{\Delta z_e}{R_e^4} - \frac{2\Delta z_e^3}{R_e^6} - \frac{2\Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta z_e}{R_e^6}$$
(137)

$$d_{6.20} = 0.5 \left( \frac{32\Delta x_e \Delta y_e \Delta z_e}{3R_e^6} - \frac{3\Delta x_e \Delta y_e}{R_e^5} \right)$$
(138)

$$d_{6.21} = 0.5 \left( \frac{1}{R_e^3} - \frac{3\Delta y_e^2}{R_e^5} - \frac{8}{3} \frac{\Delta z_e}{R_e^4} + \frac{32\Delta y_e \Delta z_e}{3R_e^6} \right)$$
(139)

$$d_{6.22} = -1.5 \left[ \frac{\Delta y_e \Delta z_e + \Delta z_{1\varsigma} \Delta y_e}{R_e^5} \right]$$
(140)

$$d_{6.23} = 0.5 \left( \frac{\Delta x_e}{R_e^4} - \frac{4\Delta y_e^2 \Delta x_e}{R_e^6} \right)$$
(141)

$$d_{6.24} = -\left(\frac{2\Delta y_e \Delta x_e^2}{3R_e^6} + \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{2\Delta y_e^3}{R_e^6}\right)$$
(142)

$$d_{6.25} = -2\left[\frac{\Delta x_e^2 \Delta y_e + \Delta x_{l\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6}\right]$$
(143)

$$d_{6.26} = \frac{\Delta y_e}{R_e^4} - \frac{2\Delta y_e^3}{R_e^6} - \frac{2\Delta y_{l\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6}$$
(144)

$$d_{6.27} = -2 \left[ \frac{\Delta z_e^2 \Delta y_e + \Delta z_{2\varsigma}^2 \Delta y_e}{R_e^6} \right]$$
(145)

$$\sigma_{XY}^{0} = \sigma_{XY} \tag{149}$$

$$\sigma_{XZ}^0 = \sigma_{XZ} \tag{150}$$

$$\sigma_{\rm yz}^{\rm 0} = \sigma_{yz} \tag{151}$$

Плотность избыточной свободной энергии вычисляется согласно выражению (47), а с учетом поля тяжести (полная плотность) - заменой  $\sigma_{ik}$  на  $\sigma_{ik}^{0}$  в том же выражении. Модуль главного вектора избыточных напряжений вычисляем по формуле:

$$\sigma_{2\pi} = \begin{pmatrix} (\sigma_{\chi\chi} + \sigma_{\chi\gamma} + \sigma_{\chiz})^{2} + \\ + (\sigma_{\chi\gamma} + \sigma_{\gamma\gamma} + \sigma_{\gammaz})^{2} + \\ + (\sigma_{\chiz} + \sigma_{\gammaz} + \sigma_{zz})^{2} \end{pmatrix}$$
(152)

Аналогично и с учетом поля тяжести:

$$\sigma_{\mathcal{Z}\mathcal{I}}^{0} = \begin{pmatrix} (\sigma_{\chi\chi}^{0} + \sigma_{\chi\gamma}^{0} + \sigma_{\chi\gamma}^{0})^{2} + \\ + (\sigma_{\chi\gamma}^{0} + \sigma_{\gamma\gamma}^{0} + \sigma_{\gamma\gamma}^{0})^{2} + \\ + (\sigma_{\chiz}^{0} + \sigma_{\gamma\gamma}^{0} + \sigma_{\gammaz}^{0})^{2} \end{pmatrix}$$
(153)

Описанный алгоритм был численно реализован в виде программы под названием: «Лира – напряжение», в которой объемные интегралы вычислялись статистическими испытаниями (метод Монте-Карло), система (48) решалась методом итераций (метод Зейделя) [5].

# К ОЦЕНКЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ВЫЗВАННОЙ НАЛИЧИЕМ МНОГИХ ЯДЕРНЫХ ПОЛОСТЕЙ

Анализ решений о плотности свободной энергии деформации геологической среды при наличии одной полости показывает, что энергия уменьшается с расстоянием от эпицентра как  $1/R^6$ . Следовательно, если полости отстоят на значительном расстоянии друг от друга, а это имеет место на рассматриваемых конкретных объектах, то энергия парного взаимодействия совокупности полостей значительно (на несколько порядков) меньше полной энергии каждой из них. Этот факт позволяет оценить суммарный эффект как линейную сумму решений задач для одиночных полостей, т. е.:

$$U_{ik} = \sum_{\zeta=1}^{N_1} \lambda_{\zeta} U_{ik\zeta}$$
(154)

$$\sigma_{ik} = \sum_{\zeta=1}^{N_1} \lambda_{\zeta} \sigma_{ik\zeta} \tag{155}$$

где U<sub>ik</sub> и  $\sigma_{ik}$  – поле деформации и напряжений от многих полостей, N<sub>1</sub> – количество полостей, U<sub>ikç</sub> и  $\sigma_{ik\varsigma}$ , – поле деформации и напряжений вызываемое одной полостью номера  $\zeta$ , если бы другие полости отсутствовали,  $\lambda_{\varsigma}$  – весовой коэффициент, отражающий долю полости номера  $\zeta$  во вклад суммарного поля.

Поля  $U_{ik\varsigma}$  и  $\sigma_{ik\varsigma}$  вычисляются по (18). Значения коэффициентов  $\lambda_{\varsigma}$  можно оценить исходя из следующих физических соображений. Рассмотрим единичную полость номера  $\zeta$ . В отсутствии других полостей полная свободная энергия деформации геологической среды как единого целого была бы:

$$F_{\varsigma} = \frac{1}{2} \int_{v_0} \sigma_{ik\varsigma} U_{ik\varsigma} dv , \qquad (156)$$

где  $V_0$  – объем геологической среды за исключением объема самой полости  $\zeta$ . Под повторяющимися индексами «i, k» понимается суммирование.

Наличие других полостей, согласно (154) и (155), уменьшает эту энергию до величины:

$$F_{\varsigma}' = \frac{1}{2} \lambda_{\varsigma}^2 \int_{v_0} U_{ik\varsigma} \sigma_{ik\varsigma} dv$$
(157)

.Тогда изменение энергии полости будет:

$$\Delta F_{\varsigma} = F_{\varsigma} - F_{\varsigma}' = \frac{1}{2} (1 - \lambda_{\varsigma}^2) \int_{V_0} U_{ik\varsigma} \sigma_{ik\varsigma} dv \qquad (158),$$

С другой стороны, изменение энергии должно равняться энергии исходного поля деформаций  $U_{ik\varsigma}$  в объеме остальных полостей, т. е.

$$\Delta F_{\varsigma} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ \int_{v_j} U_{ik\varsigma} \sigma_{ik\varsigma} dv_j \right].$$
(159)

При условии достаточной удаленности полостей друг от друга можно считать, что:

$$\int_{v_j} U_{ik\varsigma} \sigma_{ik\varsigma} dv_j \approx \frac{4}{3} \pi R_{3j}^3 \sigma_{ik\varsigma} (M_{j\varsigma}) U_{ik\varsigma} (M_{j\varsigma}) , \quad (160)$$

где  $\sigma_{ik\varsigma}(M_{j\varsigma})$  и  $U_{ik\varsigma}(M_{j\varsigma})$  – значения напряжения и деформации в центре сферических полостей номера «j» возникающих от полости  $\zeta$ , как если бы они отсутствовали;  $M_{j\varsigma}$  – координаты центров полостей « $\zeta$ ».

Приравнивая (159) к (158) и учитывая (160), можно оценить

$$\lambda_{\varsigma} = \left[1 - \frac{2}{3} \frac{\pi}{F_{\varsigma}} \sum_{j \neq \varsigma}^{N_1} R_{3j}^3 \sigma_{ik\varsigma}(M_{j\varsigma}) U_{ik\varsigma}(M_{j\varsigma})\right]^{\frac{1}{2}}$$
(161)

Величина  $F_{\zeta}$ , согласно (18), в пределе должна быть равной:

$$F_{\varsigma} = \int_{S_0} (\mathbf{P}_{\varsigma} \cdot \mathbf{U}_{\varsigma}) ds \tag{162}$$

С учетом структуры вектора Р

$$F_{\varsigma} = \frac{4}{3} \pi \rho g Z_{0\varsigma} k(a_{1\varsigma} + a_{12\varsigma} + a_{22\varsigma})$$
(163)

Таким образом, весовые коэффициенты  $\lambda_{\zeta}$  можно вычислять, используя выражение:

$$\lambda_{\varsigma} = \left[ 1 - \frac{\sum_{j \neq \varsigma}^{N_1} R_{3j}^3 \sigma_{ik\varsigma}(M_{j\varsigma}) U_{ik\varsigma}(M_{j\varsigma})}{2\rho g Z_{0\varsigma} k(a_{1\varsigma} + a_{12\varsigma} + a_{22\varsigma})} \right], \quad (164)$$

а суммарные поля - по формулам (154) и (155).

## К ОЦЕНКЕ ВРЕМЕН РЕЛАКСАЦИЙ Напряженного состояния геологической среды

В [6] приведены результаты исследования долговечности твердых тел под нагрузкой, где показано, что прочность горных пород является функцией времени, т. е. любое твердое тело, находящееся под нагрузкой, со временем релаксирует до полного снятия напряжения путем хрупкого разрушения или вязкого «течения». Время такого перехода можно оценить по формуле:

$$\tau = \tau_0 \exp\left[(U_0 - \gamma \sigma^0) / RT\right] [c], \qquad (165)$$

где  $\tau$  – долговечность горных пород под давлением;  $\sigma^0$ ,  $\tau_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $U_0$  – коэффициенты, характеризующие

прочностные свойства горных пород, ( $\tau_0 = 10^{-13}$  с), R – газовая постоянная; T – температура.

В [7] отмечается, что коэффициенты  $U_0$  и  $\gamma_0$ , коррелируют со значениями статистической прочности горных пород [ $\sigma_{np}$ ]. Фактические данные по определению  $U_0$ ,  $\gamma_0$  и [ $\sigma_{np}$ ] позволили получить следующие регрессии:

$$U_0 = -8.628 \cdot 10^{-3} [\sigma_{np}] + 2.185 \cdot 10^5$$
(166)

$$\gamma = 2.266 \cdot 10^{14} [\sigma_{np}]^{-1.519} \tag{167}$$

Размерности величин:  $U_0 = [Дж/моль], \gamma = [Дж/моль \cdot \kappa \Gamma c], [\sigma_{np}] = \Pi a = [H/m^2].$ 

Если учесть литостатическое давление условий естественного залегания, то

$$\gamma = 6.395 \cdot 10^{11} [\sigma_{\pi}]^{-0.51} [\sigma_{np}]^{-1.519}$$
(168)

где  $\sigma_{\pi}$  – литостатическое давление, при котором находятся горные породы в [H/м<sup>2</sup>]. В таблице приведены сравнительные данные, полученные эмпирически и вычисленные с использованием регрессии (166) и (167).

Таблица. Эмпирические и расчетные значения коэффициентов U<sub>0</sub> и γ

| Порода                | U <sub>0эмп</sub> ,<br>Дж/моль    | U <sub>0теор</sub> ,<br>Дж/моль   | <sub>Υэмп</sub> ,<br>Дж мм²/моль кгс | ү <sub>теор</sub> ,<br>Дж мм²/моль кгс | σ <sub>пр</sub> ,<br>Η/м²          |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| Известняк ракушечник  | 2,10 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 2,02 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 10,10 <sup>.</sup> 10⁴               | 11,84 <sup>-</sup> 10⁴                 | 1,29 <sup>-</sup> 10 <sup>6</sup>  |
| Каменный уголь        | 1,89 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 1,87 <sup>.</sup> 10 <sup>5</sup> | 2,97 <sup>.</sup> 10⁴                | 2,40 <sup>-</sup> 10 <sup>4</sup>      | 3,69 <sup>-</sup> 10 <sup>6</sup>  |
| Алевролит             | 1,61 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 1,68 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 1,38 <sup>-</sup> 10⁴                | 1,20 <sup>-</sup> 10 <sup>4</sup>      | 5,83 <sup>-</sup> 10 <sup>6</sup>  |
| Доломит               | 1,37 <sup>.</sup> 10 <sup>5</sup> | 1,33 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 0,58 <sup>-</sup> 10 <sup>4</sup>    | 0,54 <sup>-</sup> 10 <sup>4</sup>      | 9,88 <sup>-</sup> 10 <sup>6</sup>  |
| Известняк силурийский | 1,24 <sup>-</sup> 10 <sup>5</sup> | 1,32 <sup>·</sup> 10 <sup>5</sup> | 0,44 <sup>.</sup> 10 <sup>4</sup>    | 0,52 <sup>-</sup> 10 <sup>4</sup>      | 10,12 <sup>.</sup> 10 <sup>6</sup> |
| Песчаник              | 1,22 <sup>.</sup> 10 <sup>5</sup> | 1,17 <sup>.</sup> 10 <sup>5</sup> | 0,36 <sup>.</sup> 10⁴                | 0,41 <sup>.</sup> 10 <sup>4</sup>      | 11,81 <sup>.</sup> 10 <sup>6</sup> |
| Каменная соль         |                                   | 0,72 <sup>.</sup> 10 <sup>5</sup> |                                      | 0,23 <sup>.</sup> 10 <sup>4</sup>      | 17,00 <sup>-</sup> 10 <sup>6</sup> |

Из таблицы следует, что полученные регрессии (166) и (167) позволяют оценивать расчетным путем время перехода возмущенной геологической среды в первоначальное естественное состояние, или иначе, - провести временную оценку устойчивости постядерновзрывного напряженного состояния горных пород изучаемых объектов.

# Расчетные оценки напряженного состояния геологических сред площадки Балапан и объекта Лира

Вышеописанные алгоритмы реализованы в виде программы, с использованием которой проведены расчеты для площадки Балапан и объекта Лира (Рисунки 1 - 5).

## Площадка Балапан

На рисунке 1 представлены поля избыточного напряжения на различных уровнях среза геологической среды – 100, 300, 500 м для площадки Балапан. Как видно из рисунка, на уровне среза 100 м значения избыточного напряжения не превышают 10<sup>6</sup> H/м<sup>2</sup> = 10 атм. (Ig  $\sigma^0 \le 6$ ) при статистической прочности горных пород в условиях естественного залегания  $\sigma_{\rm сж} \sim 10^7 - 10^8$  H/м<sup>2</sup>. Можно предположить, что на данном уровне среза горные породы находятся в

состоянии, далеком от возможных разрушений. Наблюдаются две четко выраженные области повышенных значений напряжения - в центральной части и на северо-востоке площадки (lg  $\sigma^0 \leq 6$ ), а также ярко выраженные линейные зоны пониженных значений напряжения (lg  $\sigma^0 \leq 3$ ), которые картируют Чингизский региональный разлом, простирающийся в северо-западном направлении. Этот же разлом и ассоциированные с ним тектонические нарушения проявляются на уровне среза 300 м, где отмечаются аномалии с закритическими значениями напряжения, т.е., значениями, превышающими статистическую прочность  $\sigma^0 > 10^8$  H/м<sup>2</sup>. Аномальными являются поля в окрестности скважин 1220 (глубина взрыва Н = 483 м, мощность взрыва Е = 190 кТ) и 1344 (H = 528 м, E = 135 кT), расположенных в центральной части площадки. Подобные аномалии выявляются и на северо-востоке плошалки в районе скважин 1075 (H = 298 м, E = 25 кT), 1057 (H = 316 м, Е = 22 кТ), 1007 (Н = 295 м, Е = 16 кТ), 1235 (Н = 305 м, Е = 20 кТ).

Значения времени релаксации напряжений в геологической среде показаны на рисунке 2 для уровней среза 300, 400, 500 м. Как видно из рисунка 2, время «жизни» закритических напряжений не превышает  $\tau \leq 10^6$  сек  $\approx 10$  дней (lg  $\tau \leq 6$ ) с момента образования полости во время ядерного взрыва. На уровне среза 300 м геологические породы площадки Балапан механически устойчивы, за исключением нескольких аномалий вокруг полостей на северо-

востоке. В ближайшее время, по-видимому, не следует ожидать каких-то существенных релаксационных процессов, связанных со значительными смещениями горных пород.



Рисунок 1 Площадка Балапан. Распределение в геологической среде избыточного напряжения (логарифма модуля его главного вектора)



Рисунок 2 Площадка Балапан. Распределение в геологической среде логарифма времени релаксации напряжения

В нижней части рисунков 1, 2 приведены результаты расчета поля напряжений и времени релаксации геологической среды на уровне среза 500 м. Именно на этом уровне глубин была проведена основная масса подземных ядерных взрывов. Картина рассчитанного поля имеет фрагментарный характер, отмечаются достаточно обширные фрагменты с закритическим значением напряжения, приуроченные к близко расположенным группам полостей, особенно в центральной части площадки. Такими являются участок повышенной трещиноватости, объединяющий скважины 1359 (H = 519 м, E = 132 кT), 1326 (H = 530 м, E = 126 кT), 1323 (H = 524 м, E = 165 кT), 1325 (H = 508 м, E = 82 кT); участок, объединяющий скважины 1355 (H = 530 м, E = 130 кT), 1222 (H = 535 м, E = 100 кT), 1220 (H = 483 м, E = 190 кT), 1313 (H = 543 м, E = 137 кT), 1328 (H = 535м, E = 118 кT), 1061 (H = 521 м, E = 165 кT)

и другие. Время формирования зон трещиноватости на этих участках не превышал 10 дней после взрыва.

На северо-востоке участки трещиноватости отмечаются в основном в окрестностях отдельно взятых полостей, по сравнению с центральной частью они существенно меньшие по объему. В областях, удаленных от эпицентров взрывов в геологической среде сохраняются докритические напряжения, характеризующиеся временем «жизни»  $\tau > 10^9$  сек ~ 300 лет.

# Объект Лира

На рисунке 3 приведены рассчитанные поля модуля главного вектора напряжений с учетом литостатического давления на уровнях среза 100-1000 м (100, 300, 700, 800, 900, 1000 м). На рисунке 4 показаны рассчитанные значения времени релаксации этих напряжений в геологической среде до первоначального состояния (до состояния литостатического давления при отсутствии ядерных полостей) для уровней среза 700, 800, 900, 1000 м.

Как видно из рисунка 3, наиболее значительные аномалии проявляются на уровнях срезов, соответствующих глубинам расположения ядерных полостей (800-900м). В окрестности известных полостей, в пределах участков с линейными размерами до 200 м, имеют место запредельные значения напряжений, т.е. напряжения, превышающие или имеющие тот же порядок, что предел прочности горных пород.



Рисунок 3. Объект Лира. Распределение в геологической среде избыточного напряжения (логарифма модуля его главного вектора)

Такие напряжения не могут существовать долго, происходит снятие напряженного состояния путем перехода энергии деформации в поверхностную энергию трещин, и поэтому эти зоны на настоящий момент времени должны быть покрыты развитой трещиноватостью.

На этот же вывод указывают результаты расчета времени релаксации напряжений (рисунок 4). На срезах 800-1000 м видно, что время «жизни» таких напряжений не превышает 10<sup>6</sup> сек (10 дней) после образования ядерной полости. Из рассчитанного времени релаксации на уровне 800-900 м. также следует, что горные породы (каменная соль) на удалении более 500 м от центров полостей практически устойчивы во времени -  $\tau \approx 10^{19}$  сек.=3·10<sup>12</sup> лет. Время релаксации напряжений на уровне среза 700 м составляет 10<sup>8</sup> сек.= 31год, т.е. следует ожидать, что горные породы на горизонте 700 м в настоящее время являются устойчивым. Каких либо событий, типа трещинообразования, провалов и т. п., следует ожидать по истечению 31 года со времени проведения ПЯВ. Сделанный вывод подтверждается рисунком 3, где на уровне среза 700 м статический предел прочности.  $\sigma \approx 10^6 < \sigma_{cm} \approx (3-5)\cdot10^7$ н/м<sup>2</sup>. На более высоких уровнях среза (<700 м) значения напряжений значительно меньшие по сравнению с пределом прочности. Этим горизонтам в ближайшее время, по-видимому, не грозит механическая неустойчивость (рисунок 4). Нижние горизонты (≥900 м) также в настоящее время оцениваются как устойчивые. Здесь напряжения практически равны литостатическому и будут существовать сколь угодно долго, за исключением небольшой зоны трещиноватости на уровне среза 1000 м, которая, по-видимому, связана с эпицентром взрыва в скважине ТК-6 (самый глубокий взрыв).

На рисунке 5 показано распределение логарифма плотности свободной энергии.

Свободная энергия деформации пропорциональна сумме произведений одноименных компонент тензора напряжений и деформации. Поэтому на приведенных срезах проявляются те же закономерности, что отмечены выше. Так, например, у границ полостей плотность энергии составляет порядка 10<sup>11</sup> Дж/м<sup>3</sup>, что выше плотности энергии межфазовых связей горных пород –  $10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>, следовательно, эти зоны должны быть покрыты сетью трещин. При удалении от эпицентров на значительное расстояние (1>500 м), по-видимому, должна сохраняться первоначальная сплошность, т.к. здесь  $\varphi \sim 10^6 - 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>.

Таким образом, выполненные оценочные расчеты показали, что недра площадки Балапан в настоящее время еще сохраняют напряженное состояние. Имеются обширные зоны трещиноватых пород, приуроченные в основном к местам наибольшей плотности взрывов. Образованные зоны трещиноватости могут являться коллекторами подземных вод и радиоактивных продуктов взрыва и служить локальными источниками загрязнения окружающего геологического пространства.



Рисунок 4. Объект Лира. Распределение логарифма времени релаксации напряжения в геологической среде

# НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ КАК СЛЕДСТВИЕ НАЛИЧИЯ В НЕЙ ПОЛОСТЕЙ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ



Рисунок 5. Объект Лира. Распределение логарифма свободной энергии в геологической среде

Распределение по объему геологической среды на объекте Лира напряжений и времени их релаксации показало, что закритические напряжения (превышающие предел статической прочности) существуют только в окрестности полостей на расстояниях, не превышающей 200-300 м. На текущее время эти напряжения, по-видимому, уже сняты процессом трещинообразования (время их существования оценено порядка 10 дней с момента образования полости). На глубинах менее 700 м небольшие избыточные напряжения будут устойчивыми достаточно долго (более 30 лет). На глубинах более 600 м в будущем существенные механические подвижки горных пород не ожидаются.

## Литература

- 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. Т.VI. С. 558 563.
- 2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Теория упругости. М.: Наука, 1965. Т.VII. С. 30, 33 34.
- 3. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. М.: Мир, 1985. С. 278 287.
- Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Физико-математическая литература, 1960. -С. 303 - 305.
- 5. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. С. 60 114.
- 6. Окатов Р.П., Низаметдинов Ф.К., Цай Б.Н., Бондаренко Т.Г. Физико-технические проблемы разработки полезных
- ископаемых.- 2003. № 2. С. 38 42.

# ІШІНДЕ ЯДРОЛЫҚ ҚУЫСТАР БОЛУЫМЕН БАЙЛАНЫСТЫ, ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ОРТАНЫҢ КЕРНЕУЛІК КҮЙІ

## Мурзадилов Т.Д., Логвинов О.В., Гринштейн Ю.А., Жолдыбаев А.К.

## ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Ядролық жарылыстарының қуыстарын қоса, геологиялық ортаның кернеулік күйін есептеу программасы әзірленген. Семей сынау полигонының Балапан бөлікшесі мен Батыс Қазақстандағы Лира нысанасы үлгісінде, жер қойнауында, жер астындағы сулар мен жарылыстарының радиоактивтік өнімдерінің коллекторлары болуына мүмкін, жарылыстардың ең үлкен тығыздылығына байланыстырылған, үлкен жарықшақты белдемдері бар болуы көрсетілген.

# STRESS CONDITION OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT AS CONSIQUENCE OF NUCLEAR CAVITIES EXISTENCE AT THE SITE

# T.D. Murzadilov, O.V. Logvinov, Yu. A. Grinshtein, A.K. Zholdybaev

# Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

A computer program for evaluation of the stress condition of the geological environment including nuclear cavities was designed. Using as an example «Balapan» site (STS) and «Lira» facility it was shown that its depths, at present, contain large fractured areas that are in immediate proximity to the places of most frequently performed explosions. It is assumed that the area structure, in a way, may serve as a reservoir for underground water and radioactive products after explosions.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РЕСТАВРАЦИИ КАНАЛОВ ПРОРЫВА ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ПО ДАННЫМ РТУТОМЕТРИИ

## Мурзадилов Т.Д., Политиков М.И., Логвинов О.А., Политиков И.М.

## Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье рассмотрена теоретическая задача образования постядерновзрывных возмущений естественного геохимического поля ртути. На примере камуфлетного ядерного взрыва, произведенного на объекте «Лира» (Западный Казахстан), показана возможность реставрации следов прорыва газовых продуктов в объеме геологической среды по данным опробования пород дневной поверхности на содержание ртути. Результаты исследований могут быть использованы при решении некоторых задач контроля ядерных испытаний.

# Характеристики ударной волны в приближении теории сильного взрыва Седова-Неймана

Задача о сильном взрыве в политронном газе решена независимо Седовым (1946 г.) и Нейманом (Neumann) [3]. Применимость этого решения для описания энергетического воздействия подземного ядерного взрыва (ПЯВ) на геологическую среду может быть обоснована следующими аргументами.

На ранних стадиях развития процесса ПЯВ:

- плотность выделяемой энергии не сравнимо велика по отношению к плотности энергии химической связи минеральных образований, составляющих горные породы. Поэтому среда должна вести себя практически как очень плотное изотропное газообразное образование;
- плотность энергии в образовавшейся ударной волне также намного выше энергии межатомарного взаимодействия, что подтверждается интенсивным дроблением горных пород.

Исходя из этого формального обоснования, положение, скорость и давление на фронте ударной волны, согласно математическому аппарату гидродинамики, примененному для количественного описания процесса возникновения и распространения ударной волны в геологической среде, должно определяться выражениями:

$$R = \beta \left( E \cdot t^2 / \rho_1 \right)^{\frac{1}{5}},$$

$$U = 2R / 5t,$$

$$P_{ya} = 2 \cdot \rho_1 U^2 / (\gamma + 1)$$
(1)

где, R – положение ударной волны относительно эпицентра взрыва;  $\beta$  - константа; E – энергия взрыва; t – время;  $\rho_1$  – плотность среды; U – скорость распространения фронта ударной волны;  $\gamma = C_p / C_v$  - константа, характеризующая отношение теплоемкостей  $C_p$  и  $C_v$  некоторого эффективного плотного газа.

Коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  должны быть определены эмпирически. В частности, при эталонном взрыве «Рейниер» (США), произведенном в туфах с плотностью пород  $\rho_1=1,7\cdot10^3$ кг/м<sup>3</sup>, с энергией E =  $1.7\cdot4.2\cdot10^{12}$ Дж через  $10^{-3}$ С после детонации положе-

ние фронта ударной волны было зафиксировано на расстоянии 7 м от эпицентра [4]. Подстановка экспериментальных значений в (1) дает оценку для  $\beta = 1,76$ . В том же эксперименте при взрыве «Рейниер» на расстоянии 40 м от эпицентра взрыва было зафиксировано давление на фронте волны  $P_{yq} = 1.4$  кбар =  $1,4\cdot10^8$  H/м<sup>2</sup>, что позволило получить оценку для  $\gamma = 3,3$ .

В рамках теории сильного взрыва скорость, плотность вещества и давление эффективного газа за фронтом ударной волны можно определить следующими уравнениями [3].

$$V = 21 M / 5t; \quad \rho = \rho_1 \zeta;$$
  

$$P = 4\rho_1 r \cdot Z / 25 \cdot t^2 \cdot \gamma; \quad \xi = 1 / R,$$
(2)

где, V,  $\rho$ , P – скорость, плотность и давление за фронтом ударной волны на расстоянии 1;  $\xi$  - относительное расстояние от эпицентра взрыва; M,  $\zeta$  и Z– некоторые функции  $\xi$  и  $\gamma$ .

Функции M,  $\zeta$  и Z определяются из характеристических уравнений для системы уравнений гидродинамики, приводимых в [3] для описания процесса образования ударной волны. Численное решение этих уравнений при заданных коэффициентах  $\beta$  и  $\gamma$ позволило получить следующий результат для функций (2):

$$V \approx 0.63 \left( E / \rho_1 \right)^{\frac{3}{2}} 1 / R^{\frac{3}{2}}, \quad \rho \approx 1.87 \rho_1 \left( 1 / R \right)^2,$$
  
P = 1.52 (E/R<sup>3</sup>) [0,72 (1 / R)<sup>4</sup> + 0,1] . (3)

Здесь 1 - расстояние от эпицентра взрыва.

Применительно к изучению прорыва через горные породы газовых продуктов подземного ядерного взрыва, образующего ядерно-взрывные геохимические ореолы ртути, можно выделить для рассмотрения (исходя из общих соображений) две резко отличные в газодинамическом отношении области горных пород:

- первая область, примыкающая к эпицентру взрыва, включает зону плавления и интенсивного дробления горных пород. В зоне плавления, в результате возгонки и разложения горных пород, генерируется основная масса газовой фазы продуктов взрыва в результате возгонки и разложения горных пород. Скорость распространения газовой фазы определяется скоростью движения среды за фронтом ударной волны и она практически равна последней. Фронт и распределение газовых продуктов взрыва формируются в объеме зоны дробления;

- вторая область располагается за пределами зоны дробления и граничит с последней. В этой зоне динамикагазов подчиняется законам движения в газопроницаемых средах.

Граница зоны дробления  $1 = R_3$  может быть оценена эмпирически. Так, при проходке разведочными штольнями эпицентра взрыва было установлено, что горные породы раздроблены ударной волной на уровне давления, вдвое превышающем статическую прочность пород на сжатие в условиях естественного залегания. Подстановка этих данных в уравнение для давления  $P_{ya}$  (1) приводит к уравнению для  $R_3$ , решением которого является функция:

$$R_{3} = \left[0.622 \cdot \left(E / [\delta_{cm}]\right)\right]^{\frac{1}{3}}, \qquad (4)$$

где, E – энергия взрыва в [Дж]; [ $\delta_{cm}$ ] – предел прочности на сжатие в условиях естественного залегания горных пород в [ $H/m^2$ ].

# УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ЗА ПРЕДЕЛАМИ ЗОНЫ ДРОБЛЕНИЯ

Как показано выше, пространственная эпюра скорости газовых продуктов взрыва формируется ударной волной и имеет сферическую симметрию. Естественно предположить, что за пределами зоны дробления горных пород симметрия не будет сохраняться, газ будет двигаться преимущественно по проницаемым структурам геологической среды, т.е. по каналам с повышенной естественной пористостью, вследствие чего движение может приобретать струйный характер. На это указывают как прямые наблюдения на дневной поверхности – локальные выбросы, так и наблюдаемые поствзрывные геохимические ореолы с пятнистой структурой, генетически связанные с процессами массопереноса продуктов взрыва. Приведенное утверждение принято нами как основание для формального описания движения газов посредством одномерной математической модели, в которой пространственная координата выбирается вдоль некоторого канала с повышенной естественной пористостью, который далее для краткости будем называть каналом прорыва. Очевидно, что в реальной геологической среде одномерных каналов прорыва может быть большое количество, и детерминированные критерии их нахождения представляют сложную задачу. Однако реальная геологическая среда представляет собой систему, пространственно слабокоррелированную по флюидопроницаемым свойствам, что позволяет, используя методологию статистической физики, определить необходимые

критерии выявления каналов прорыва в рамках теоретико-вероятностного подхода.

Рассмотрим некоторую виртуальную кривую, совпадающую с осевой линией канала прорыва, выделенного в геологической среде каким-то образом. Начало отсчета расстояний вдоль данной кривой определим таким образом, чтобы точка пересечения последней с границей зоны интенсивного дробления горных пород определялась координатой  $l = R_3$ . Будем считать, что законы движения газов в проницаемой среде подчиняются уравнениям типа уравнений Навье-Стокса и Дарси. Тогда для одномерной задачи:

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial l} \right] = -\frac{\partial P}{\partial l} + \eta^{1} \frac{\partial^{2} V}{\partial l^{2}},$$
  

$$\alpha \rho V = \frac{\partial}{\partial l} \left[ P - \eta^{1} \frac{\partial V}{\partial l} \right], \quad l \ge R_{3}$$
(5)

где, V(t,1) - скорость газовых продуктов взрыва в проницаемой геологической среде в момент времени t на расстоянии 1;  $\eta^1$  - коэффициент, характеризующий диссипацию энергии газа при прохождении его через среду;  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности в законе типа Дарси.

Данная система уравнений замыкается граничными условиями, согласно (3):

$$V = al \quad ecnu \quad 0 \le l \le R_3;$$
  

$$V = 0 \quad ecnu \quad l \ \rangle \ R_3; \quad a = 0.63 \left( E / \rho_1 \right)^{\frac{1}{2}} R_3^{-\frac{5}{2}}$$
(6)

Система (5) эквивалентна для V(t, 1) уравнению

$$\partial V / \partial t + V \cdot \partial V / \partial l = -\alpha V \tag{7}$$

Частным решением задачи (6) - (7) является функция:

$$V(t,1) = \begin{cases} \alpha a l e^{-\alpha t} / \begin{bmatrix} (a+\alpha) \times \\ \times \left(\frac{1-ae^{-\alpha t}}{a+\alpha}\right) \end{bmatrix} e c \pi u \ 0 \langle 1 \leq \mathbf{R}_3 \\ 0 \ e c \pi u \ 1 \rangle \ \mathbf{R}_3 \end{cases}$$
(8)

В частности, на границе зоны интенсивного дробления  $1 = R_3$  в начальный момент времени t=0

$$V(0, R_3) = aR_3 = 0.794 \left[ \left[ \delta_{cm} \right] / \rho_1 \right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (9)$$

т.е., скорость газов на границе зоны дробления не зависит от мощности взрыва и определяется прочностными и плотностными характеристиками среды.

# ПЛОТНОСТЬ ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Плотность газов в каналах прорыва описывается уравнением неразрывности – закон сохранения вещества:

$$\partial \rho / \partial t + V \partial \rho / \partial l + \rho \partial V / \partial l = 0; \begin{cases} \rho(0,1) = \rho_0 (1/R_3)^2 & ecnu \ 0 \le 1 \le R_3, \\ \rho(0,1) = 0 & ecnu \ 1 \rangle R_3 \end{cases}$$
(10)

где,  $\rho(t,1)$  - плотность газов в канале прорыва;  $\rho_0$ некоторая константа определяемая выходом газообразных продуктов при взрыве и зависящая от фазового состава горных пород.

Для коэффициента  $\rho_0$ , получена следующая формула:

$$\rho_0 = (5/3)\rho_1[\nu(1-f) + f]/(1-f), \qquad (11)$$

где, v - коэффициент выхода газовых продуктов при плавлении или разложении горных пород (0 < v <= 0.5), f – влажность горных пород (0 < f < 1);  $\rho_1$  – плотность горных пород.

Как и в предыдущем случае, можно показать, что решением краевой задачи (10) будет функция:

$$\rho(t,1) = \begin{cases} \frac{\rho_0 [\alpha(a+\alpha)]^3 \cdot (1/R_3)^2}{[1-ae^{-\alpha t}/(a+\alpha)]} e^{\alpha t} & 0 < 1 < 1_{\phi} \\ 0 & \text{если } 1 > 1_{\phi} \end{cases}$$
(12)

где 1<sub>ф</sub> - положение переднего фронта газовых продуктов взрыва, определяемое выражением

$$l_{\phi} = [R_3(a+\alpha)/\alpha] \cdot [1 - ae^{-\alpha t}/(a+\alpha)]$$
(13)

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ ПРОРЫВА

Согласно закону Дарси давление газа Р за фронтом ударной волны на расстоянии 1 должно удовлетворять уравнению:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial l} = \alpha \rho V; \quad \varphi = P - \eta^1 \frac{\partial V}{\partial l} \tag{14}$$

Учитывая отношение (12) с учетом (3) можно получить следующее решение для Р:

$$P(t,1) = \begin{cases} 0.25\rho_{0}\alpha a [\alpha(a+\alpha)]^{4} 1^{4} e^{-\alpha t} / R_{3}^{2} \times \\ \times [1-a1^{-\alpha t} / (a+\alpha)]^{4} + \\ +0.24[\delta_{cm}] ecnu \ 0 \ \langle \ 1 \le 1_{\phi} \\ 0 ecnu \ 1 \ \rangle \ 1_{\phi} \end{cases}$$
(15)

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА В КАНАЛЕ ПРОРЫВА ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Известно, что диссипация механической энергии в газовом потоке, проходящем по некоторым материальным каналам, определяется как силами внутреннего трения (вязкостью) так и силами трения газа о стенки каналов. Формально эти процессы можно описать общим уравнением переноса тепла [3].

$$\rho T[\partial S / \partial t + V \partial S / \partial l] = \sigma_{mp} \partial V / \partial l - \partial (qV) / \partial l;$$
  

$$\sigma_{mp} = \eta^{1} \partial V / \partial l$$
(16)

где, T – температура газа; S – энтропия единицы массы газа; V – скорость газа в канале;  $\sigma_{\rm тp}$  – инте-

гральная сила трения действующая в канале прорыва; qV – тепловой поток в газе; q – теплосодержание единицы массы газа.

С учетом известного термодинамического отношения:

$$dq = \rho T ds;$$
  

$$\partial q / \partial t = \rho T \partial S / \partial t;, \qquad (17)$$
  

$$\partial q / \partial l = \rho T \partial S / \partial l$$

уравнение (16) становится эквивалентным уравнению:

$$\partial q / \partial t + 2V \partial q / \partial l - \partial V / \partial l [\eta^{1} \partial V / \partial l - q] = 0$$
 (18)

В предположении о том, что газ при высоких температурах подчиняется уравнению Клайперона (идеальный газ) и с учетом известного начального распределения его давления P(0,1) согласно (15), уравнение (18) преобразуется в уравнение:

$$q(0,1) = K_1^{1^*} + K_0;$$
  

$$K_1 = \alpha a \rho_0 \mu C_P / 4R_3^2; , \qquad (19)$$
  

$$K_0 = 0.24 [\delta_{cw}] \mu C_P / R$$

где,  $\mu$  - эффективная молярная масса газа; C<sub>P</sub> – теплоемкость газа; R – газовая постоянная.

После необходимых вычислений для (18) - (19) получено следующее решение в пределах 0  $\langle 1 \langle 1_{\phi} :$ 

$$q(t,1) = [\alpha^{9} K_{1} 1^{4} + \alpha K_{0} (a + \alpha)^{8}] / /[(a + \alpha)^{-9} \cdot (1 - ae^{-\alpha t} / (a + \alpha))] - -\eta^{1} \alpha [a(1 - 1e^{-\alpha t}) / (a + \alpha) + \ln \alpha - \ln(a + \alpha) - -\ln(1 - ae^{-\alpha t} / (a + \alpha))] / [1 - ae^{-\alpha t} / (a + \alpha)]$$
(20)

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ, ВМЕЩАЮЩИХ КАНАЛЫ ПРОРЫВА

Во время быстротекущего процесса прохождения по каналу прорыва газ отдает часть тепла горным породам. Оправданно считать, что система горная порода – газ является адиабатической системой, т.е. количество тепла в этой системе остается постоянным. Это означает, что теплообмен между газом и породой осуществляется согласно уравнению:

$$\partial q_n / \partial t + \partial q / \partial t + V \partial q / \partial l + q \partial V / \partial l = 0, \qquad (21)$$

где q<sub>n</sub> – количество тепла в единице объема горной породы, примыкающей к каналу прорыва.

С учетом (18), уравнение (21) можно записать как

$$\partial q_n = V \partial q / \partial l - \eta^1 (\partial V / \partial l)^2$$
(22)

Интегрируя (22) в пределах времени подхода фронта волны к точке l = l до времен t = t при известных функциях q(t,l) u V(t,l), можно определить искомое теплосодержание:

$$q_{n}(t,1) = \int_{\tau_{n}}^{t} \partial q_{n} / \partial t dt =$$

$$= \eta^{1} \alpha \begin{bmatrix} (a+\alpha)R_{3} / \alpha 1 + \ln[(a+\alpha)R_{3} / \alpha 1] + \\ + \ln[1 - ae^{-\alpha t} / (a+\alpha)] - \\ -[1 - ae^{-\alpha t} / (a+\alpha)]^{-1} \end{bmatrix} + , (23)$$

$$+ (4K_{1}1^{4} / 9) \cdot \begin{bmatrix} (a+\alpha)^{9}R_{3}^{9} / (\alpha 1)^{9} - \\ -[1 - ae^{-\alpha t} / (a+\alpha)]^{-9} \end{bmatrix} \cdot [\alpha / (a+\alpha)]^{9}$$

где время подхода переднего фронта газовой волны к заданной точке канала прорыва l = l определяется из уравнения

$$1 = \left[ (a + \alpha) / \alpha \right] \cdot \left[ 1 - a e^{-\alpha \tau_n} / (a + \alpha) \right].$$
 (24)

Распределение температуры горных пород вдоль канала прорыва определяется по известному отношению:

$$T_n = q_n(t_1 1) / C_1 \rho_1, \qquad (25)$$

где,  $C_1$  – теплоемкость горных пород;  $\rho_1$  – плотность горных пород.

Как отмечено выше, процесс теплообмена между газом и горной породой относительно быстротекущий. Это время несопоставимо со временем возгонки летучих эманаций (ртути) из горных пород. Поэтому практический интерес представляет конечная (установившаяся) температура горных пород, которую можно оценить, согласно (23), (25) как:

$$T_{n\max} = \lim_{t \to \infty} T_n = \left\lfloor \eta^1 \alpha / C_1 \rho_1 \right\rfloor \times$$

$$\times \left[ (a + \alpha) R_3 / \alpha 1 + \ln \left[ (a + \alpha) R_3 / \alpha 1 \right] - 1 \right] +$$

$$+ (4/9) \cdot \left[ \alpha / (a + \alpha) \right]^9 \times$$

$$\times (K_1 1^4 / C_1 \rho_1) \left[ (a + \alpha)^9 R_3^9 / (\alpha 1)^9 - 1 \right]$$
(26)

# Аналитическая зависимость концентрации летучей формы ртути от температуры горных пород

Известно, что природная ртуть в терригенных отложениях находится обычно в сорбированном состоянии. Энергия десорбции ртути, слабо зависящая от фазового состава отложений, по абсолютному значению мала по сравнению энергией десорбции других летучих металлов, что фиксируется эмпирически в многочисленных прямых экспериментах. Это обстоятельство объясняет высокую степень летучести ртути при нормальных условиях и позволяет использовать данное явление при поисках погребенных месторождений полезных ископаемых. В [5] приведены данные о летучести ртути по некоторым горным породам ртутно-сурьмяных, золотоантимонитовых месторождений Средней Азии. В частности, при нагреве надрудных песчаников с содержанием ртути 1-5 г/тонну показатель летучести п определен как:

$$n = 500 d \left( C_{_{nem}} / C_0 \right) / d \,\mathrm{T}$$
(27)

где, С<sub>лет</sub> – количество ртути, перешедшей в газовую фазу при стационарном нагреве; С<sub>0</sub> – исходное содержание ртути в горной породе (фоновое содержание); Т – температура нагрева горной породы.

Статистический анализ эмпирических данных по месторождениям Средней Азии позволил получить следующую регрессию С<sub>лет</sub>(T):

$$C_{nem}(T)/C_0 = \begin{cases} 20.4 \cdot 10^{-4} T - 0.559 \, ecnu \ 0 \ \langle \ T \le 723^{\circ} K \\ 1 \ ecnu \ T \ \rangle \ 723^{\circ} K \end{cases}$$
(28)

В таблице 1 приведены сопоставительные данные эмпирических и теоретических значений функции  $C_{ner}(T)/C_0$ .

∆T°C 0-100 100-200 200-300 300-400 400-500 500-600 Т⁰К 323 423 523 623 723 823 0.7 0.7 1.4 < 0.1 n<sub>эксп</sub> 1 1 (C<sub>лет</sub>/C<sub>0</sub>)<sub>эмп</sub> 0.14 0.28 0.48 0.68 0.96 0.51 0.92 (С<sub>лет</sub>/С<sub>0</sub>)<sub>теор</sub> 0.1 0.3 0.71

Таблица 1. Сопоставительные эмпирических и теоретических значений функции C<sub>лет</sub>(T)/C<sub>0</sub>

Как видно из таблицы 1, линейная регрессия (28) достаточно хорошо согласуется с эмпирическими данными. Среднеквадратичная погрешность составляет  $\pm 0.02$ .

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РТУТИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Согласно известному соотношению между летучей и сорбированной компонентами, содержание ртути в горных породах может быть вычислено по формуле:

$$C_T(T)/C_0 = 1 - C_{nem}(T)/C_0.$$
 (29)

С учетом выражения (26) для реально наблюдаемой величины  $C_T(T)$  получается следующее выражение:

$$C_{T_{Hadol}}(1) = \lim_{t \to \infty} C_{T}(t, 1) =$$

$$= C_{\phi} \{ 1 - \left[ 20.4 \cdot 10^{-4} \eta^{1} \alpha / C_{1} \rho_{1} \right] \times$$

$$\times \left[ \frac{(a + \alpha)R_{3} / \alpha 1}{+ \ln \left[ (a + \alpha)R_{3} / \alpha 1 \right] - 1} \right] - (4/9) \times , \qquad (30)$$

$$\times \left[ 20.4K_{1}1^{4} / C_{1} \rho_{1} \right] \times$$

$$\times \left[ \alpha / (a + \alpha) \right]^{9} \left[ (a + \alpha)^{9} R_{3}^{9} / (\alpha^{9}1^{9}) - 1 \right] \}$$

где  $C_{\phi} = C_0 - исходное фоновое содержание Hg в горных породах до прохождения фронта газовых продуктов взрыва. Вводя обозначения:$ 

$$\theta = \alpha 1 / [(a + \alpha)R_3];$$
  

$$a_2 = 20.4 \cdot 10^{-4} \eta^1 \alpha / C_1 \rho_1; , \qquad (31)$$
  

$$a_3 = (4/9) \cdot 10^{-4} K_1 R_3^4 \alpha^5 / C_1 \rho_1$$

функции (30) можно придать вид:

$$\Psi = C_{\text{m}_{\text{Ha}\delta\pi}}(1) / C_{\phi} =$$
  
= 1 - a\_2 [\theta^{-1} - \ln \theta - 1] + a\_3 \theta^4 (1 - \theta^{-9}). (32)

Анализ выражения (32) показывает, что данная функция хорошо интерполируется в интервале  $0 \le \theta \le 1$  при  $1 \le 1_{\text{max}} = (a + \alpha)R_3 / \alpha$  функцией

$$\overline{\Psi} = C_{\text{m Hafn}} / C_{\phi} = 1 - b_1 (\theta^{-1} - 1)$$
 (33)

где,

$$b_1 = 1.186a_2 - 6.35 \cdot 10^5 a_3 \tag{34}$$

В качестве примера в таблице 2 приведена эмпирическая оценка функций  $\Psi u \overline{\Psi}$  для взрыва «Бланка» (США).

| Таблица 2. | Оценка | Ψ | и | Ψ | для взрыва «Бланка» (США) |
|------------|--------|---|---|---|---------------------------|

| $\theta$          | 0.03  | 0.05 | 0.1  | 0.15 | 0.2  | 0.5  | 1 |
|-------------------|-------|------|------|------|------|------|---|
| Ψ                 | -0.29 | 0.32 | 0.66 | 0.77 | 0.83 | 0.95 | 1 |
| $\overline{\Psi}$ | -0.25 | 0.3  | 0.65 | 0.78 | 0.84 | 0.96 | 1 |

Учитывая эмпирические данные таблицы 2, с достаточной степенью точности можно принять, что распределение наблюдаемой концентрации Hg вдоль канала прорыва в газовых продуктах взрыва описывается уравнением (33) с коэффициентами (31) и (34).

# Статистические закономерности траекторий (каналов) массопереноса вещества в геологической среде

Представляется, что в сложно структурированной геологической среде закономерности распределения вещества, переносимых вдоль траекторий (каналов) после ядерного взрыва, должны иметь теоретико-вероятностный характер. Примем в качестве исходных следующие гипотезы, основанные на некоторых правдоподобных предположениях, относящихся к рассматриваемой задаче:

- концентрация продуктов взрыва, а вместе с ними их теплосодержание и количество вещества возгонки (в данном случае ртути) в каждой точке геологической среды определяется длиной участка канала прорыва от эпицентра взрыва до заданной точки;
- прохождение продуктов взрыва из точки в точку осуществляется вдоль линий связной пористости, имеющих в общем случае произвольную локальную ориентацию;
- пространственная одномерная конфигурация каналов прорыва может быть реализована как любая физически допустимая линия тока;
- любая физически допустимая линия тока (канал прорыва) реализуется равновероятно;
- любая макроскопически наблюденная характеристика потока продуктов взрыва является статистической величиной и определяется путем

усреднения значений по всем линиям тока (каналам прорыва).

Исходя из сделанных предположений и следуя методологии статистической физики, введем следующие определения:

- единичное состояние системы точка-точка, или состояние геологической среды, когда две произвольные точки M<sub>0</sub>(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>) и M<sub>1</sub>(X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>) имеют между собой только одну гидродинамическую связь в виде линии тока (канала прорыва) из множества физически допустимых;
- ансамбль состояний системы точка-точка, или ансамбль состояний - совокупность всех физически допустимых линий тока соединяющих точки M<sub>0</sub> и M<sub>1</sub>.

Вероятность реализаций какого-либо одного состояния, или совокупности состояний, выбранных на основе заданного критерия, можно определить как отношение соответствующих количеств к числу всех состояний. В частности, применительно к рассматриваемой задаче о каналах прорыва, для подсчета числа состояний необходимы некоторые модельные построения для объекта исследования. В качестве такой модели принята интерпретация геометрии канала в виде последовательно-соединенных отрезков прямых длиной r<sub>6</sub>., поскольку связные каналы пористости, образующие канал прорыва, являются совокупностью связанных между собой отдельных поровых пространств некоторого среднего размера r<sub>δ</sub> (хотя в предлагаемой теории величина r<sub>δ</sub> будет не обязательно ассоциировать с таковыми).

Введем некоторую систему координат ОХҮZ, такую, что ее начало находится в точке  $M_0$ , а ось X проходит через  $M_0$  и  $M_1$  (рисунок 1).


Рисунок 1. К описанию единичной системы точка – точка

Пусть ломаная линия M0, a, b, c, ..., m, M1 длины 1 представляет одну из возможных физических линий тока - канала прорыва. Пусть элементы линий тока, вектора  $r_i$ , по модулю равны  $r_{\delta}$  и могут располагаться в плоскости XZ, или в плоскости XY, или в плоскости YZ. Тогда

$$\overline{\mathbf{R}} = \mathbf{M}_0 \mathbf{M}_1 = \sum_{i=1}^{n_0} \mathbf{r}_i \quad \mathbf{n}_0 = 1/\mathbf{r}_\delta , \qquad (35)$$

где,  $n_0$  — число элементов линии тока;  $R = M_0 M_1 = R$  - расстояние между точками  $M_0$  и  $M_1$ ; 1 - длина линии тока.

Количество векторов г<sub>i</sub>, коллинеарных оси X, будет соответственно

$$\mathbf{n}_1 = \mathbf{R}/\mathbf{r}_\delta \tag{36}$$

Следовательно, число всех возможных состояний длины 1 должно будет определяться комбинацией  $n_0 - n_1$  элементов. Иными словами, система ломаных линий из элементов  $r_i$  и длины 1, соединяющих точки  $M_0$  и  $M_1$ , имеет  $n_0 - n_1$  степеней свободы и подсчет всех состояний сводится к определению всевозможных комбинаций, удовлетворяющих условию (35).

Пусть n<sub>0</sub> - n<sub>1</sub> - k=т элементов г<sub>i</sub> лежат в плоскости XZ. Тогда k элементов должны будут лежать в плоскости YZ для выполнения условия по числу степеней свободы  $(n_0 - n_1 - k) + k = n_0 - n_1$ . Пусть из т элементов **r**<sub>i</sub>, лежащих в плоскости XZ,  $m - l_1$ элементов ориентированы в положительном, а  $l_2$ элементов - в отрицательном направлении. Тогда, согласно двухпозиционной модели Изинга, число возможных состояний длины  $l N_1^1$  определится выражениями:

$$N_1^1 = m! / [(m - l_1)! \cdot l_2!]; \quad l_1 = l_2; \quad l_1 = m/2 . \quad (37)$$

Два вторых уравнения в (37) связаны с тем, что координата X точки M<sub>1</sub> равна нулю. Из (37) следует, что

$$N_1^1 = m! / [(m/2)!]^2$$
(38)

Воспользовавшись формулой Стирлинга, можно показать, что при больших  $n_0 - n_1 - k$  (что выполняется ввиду относительной малости  $r_i$ ) число состояний  $N_1^1$  определяется аналитическим выражением:

$$N_1^1 \approx \left(2/\sqrt{\pi}\right) \left(\sqrt{n_0 - n_1}\right)^{-1} 2^{(n_0 - n_1)/2}$$
(39)

Проведя аналогичные операции для распределения векторов  $r_i$  в плоскости YZ, находим, что  $N_2^1 = N_1^1$ , что следует также из условия произвольности выбора ориентаций осей X и Y. Очевидно, что число состояний  $M_0$  и  $M_1$ , ввиду не коррелированности  $r_i$  и с учетом (35) и (36) можно представить как

$$N_{0} = N_{1}^{1} \cdot N_{1}^{2} = (4r_{\delta} / \pi) \times \\ \times \{ \exp[(\ln 2)(1 - R) / r_{\delta}] / [1 - R + 4r_{\delta} / \pi]$$
(40)

Коэффициент  $4r_{\delta}/\pi$  введен в знаменатель выражения (40), исходя из условия нормировки  $N_0$  (l = R) = 1. Таким образом, общее (всевозможное) число состояний двухточечного ансамбля состояний линий тока (канала прорыва), согласно (40), будет определяться только длиной линии тока l.

На следующем этапе оценим число состояний трехточечного ансамбля (рисунок 2).



Рисунок 2. К описанию ансамбля систем точка - точка

Оценим количество всех состояний линий тока, соединяющих три точки Q, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>. Очевидно, что для данного ансамбля должно выполняться условие:

$$1_{QM_1} + 1_{M_1M_2} = 1_{QM_2} , \qquad (41)$$

где 1<sub>*QM*1</sub>, 1<sub>*M*1*M*2</sub>, 1<sub>*QM*2</sub> - длины линий токов, соединяющих соответствующие точки. Исходя из условия независимостей конфигурации линий тока (каналов

прорыва), соединяющих точки Q,  $M_{1,} M_{2}$  и с учетом (40), число состояний ансамбля точек -  $N_{QM1M2}$  определяется аналитическим выражением:

$$N_{QM_{1}M_{2}} = N_{QM_{1}} \cdot N_{M_{1}M_{2}} = (4r_{\delta} / \pi)^{2} \times \\ \times \frac{\exp\left[(\ln 2)(1_{QM_{1}} + 1_{M_{1}M_{2}} - R_{QM_{1}} - R_{M_{1}M_{2}})\right]}{\left[1_{QM_{1}} - R_{QM_{1}} + 4r_{\delta} / \pi\right] \left[1_{M_{1}M_{2}} - R_{M_{1}M_{2}} + 4r_{\delta} / \pi\right]}.$$
 (42)

Введем понятие энтропии S ансамбля состояний линии тока [3]. Согласно общепринятому определению:

$$S_{QM_1M_2} = \ln N_{QM_1M_2}$$
 (43)

В соответствии с принципами статистической физики больших систем (состоящих из очень большого количества отдельных элементов, в данном случае элементов  $\mathbf{r}_i$ ) сделаем следующее предположение: канал  $QM_1M_2$  при прохождении через него потока вещества находится в равновесном, или, по крайней мере, в стационарном состоянии. Тогда, для такой системы должно выполняться условие постоянства энтропии:

$$\begin{cases} dS_{QM_1M_2}(\partial S/\partial l_{QM_1}) dl_{QM_1} + (\partial S/\partial l_{M_1M_2}) dl_{M_1M_2} = 0\\ dl_{QM_1} + dl_{M_1M_2} = 0, \quad npu \quad l_{QM_2} = Const \end{cases}$$
(44)

Подставляя выражения для  $S_{QM_1M_2}$  из (42), (43) и учитывая (41), можно получить следующие отношения между длинами линий токов:

$$\begin{cases} 1_{QM_1} = 0.5(1_{QM_2} + R_{QM_1} - R_{M_1M_2}) \\ 1_{M_1M_2} = 0.5(1_{QM_2} - R_{QM_1} + R_{M_1M_2}) \end{cases},$$
(45)

где  $R_{QM_1}$  и  $R_{M_1M_2}$  - длины отрезков QM<sub>1</sub> и M<sub>1</sub>M<sub>2</sub>, соответственно. Подстановка в (42) показывает, что число состояний трехточечного ансамбля, состояний линий токов также определяется длиной линии тока, но проходящей через три точки.

$$N_{QM_{1}M_{2}} = (4r_{\delta} / \pi)^{2} \times \left\{ \exp\left[ (\ln 2 / r_{\delta}) \cdot (1_{QM_{2}} - R_{QM_{1}} - R_{M_{1}M_{2}}) \right] \right\} \div .$$
(46)  
$$\div (1_{QM_{2}} - R_{QM_{1}} - R_{M_{1}M_{2}} + 4r_{\delta} / \pi)^{2}$$

Рассмотрим теперь некоторое полупространство, моделирующее геологическую среду (рисунок 3).



Рисунок 3. К описанию изучаемой модели

Пусть плоскость XOY совпадает с дневной поверхностью и на ней задано некоторое счетное количество точек M<sub>2i</sub> с известными значениями длин линий токов, проходящих через точки Q, M<sub>1j</sub> внутренней среды и точки M<sub>1i</sub>. Точка Q расположена на оси Z=H. Общее число состояний, ассоциированных с точкой M1j, согласно (46), будет:

$$N_{0} = \sum_{M_{2i} \Rightarrow D_{2}} N_{QM_{1}M_{2i}} = (4r_{\delta} / \pi)^{2} \times \\ \times \sum_{M_{2i} \Rightarrow D_{2}} \left( 1_{QM_{2i}} - R_{QM_{1j}} - R_{M_{1j}M_{2i}} + 4r_{\delta} / \pi \right)^{-2} \times$$
(47)
$$\times \exp \left[ (\ln 2 / r_{\delta}) (1_{QM_{2i}} - R_{QM_{1j}} - R_{M_{1j}M_{2i}}) \right]$$

Здесь  $D_2$  – область суммирования, дневная поверхность. Следуя определению статистической вероятности, для обозначения вероятности W того, что величины  $l_{QM1j}$  *и*  $l_{M1jM_{2i}}$  принимают значения, описанные уравнениями (45), можно записать

$$W\left[1_{QM_{1j}} = 0.5(1_{QM_{2i}} - R_{M_{1j}M_{2i}} + R_{QM_{1j}})\right] = , \quad (48)$$
$$= N_{QM_{1j}M_{2i}} / N_0$$

где, согласно (46):

$$N_{QM_{1j}M_{2j}} = (4r_{\delta} / \pi)^{2} \times \\ \times \left( 1_{QM_{2i}} - R_{QM_{1j}} - R_{M_{1j}M_{2i}} + 4r_{\delta} / \pi \right)^{-2} \times .$$
(49)  
 
$$\times \exp \left[ (R_{QM_{2i}} - R_{QM_{1j}} - R_{M_{1j}M_{2i}}) \cdot (\ln 2 / r_{\delta}) \right]$$

По определению о среднем в теории вероятности, наблюденной  $l_{QM_{1j \text{ maß}}}$ , или средней  $\overline{l}_{QM_{1j}}$  будет величина:

$$1_{QM_{1jmdit}} = \overline{1}_{QM_{1j}} = \sum_{M_{2i} \ni D_2} 0.5(1_{QM_{2i}} + R_{QM_{1j}} - R_{M_{1j}M_{2i}})W(1_{QM_1}).$$
(50)

Таким образом, выражение (50) дает возможность восстановить значения длин линий токов (каналов прорыва) во внутренних областях геологической среды, если известны их значения на дневной поверхности. Теоретико-вероятностный алгоритм, построенный на (50) является основой для восстановления объемного поля  $l_{QM_{1j}}$  по

плоскому полю 1 ОМ2: .

### ОБЪЕМНАЯ РЕСТАВРАЦИЯ ТЕХНОГЕННОГО ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РТУТИ, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ЯДЕРНОМ ВЗРЫВЕ

Как было показано выше (формулы (31)-(33)), во внутренних точках геологической среды концентрация ртути является функцией длины канала 1 и физических характеристик среды. Разрешая (33) относительно 1, находим:

$$\begin{cases} \overline{I}_{\mathcal{Q}M_{2i}} = \left[ (a+\alpha)R_{3}b_{1} / \alpha \right] \cdot \left[ (1+b_{1}) - C_{mM_{2i}} / C_{\phi M_{2i}} \right]^{-1} \\ \overline{I}_{\mathcal{Q}M_{1j}} = \left[ (a+\alpha)R_{3}b_{1} / \alpha \right] \cdot \left[ (1+b_{1}) - C_{mM_{1j}} / C_{\phi M_{1j}} \right]^{-1} \end{cases}$$
(51)

где  $C_{mM_{2i}}$ ,  $C_{\phi M_{2i}}$ ,  $C_{mM_{1j}}$ ,  $C_{\phi M_{1j}}$  - концентрация остаточной ртути и фона в горных породах на дневной и во внутренних областях геологической среды, соответственно. Подстановка (51) в (50) приводит к уравнению, которое позволяет вычислить значения отношения  $C_m/C_{\phi}$  в любой точке геологической среды, если известно распределение  $C_{mM2i}$ ,  $C_{\phi M2i}$  на дневной поверхности. Это значит, что по данным геохимического опробования на ртуть, проведенного на дневной поверхности, над эпицентром камуфлетного взрыва, можно восстановить распределение Нд в объеме геологической среды. Конечно, это возможно, если установлен факт прорыва к дневной поверхности газовых продуктов взрыва и аномальные возмущения поля рассеяния Hg.

Для практического применения полученного алгоритма необходимо предварительно оценить величины  $b_1$  и  $\ln 2/r_{\delta}$ . Величина  $b_1$ , как следует из (34) и (31), является функцией кинетических и динамических параметров движения газовых продуктов взрыва в конкретной геологической среде, а именно  $\alpha$ , а,  $\eta$ ,  $\mu$  и др., которые, как правило, заранее неизвестны. Параметр  $\ln 2/r_{\delta}$  ранее определен, исходя из двухпозиционной модели Изинга для элементов каналов прорыва. В действительности, каналы связной пористости могут быть более высокого порядка, поэтому, величину  $\ln 2/r_{\delta}$  необходимо определять

также для конкретной геологической среды. В данной работе использованы эмпирические сведения, полученные при проведении подземных ядерных взрывов на территориях США и Казахстана. Учтен также, так называемый, принцип правдоподобия, заключающийся в том, что вычисляемая концентрация ртути  $\Psi = C_{m наба} / C_{\phi}$  в ближайшей окрестности дневной поверхности должна быть максимально коррелирована с эмпирически определенными данными опробования поверхности при вариациях коэффициентов b<sub>1</sub>,  $\alpha$  и ln2/r<sub>δ</sub>.

По данным мониторинга взрывов «Рейниер» и «Бланка» (США) и исходя из приведенных выше модельных построений установлено, что длина канала прорыва приближенно пропорциональна расстоянию от эпицентра взрыва до точки прорыва:

$$1_{\partial H} = n R \tag{52}$$

Для взрывов «Рейниер» и «Бланка» п  $\approx$  (4÷6). Следовательно, если на дневной поверхности выбрать наиболее удаленную от эпицентра взрыва точку L<sub>1</sub>, в которой по данным опробования концентрация ртути C<sub>m набл</sub> = 0, тогда, согласно(33) и (52), при n=5 выполняется соотношение:

$$\begin{cases} (a+\alpha)b_1R_3/[\alpha(1+b_1)] = 5R_{L_1}\\ (a+\alpha)R_3/\alpha \ge 0 \end{cases}$$
(53)

Далее, если на дневной поверхности на контуре, охватывающем измененное взрывом поле Hg, выбрать точку L<sub>2</sub>, наиболее удаленную от эпицентра взрыва, где  $C_{cm \, na \delta n}/C_{\phi} = 1$ , то, согласно (33),

$$(a-\alpha)R_{3}/\alpha-5R_{1}=0.$$
 (54)

Решая совместно систему (53) -( 54), можно получить приближенную оценку для  $\alpha$  и  $b_1$ 

$$\alpha = aR_3 / (5R_{L_2} - R_3); \quad b_1 = R_{L_1} / (R_{L_2} - R_{L_1}), \qquad (55)$$

где коэффициент *а* задается выражением (6). Полагая  $r_{\delta}$  равным шагу опробования для определения концентрации ртути  $C_{m \text{ набл}}$  на дневной поверхности при  $\ln 2 = \ln 2$  вычисляется поле на уровне среза Z = $H = r_{\delta}$  с параметрами (55). Варьируя значения  $\alpha$ ,  $b_1$  и  $\ln 2/r_{\delta}$  в окрестности значений, описанных в (55), определяются такие их значения, при которых исходное и расчетные поля будут иметь максимальное значение коэффициента корреляции. Дальнейшие вычисления – на следующих уровнях среза геологической среды, - ведутся с учетом уточненных значений  $\overline{\alpha}$ ,  $\overline{b_1}$ ,  $\ln 2/r_{\delta}$ .

## Пример реставрации распределения ртути в объеме геологической среды при камуфлетном ядерным взрыве на объекте «ЛИРА» (Западный Казахстан)

На объекте «Лира» (Западный Казахстан) в скважине ТК6, пробуренной в Карачаганакском соляном куполе, в 1982 г. было осуществлено шесть

подземных ядерных взрывов мощностью по 15 кТ тротилового эквивалента. По данным ртутометрических исследований, проведенных на дневной поверхности в районе эпицентра взрыва, установлены аномальные понижения содержания ртути, которые проинтерпретированы как участки, несущие отпечаток формы и размеров мест выхода газофлюидного теплового потока [1]. Полевые данные наземных ртутометрических исследований использованы для реставрации распределения ртути в объеме земных недр, прилегающем к стволу скважины ТК6. Вычисления проведены по машинной программе, реализующей решение (50). Результаты расчетов даны на рисунке 4. Приведены эмпирические данные (рисунок 4 а) и результаты пересчета концентрации ртути для двух уровней среза - 50 и 100 м (Рисунки 4 б и 4 в). Места прохождения газофлюидных тепловых потоков отмечены красно-желтой окраской. Видно, что на дневной поверхности зарегистрировано несколько следов каналов (участков) прорыва. На горизонте 50 м они консолидируются в околоствольном пространстве, на уровне 100 м - образуют изометричную область в околоствольном пространстве. Это может указывать на то, что в момент взрыва основной прорыв газофлюидов происходил вдоль ствола боевой скважины, а затем на верхних горизонтах стал распадаться на отдельные каналы, которые проявились в пятнистой структуре поля концентрации ртути на дневной поверхности.



Рисунок 4. Объект «Лира». Реставрация распределения логарифма концентрации ртути на различных уровнях среза.



Рисунок 4. Объект «Лира». Реставрация распределения логарифма концентрации ртути на различных уровнях среза.



б – распределение ртути в различных ракурсах





Рисунок 5. Объект «Лира». Реставрация каналов прорыва газовых продуктов

#### РЕСТАВРАЦИЯ КАНАЛОВ ПРОРЫВА ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

В качестве формального основания для определения пространственного положения каналов прорыва принято представление о том, что места прохождения горячих газовых продуктов взрыва из-за максимальной возгонки отмечаются пониженными содержаниями Hg в горных породах. Следовательно, реставрация пространственного положения каналов прорыва может быть выполнена по известному объемному распределению содержания ртути в геологической среде, что может быть выражено как:

$$J = \int_{Q}^{M_{2i}} C_{m na \delta n}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) \, \mathrm{dl} \Rightarrow \min, \qquad (56)$$

где, Q – точка геологической среды с координатами эпицентра взрыва; M<sub>2i</sub> – произвольная точка принадлежащая дневной поверхности.

Интегрирование производится вдоль кривой QM<sub>2i</sub> длины 1. Выражение (56) является задачей вариационного исчисления, т.е. вероятная пространственная конфигурация канала прорыва газовых продуктов взрыва должна быть такой, чтобы функционал (56) вдоль нее достигал своего минимума. Или иначе: газовые продукты взрыва попадают из точки взрыва Q в любую точку дневной поверхности М<sub>2i</sub> по линии, вдоль которой остаточная (после возгонки) концентрация ртути в горных породах будет минимальной. Разработана программная реализация решения (56), которая позволила провести расчеты для реставрации каналов прорыва в приближении кусочно непрерывных линий тока на примере взрыва в скважине ТК6 объекта «Лира». В качестве исходных данных использованы результаты вычисления объемного поля C<sub>т набл</sub> (X, Y, Z) в окрестности этой скважины. На рисунке 5 показано положение искомых каналов прорыва при взгляде из различных точек геологической. Плоскость с цветным орнаментом на рисунке 5 отражает распределение ртути в квадрате опробования со стороной 1000 м в аксонометрическом изображении. Геологическая среда представлена объемом выше данной плоскости.

Каналы прорыва ранжированы по степени их значимости. Красным цветом обозначена осевая линия основного канала, по которому прорывалась основная масса газов, зеленым, желтым, белым и черным - следующие по значимости каналы. Как можно видеть из рисунка 5, движение газов к дневной поверхности осуществлялось вдоль околоскважинного пространства в пределах глубин 1000-200 м. На глубинах, начиная с 300-200 м (соответствующих нижней границе терригенных отложений, перекрывающих соляной купол), газовый поток резко ветвится в северо-западном направлении. Здесь по геологическим и геофизическим данным имеет место региональный тектонический разлом (рисунок 56, в). На глубине 50-100 м, некоторые каналы «расщепляются» дополнительно (рисунок 5а, в). Это, по-видимому, связано с тем, что верхние горизонты геологической среды, представленные осадочными отложениями, обладают большей неоднородностью и анизотропией механических свойств и имеют большую степень проницаемости по сравнению с однородным массивом нижележащей каменной соли.

Таким образом, в статье изложены основы теории реставрации ореолов ртути в объеме геологической среды по данным наземного инструментального опробования на Hg, в пределах эпицентрального участка проведения подземного ядерного взрыва, а также восстановления вероятного пространственного положения каналов движения газовых продуктов после камуфлетного взрыва. Практическое значение выполненная работа имеет для решения ряда задач по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [1]. Она может быть развита для описания закономерностей образования ртутных аномалий над рудными объектами, а также для так называемой геохимической голографии – одного из направлений в геохимии.

### Литература

- 1. Политиков М.И., Политиков И.М., Мурзадилов Т.Д. Ртутометрия при решении задач контроля за исполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний// Геофизика и проблемы нераспространения/ Вестник НЯЦ РК. Курчатов: Национальный ядерный центр РК, 2003. Вып. 2. С. 123 129.
- Математическое моделирование ореолов ртути под воздействием подземных ядерных взрывов// Математическое моделирование экологических систем/ Тезисы докладов Международной конференции 9-12 сентября 2003 г. – Алматы: Институт космических исследований МОН РК. - 2003. – С. 116.
- 3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика//Гидродинамика. М.: Наука, 1986. т.VI. С. 598 563.
- 4. Джонсон Г.В., Хигинс Г.Х., Вайолет К.И. Подземные ядерные взрывы//М.: Мир, 1962. С. 30 31.
- 5. Красик М.А., Кирикилица С.Н., Герасимова Л.И. Атмогеохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1986. С. 90 91.
- 6. Корн Г.К., Корн Т.К. Справочник по математике. М.: Наука, 1978. С. 743.

## ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРЫНЫҢ ГАЗ ӨНІМДЕРІ ЖАРЫП ӨТКЕН АРНАЛАРЫН СЫНАПМЕТРИЯ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША КЕҢІСТІКТІК ЖАҢҒЫРТУЫНЫҢ ТЕОРЕТИКАЛЫҚ ПРИНЦИПТЕРІ

#### Мурзадилов Т.Д., Политиков М.И., Логвинов О.А., Политиков И.М.

### ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Мақалада сынаптың табиғи геохимиялық өрісінің ядролық жарылыстардан кейінгі ұйытқуы пайда болуының теоретикалық мәселелері қаралған. «Лира» нысанасында (Батыс Қазақстан) өткізілген камуфлеттік ядролық жарылысының үлгісінде геологиялық ортасының көлемінде газ өнімдері жарып өткен арналарының іздерін жер бетінде сынап мөлшерін өлшеу деректері бойынша жаңғырту мүмкіншілігі көрсетілген. Зерттеулер нәтижелерін ядролық сынауларын бақылауында кейбір мәселелерін шешуінде қолдануға болады.

## THEORETICAL PRINCIPLES OF CHANNELS RESTORATION OF NUCLEAR EXPLOSION GASEOUS PRODUCTS OUTBURST ACCORDING TO MERCURY MEASUREMENT DATA

#### T.D. Murzadilov, M.I. Politikov, O.A. Logvinov, I. M. Politikov

#### Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper contains theoretical aspects of post-explosion disturbances occerrence in mercury natural geochemical field. Using as an example a confined nucaler explosion as "Lira" object (Western Kazakhstan) it was shown possibility of gaseous products outburst trails restoration in the geological environment according to Hg sampling data, received on ground surface. The results of this study may be used to solve issues for nuclear tests control

УДК 504.054:539.16

### ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЛИСТ ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ "РАДИОАКТИВНОСТЬ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ" И "РАДИОАКТИВНОСТЬ В АРКТИКЕ И АНТАРКТИКЕ"

Спиридонов С.И., Ульяненко Л.Н.

#### Всероссийский НИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

В соответствии с действующей программой [1] в НЯЦ РК и ИАЭ НЯЦ РК проводятся работы по исследованию возможностей совершенствования топлива реакторов ИВГ1, РА и ВВР-К. Каждый из этих реакторов имеет особенности, определяющие подходы к решению поставленных задач. Для реактора ИВГ1 является желательным расширение его эксплуатационных возможностей в сторону увеличения длительности работ без ограничения по запасу реактивности при малых или отрицательных добавках реактивности, вносимых экспериментальными устройствами в петлевом канале.

Со 2-го по 6-е октября 2005 г. в Ницце (Франция) состоялись два крупнейших конгресса радиоэкологов – 2-я Международная конференция "Радиоактивность в окружающей среде" и 6-я Международная конференция "Радиоактивность в Арктике и Антарктике". Первый форум был организован Международным союзом радиоэкологии (IUR), Норвежским Агентством по радиационной защите (NRPA), совместно с журналом "Радиоактивность в окружающей среде" (JER), Международным агентством по атомной энергии (IAEA) и Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN) Франции. В организации конференции "Радиоактивность в Арктике и Антарктике" принимали участие NRPA, IUR, а также Департамент энергетики США (DOE), Российская Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и Арктическая мониторинговая программа (АМАР).

Первый съезд радиоэкологов по направлению "Радиоактивность в окружающей среде" состоялся в Монако в 2002 г. Предыдущая конференция, на которой обсуждались проблемы радиоактивности в Арктике и Антарктике, была организована в Санкт-Петербурге (2002 г.). Одновременное проведение двух указанных форумов в Ницце (2005 г.) продиктовано необходимостью обсуждения ключевых проблем радиационной экологии ведущими специалистами, работающими в различных направлениях этой науки. В работе конгрессов приняли участие около 300 ученых, представлявших свыше 45 стран или международных организаций. Конференции были организованы в форме сессий, на каждой из которых заслушивались полновесные устные доклады и краткие 4-х минутные выступления авторов стендовых сообщений. Одновременно участники конференций могли непосредственно ознакомиться

со стендовыми докладами. Общее число представленных докладов – 250, в том числе 165 устных (включая краткие сообщения).

Первая сессия 2-ой Международной конференции "Радиоактивность в окружающей среде" была посвящена итогам 20-летних исследований последствий Чернобыльской катастрофы для населения и биоты. Е. Cardis, эксперт международной группы по здравоохранению (EHG) представила результаты изучения развития раковых заболеваний в регионах, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Отмечена необходимость перманентного контроля за динамикой этого показателя для различных групп населения, проживающего на территориях Беларуси, России и Украины, а также лиц, участвовавших в ликвидации последствий аварии. В докладе И. Звоновой (Россия) обобщены результаты исследований заболеваемости населения загрязненных областей Беларуси и России раком щитовидной железы в период с 1981 по 2001 гг. Выявлено резкое увеличение числа случаев возникновения этой болезни у детей в 1994-1999 гг.

Текущее состояние и прогноз радиационной обстановки на территории Беларуси после Чернобыльской катастрофы представлен в докладе М. Герменчук (Беларусь). Отмечено, что к 2046 г. площадь территории с уровнем загрязнения <sup>137</sup>Cs, превышающим 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>), уменьшится в 2.4 раза по сравнению с данными 1986 г. за счет экологических процессов и радиоактивного распада. Доклал Ю. Иванова (Украина) посвяшен методологическим и методическим аспектам восстановления земель, выведенных из хозяйственного использования вследствие высокой плотности радиоактивных выпадений. В сообщении обоснован оптимальный сценарий реабилитационных мероприятий с учетом комплекса радиологических И социальноэкономических критериев. Н. Тегаda (Япония) представил модель транспорта радионуклидов в атмосфере и результаты ее применения для прогнозирораспространения радионуклидов вания после "чернобыльских" выбросов. Оценка влияния техногенной нагрузки на биоту на фоне недостаточной информации о механизмах действии различных стресс-агентов, в том числе, ионизирующих излучений - одна из наиболее актуальных проблем современной радиоэкологии. Именно поэтому особое внимание участников конференции привлекли вопросы развития радиационных эффектов у представителей различных классов живых организмов (доклады Т. Hilton (США) и С. Cailes (Великобритания)).

Сообщения в рамках сессии "Мониторинг и измерения", посвящены методам определения содержания радионуклидов в атмосферном воздухе (Т. Abe (Япония)), разработке приборного обеспечения для целей мониторинга (R. Engelbrecht (Австрия)), оценке накопления радионуклидов в объектах окружающей среды (Н. Hedal (Норвегия)), исследованиям распределения естественных радионуклидов в морских экосистемах (Р. Lindal (Корея)). В докладе R. Pollanen (Финляндия) продемонстрированы новые аналитические методы, к которым относятся определение <sup>90</sup>Sr без радиохимических исследований и измерение содержания альфа-излучающих радионуклидов в воздухе методом высокоэффективной α-спектрометрии.

На отдельной сессии конференции обсуждались проблемы повышения содержания естественных радионуклидов в окружающей среде за счет технологических процессов. Классификация этих процессов, к которым относятся, прежде всего, добыча и переработка уранового сырья и полезных ископаемых, производство удобрений, выработка электроэнергии на основе использования угля, нефти и газа, представлена в докладе Т. Strand (Норвегия). На сессии рассмотрены проблемы радиоактивного загрязнения территории вокруг урановых шахт Португалии (F. Carvalho), отражены результаты определеестественных ния содержания тяжелых радионуклидов в подземных водах Финляндии (P. Vesterbacka), дана оценка поступления естественных радионуклидов в окружающую среду при производстве фосфорной кислоты (J. Bolivar (Испания)) и фосфорных удобрений (А. Ваеза (Испания)). В ряде докладов уделено внимание вопросам, поступления тяжелых естественных радионуклидов в различные виды биоты. Так, F. Ribeiro (Бразилия) представил экспериментальные данные об интенсивности накопления овощными культурами радионуклидов природных рядов распада (<sup>210</sup>Pb, <sup>228</sup>Ra и <sup>6</sup>Ra), содержащихся в удобрениях.

В докладах, представленных в рамках сессии "Защита окружающей среды" рассматривались различные аспекты актуальной проблемы, связанной с разработкой принципов оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы. R. Pentreath (Великобритания) акцентировал внимание на необходимости преодоления "разрыва" между накопленной информацией о эффектах радиационного воздействия на растения и животных и практическим применением результатов радиоэкологических исследований. При этом автор доклада отметил, что система радиационной защиты объектов окружающей среды должна находиться в соответствии с принципами радиационной защиты человека. В сообщении Р. Алексахина (Россия), представлены результаты реализации единого подхода к оценке действия ионизирующего излучения на животных, растительные организмы и человека, для территории, подвергшейся радиоактивным выпадениям после аварии на Чернобыльской АЭС. С. Гераськиным, А. Удаловой, Т. Цыб, Е. Ульяновой (Россия) и С. Mothersill (Канада) были продемонстрированы результаты экспериментальных исследований ответных реакций растительных и животных организмов на радиационное воздействие на различных уровнях биологической организации - клеточном, организменном, популяционном. Особый интерес участников конференции вызвало обсуждение проблем, находящихся в стадии активного изучения. К таким проблемам относятся последствия низкодозового и сочетанного воздействия техногенных стрессоров на биологические объекты, феномен радиоадаптации, "байстандер-эффект".

Сообщения, представленные Р. Borretzen (Норвегия), N. Beresford (Великобритания) и рядом специалистов из США - С. Yu, S. Domotor, K. Higley, посвящены вопросам разработки программных комплексов, предназначенных для расчета дозовых нагрузок на объекты окружающей среды. В состав программных пакетов входят миграционные и дозиметрические модели, применимые для широкого спектра радионуклидов и видов биоты. Результаты оценки дозовых нагрузок на отдельные визы растений и животных для конкретных, загрязненных радионуклидами территорий, отражены в сообщениях А. Крышева (Россия) и R. Aliott (Великобритания). В меньшей степени освещена проблема оценки влияния радиационного фактора на природные системы, представляющие собой совокупность связанных между собой компонент. В докладах М. Doi (Япония) и С. Спиридонова (Россия) представлены результаты применения системного подхода для описания последствий действия ионизирующего излучения на совокупность популяций простейших одноклеточных организмов и древесный ярус лесного биогеоценоза.

Актуальные проблемы, связанные с необходимостью оперативного реагирования в условиях поступления радиоактивных веществ в окружающую среду рассматривались в рамках сессии "Готовность к чрезвычайным ситуациям - модели и системы". F. Ugletveit (Норвегия) представил план действий, применимый в случае ядерных аварий и крупномасштабных террористических актов. При разработке плана использовались идеи о тесном международном сотрудничестве в сфере обмена информацией и выполнении действий, направленных на устранении последствий чрезвычайных ситуаций. Доклады М. Bradley (США) и J. Sorensen (Дания) посвящены моделям, реализованным в виде программных комплексов и описывающих перенос радионуклидов, химических и биологических токсикантов в атмосфере. В ряде сообщений были освещены более частные вопросы – создание передвижных лабораторий для экспрессного проведения измерений (Р. Smolander (Финляндия), J. Feichtinger (Австрия)).

В рамках сессии "Оценка и управление риском" обсуждались результаты исследований по направлениям, имеющим отношение к актуальной проблеме определения рисков влияния радиационного фактора на объекты окружающей среды и человека. Оригинальный подход к оценке рисков для биоты, основанный на разработке концепции радиочувствительности различных экосистем и их классификации по этому показателю, предложен в докладе С. Mercat-Rommens (Франция). Методология оценки рисков воздействия ионизирующего излучения и химических токсикантов на здоровье человека представлена В. Деминым (Россия). В докладе Ю. Агеец (Белоруссия) обосновано применение территориального подхода, основанного на использовании экономических и радиологических критериев, в сочетании с комплексом математических моделей для выработки оптимальных путей реабилитации областей Белоруссии, загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС.

Ряд сообщений, сделанных S. Chouhan (Канада), М. Нагvey (Великобритания), М. Іоѕјре (Норвегия), В. Lauritzen (Дания) и R. Avila (Швеция), посвящен разработке и применению моделей, описывающих распространение радионуклидов в различных природных средах (атмосфера, водные и наземные экосистемы) и позволяющих оценить дозовые нагрузки на различные виды биоты и человека. Подходы к прогнозированию долговременных последствий захоронения радиоактивных отходов, основанные на использовании гидрогеологических и сукцессионных моделей обсуждались в докладах S. Xu (Швеция) и Р. Rautio (Финляндия). Интересное, с методической точки зрения сообщение, касающееся разработки технологии глобального анализа чувствительности моделей, применимой для оценки рисков, сделано Р. Exstrom (Швеция).

В рамках сессии "Перенос радионуклидов природных средах" обсуждались закономерности миграции радионуклидов и факторы, определяющие их поведение в наземных и водных экосистемах. В докладе R. Saxen (Финляндия) представлены результаты долговременных исследований распределения биологически значимых радионуклидов в воде 35-ти озер Финляндии, используемых населением для ловли рыбы и в качестве источника питьевой воды. Сообщение G. Zibold (Германия) посвящено особенностям сезонной динамики накопления <sup>137</sup>Сs в мышцах лесных животных (косуль). Автором сообщения продемонстрирована интересная экспериментальная информация, синтезированная в форме математической модели, описывающей миграцию <sup>137</sup>Сѕ в лесной экосистеме.

В докладе А. Straczek (Бельгия) приведены результаты модельных экспериментов, в которых оценена токсичность урана по его влиянию на скорость роста и биомассу корневых волосков моркови (Daucus carota L.). Сделано заключение о возможности использования разработанной методики в качестве адекватного инструмента для оценки поражающего действия этого химического элемента. На другой модельной культуре (растения салата) оценивали перенос <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co и <sup>40</sup>К в системе почварастение (L. Visciano (Италия)). Процессы переноса и механизмы, контролирующие подвижность радионуклидов (и тяжелых металлов), рассмотрены в докладах Л. Ульяненко (Россия) и И. Лиштван (Белоруссия). Отмечено, что такие агрохимикаты, как гуматы Na и К могут снижать перенос ионов металлов, а применение других физиологически активных веществ - приводить к изменению перехода <sup>137</sup>Сs из почвы в растения при полифакторном загрязнении. Проблемам моделирования миграции радионуклидов в луговых экосистемах, расположенных на территории Семипалатинского испытательного полигона, посвящен доклад С. Спиридонова (Россия). В докладах D. Keum (Корея) и V. Putyrskaya (Германия) представлены модели поведения радионуклидов в компонентах аграрных и водных экосистем.

На 6-ой Международной конференции "Радиоактивность в Арктике и Антарктике" были сделаны сообщения, затрагивающие различные направления современной радиоэкологии в применении к арктической и антарктической природным зонам - мониторинг окружающей среды; изучение путей распроразработка радионуклидов; странения миграционных математических моделей; оценка рисков, связанных с хранением и транспортировкой радиоактивных материалов. Все эти направления освещены в докладе L. Reiersen, представляющего Арктическую мониторинговую программу, в рамках которой, начиная с 1991 г. проводился сбор информации и выполнялись оценки последствий радиоактивного загрязнения арктических областей.

Интересный доклад, в котором приводятся результаты прогнозирования последствий гипотетических аварийных ситуаций на атомных электростанциях, расположенных на северных территориях Российской Федерации и в Финляндии, представлен А. Baklanov (Дания). Предложенный в этом сообщении методологический подход в совокупности с методами оценки радиационного риска может быть использован для принятия решений, направленных на снижение потенциального ущерба от аварийных ситуаций на АЭС. В докладе Ю. Сивинцева (Россия) обсуждается проблема захоронения радиоактивных отходов в морях, окружающих Российскую Федерацию. Автором сообщения сделан вывод о том, эти отходы не представляют существенной опасности для населения и объектов окружающей среды. Доклады Е. Коробовой, А. Болсуновского, А. Никитина (Россия), J. Brown (Норвегия), S. Rollin (Швейцария) посвящены анализу содержания долгоживущих радионуклидов в сибирских реках –Енисее и Оби.

Материалы, представленные на 2-ой Международной конференции "Радиоактивность в окружающей среде" и 6-ой Международной конференции "Радиоактивность в Арктике и Антарктике", отражают состояние дел во всех сферах современной радиоэкологии. На основе анализа итогов работы конференций можно сделать вывод о том, что одними из приоритетных направлений исследований являются разработка принципов оценки воздействия ионизирующих излучений на объекты окружающей среды, анализ последствий низкодозового и сочетанного воздействия техногенных стрессоров на биологические объекты, идентификация механизмов, объясняющих феномен радиоадаптации и "байстандер-эффект". Миграционное направление радиоэкологии находит свое развитие в создании моделей и компьютерных систем, интегрирующих накопленную экспериментальную информацию и позволяющих прогнозировать поведение радионуклидов в природных объектах и дозовые нагрузки на живые организмы. Использование таких компьютерных пакетов в сочетании с методами расчета радиационного риска даст возможность решать прикладные задачи, связанные с оценкой последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды для человека и биоты. Таким образом, работа Международных конференций в Ницце позволила проанализировать результаты и наметить перспективы дальнейших радиоэкологических исследований.

### Литература

1. Научно-техническая программа "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан". Утверждена Постановлением Правительства РК № 405 от 12 апреля 2004 г.

### «ҚОРШАҒАН ОРТАДАҒЫ РАДИОАКТИВТІЛІК» ЖӘНЕ «АРКТИКАДАҒЫ ЖӘНЕ АНТАРКТИКАДАҒЫ РАДИОАКТИВТІЛІК» ХАЛЫҚАРАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯСЫНЫҢ МАТЕРИАЛДАРЫ БОЙЫНША АНЫҚТАМАЛЫҚ ПАРАҚ

#### Спиридонов С.И., Ульяненко Л.Н.

Бүкілресейлік ауылшаруашылық радиология және агроэкология ҒЗИ, Обнинск, Ресей

### INFORMATION SHEET ON THE MATERIALS OF INTERNATIONAL CONFERENCE "ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY" AND "RADIOACTIVITY IN THE ARCTIC AND THE ANTARCTIC"

S.I. Spiridonov, L.N. Ul'yanenko

All-Russian SRI of Agricultural Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Акаев А.С., 24 Васильев Ю.С., 24, 31, 35 Габсатарова И.П., 43 Гринштейн Ю.А., 53 Жолдыбаев А.К., 53 Зверев В.В., 24 Иркимбеков Р.А., 18 Котов В.М., 3, 10, 18 Котов С.В., 18 Краев Ю.А., 43 СПИСОК АВТОРОВ

Кукушкин С.М., 31, 35 Логвинов О.А., 68 Логвинов О.В., 53 Лукашенко С.Н., 36 Мурзадилов Т.Д., 53, 68 Насонов С.Г., 36 Нугуманов Д.К., 24 Пивоваров О.С., 36 Политиков И.М., 68 Политиков М.И., 68 Прозорова И.В., 3 Райханов Н.А., 3 Романенко Р.Ф., 31, 35 Спиридонов С.И., 80 Старовойт О.Е., 43 Супрунов В.И., 31 Тихомиров Л.Н., 36 Тухватулин Ш.Т., 36 Ульяненко Л.Н., 80 Цынгаев В.М., 31, 35, 36

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в виде электронной (на гибком диске или по электронной почте присоединенным (attachment) файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата A4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 25 мм; справа 15 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi).

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Текст печатается через один интервал, между абзацами 2 интервала.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 3 интервала, печатается основной текст.

### При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия, города и страны местонахождения организации, которую они представляют;
- ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТу;
- иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере или в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка;
- математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation. Химические формулы и символы должны быть набраны при помощи инструментов Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

### К статье прилагаются следующие документы:

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- на отдельном листе автор сообщает сведения о себе: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, кафедра и указывает служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, адрес электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

**Ответственный секретарь** к.ф.-м.н. М.К. Мукушева тел. (095) 745-54-04, (322-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

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

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

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2001.

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000г. Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии Национального ядерного центра Республики Казахстан 490060, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 6.

