

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
Издается в Институте
атомной энергетики
с 1993 г.
N1 • ОБНИНСК • 1999

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ
И РАДИОАКТИВНЫЕ
ОТХОДЫ

М.Ф. Троянов Исследования ториевого топливного цикла (предисловие к публикации докладов российско-индийского семинара).....	3
В.И. Волк, А.Ю. Вахрушин, Б.С. Захаркин, С.Л. Мамаев, В.С. Власов Новые решения процесса переработки торий-уранового топлива.....	5
П.Н. Алексеев, Е.С. Глушков, А.Г. Морозов, Н.Н. Пономарев-Степной, С.А. Субботин, Д.Ф. Цуриков Концепция возможного вовлечения тория в ядерно-энергетический сектор.....	10
Г.Н. Казанцев, И.С. Курина, И.Я. Овчинников, В.В. Попов, В.Н. Сугоняев Технологические возможности создания топливных композиций, содержащих торий.....	19
В.М. Декусар, Е.В. Долгов, В.Г. Илюнин, А.Г. Калашников, В.А. Пивоваров, М.Ф. Троянов, З.Н. Чижикова, В.Н. Шарапов Пути и возможности использования ториевого цикла в легководных и быстрых реакторах.....	25
В.И. Голубев, А.В. Звонарев, Г.Н. Мантуров, Ю.С. Хомяков, А.М. Цибуля Интегральные эксперименты на критических сборках и реакторах в обоснование уран-ториевого цикла.....	32
А.В. Звонарев, Б.Я. Зильberman, В.И. Иванов, Н.А. Нерозин, В.Б. Павлович, Б.А. Петрухин, Ф.П. Раскач, Э.Я. Сметанин, Л.В. Сытник, М.Ф. Троянов, Ю.С. Хомяков, Л.А. Чернов, И.Г. Шейнкер Исследование тория, облученного в боковом экране быстрого реактора, и тепловом спектре графитового реактора.....	37

ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
РОССИИ

А. Ю. Гагаринский Пересекая пустыню.....	42
--	----

БЕЗОПАСНОСТЬ,
НАДЕЖНОСТЬ И
ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

А.В. Антонов К вопросу оценки неопределенностей моделей при проведении вероятностного анализа безопасности энергоблоков атомных электростанций.....	50
А.О. Скоморохов, М.Т. Слепов Контроль достоверности информации в системе вибродиагностики Нововоронежской АЭС.....	56

ЭКОЛОГИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ

Т.В. Мельникова, Л.П. Полякова, Г.В. Козьмин Основные задачи экологической оценки свойств вторичных веществ, возникающих в результате облучения загрязненной пищевой продукции.....	66
--	----

ФИЗИКА И ТЕХНИКА
РЕАКТОРОВ

О.Н. Александрова, Н.В. Пашацкий Энергетический подход к решению задачи управления плазменным шнуром токамака через газонапуск.....	75
Г.Л. Хорасанов, А.П. Иванов, В.В. Коробейников, А.И. Блохин, А.Л. Шимкевич Свинцовый теплоноситель для быстрого реактора-выжигателя с жестким спектром нейтронов.....	80
И.Р. Багдасарова, В.А. Галкин Моделирование периодических структур в распределении дефектов, возникающих в конструкционных материалах ЯЭУ, под действием стационарного источника.....	85
М.Г. Ткаченко, В.А. Галкин Численное решение уравнений власовского типа с разрывными коэффициентами, возникающих при моделировании ЯЭУ.....	94

ТЕПЛОФИЗИКА

В.Т. Буглаев, А.С. Стребков Расчетная оценка эффективности испарительного охлаждения парового потока.....	105
Ю.В. Липовцев Излучение плоского слоя рассеивающей среды с источниками объемного тепловыделения.....	111

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
В ЛИЦАХ. PERSONALIA

Я.Д. Зельвенский Академик Российской Академии наук И.В. Петрянов и подготовка кадров для атомной промышленности.....	117
---	-----

CONTENTS

FUEL CYCLE AND RADIOACTIVE WASTES MANAGEMENT

M.F.Troyanov

Thorium Fuel Cycle Investigations (Foreword for Proceedings of Russian-Indian Seminar).....3

V.I.Volk, A.Yu.Vakhrushin, B.S.Zakharkin, S.L.Mamaev, V.S.Vlasov

New Solutions for Thorium-Uranium Fuel Reprocessing.....5

P.N.Alekseev, E.S.Glushkov, A.G.Morozov, N.N.Ponomarev-Stepnoy, S.A.Subbotin, D.F.Tsurikov

Concept of Possible Involving of Thorium in Nuclear Power Industry.....10

G.N.Kazantsev, I.S.Kurina, I.Ya.Ovchinnikov, V.V.Popov, V.N.Sugonyaev

The Technological Possibilities of Fabrication Thorium-Containing Fuel Composition.....19

V.M.Dekusar, E.V.Dolgov, V.G.Ilunin, A.G.Kalashnikov, V.A.Pivovarov, M.F.Troyanov, Z.N.Chizhikova, V.N.Sharapov

Ways and Possibilities of Thorium Cycle Application for Light Water and Fast Reactors.....25

V.I.Golubev, A.V.Zvonarev, G.N.Manturov, Yu.S.Khomyakov, A.M.Tsiboulia

Integral Experiments on Critical Facilities and Reactors for Basing of Uranium-Thorium Cycle.....32

A.V.Zvonarev, B.Ya.Zil'berman, V.I.Ivanov, N.A.Nerozin, V.B.Pavlovich,

B.A.Petrukhin, F.P.Raskach, E.Ya.Smetanin, L.V.Sytnik, M.F.Troyanov, Yu.S.Khomyakov, L.A.Chernov, I.G.Sheynker

Investigation of Thorium Irradiated in Lateral Blanket of Fast Reactor and in Thermal Spectrum of Graphite Reactor.....37

NUCLEAR SOCIETY RUSSIA

A.Yu.Gagarinsky

Crossing Desert.....42

SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP

A.V. Antonov

On the Problem of Estimation of Model Uncertainties During Probabilistic Analysis Providing Nuclear Power Plant Unit's Safety.....50

A.O.Skomorokhov, M.T.Slepov

Information Authenticity Control in Vibro-Diagnostics System of the Novovoronezh NPP.....56

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING

T.V.Melnikova, L.P.Polyakova, G.V.Kozmin

Main Objectives of the Ecological Estimation of Properties of Secondary Substances Formed after Contaminated Food Irradiation.....66

REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY

O.N.Alexandrova, N.V. Pashatsky

The Energetic Approach to Solve the Problem of Tokamak Plasma Control with Gas Puffing.....75

G.L.Khorasanov, A.P.Ivanov, V.V.Korobeinikov, A.I.Blokhin, A.L.Shimkevich

Lead Coolant for Fast Reactor-Burner with Hard Neutron Spectrum.....80

I.R.Bagdasarova, V.A. Galkin

Simulation of Periodic Structures in Distribution of Defects, Generated in NPP Structures Materials by the Stationary Source.....85

M.G.Tkachenko, V.A.Galkin

Numerical Solution of Vlasov Equation with Noncontinuous Coefficients Applied to NPP Simulation.....94

THERMAL PHYSICS

V.T.Buglaev, A.S.Strebkov

Analytical Estimation of the Efficiency of Steam Flow Transpiration Cooling.....105

Yu.V. Lipovtsev

Radiation from a Flat Layer of Scattering Medium with Volume Sources of Heat Generation.....111

УДК 621.039.544.55

ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

(ПРЕДИСЛОВИЕ К ПУБЛИКАЦИИ ДОКЛАДОВ РОССИЙСКО-ИНДИЙСКОГО СЕМИНАРА)

В соответствии с договоренностью Минатома РФ и Комиссии по атомной энергии Индии 18-20 ноября 1998 г. в ГНЦ РФ – ФЭИ состоялся двухсторонний семинар по проблемам ториевого топливного цикла в атомной энергетике.

Индия в настоящее время наиболее активно по сравнению с другими странами ведет работы по ториевому циклу и рассматривает этот цикл как важный этап своей национальной программы развития ядерной энергетики. В Индии осуществлена наработка и выделение урана-233 в количествах, позволивших провести большой цикл исследований, и в настоящее время там работает небольшой реактор мощностью 30 кВт с топливом из урана-233 в алюминиевой матрице. Осуществляется загрузка тория в энергетические тяжеловодные реакторы. Разрабатывается перспективный реактор этого типа для ториевого цикла.

Российские исследования по ториевому циклу ведутся на уровне концептуальных проработок и лабораторных исследований. Однако на уровне лабораторных исследований выполнен значительный объем работ по ядерным данным для ториевого цикла, по физике реакторов, содержащих торий, по облучению и анализ облученных образцов физическими и радиохимическими методами, причем изучение облученных образцов тория позволило получить и технологический опыт переработки тория и обращения с ураном-233.

В совокупности работы разных групп специалистов в нескольких институтах России содержат достаточно много ре-

зультатов и предложений по развитию ториевого цикла, этот материал был вынесен с российской стороны на семинар, с интересом и вниманием был воспринят индийскими специалистами. Российские доклады на семинаре представляются ниже. Помимо предлагаемых докладов, с нашей стороны было сделано обзорное сообщение о состоянии ядерных данных для ториевого цикла. Статья на эту тему опубликована в сборнике “Ядерные константы” (вып. 3-4, 1997 г.).

Кроме того, сверх программы на семинаре было сделано сообщение Б. П. Кочурова (ИТЭФ) “Некоторые варианты утилизации тория”.

Надо отметить, что в последние годы обсуждение проблем ториевого топливного цикла стало более активным. Прошло несколько консультативных совещаний в МАГАТЭ с участием широкого круга экспертов, ториевый цикл был предметом специальной секции конференции ICENEC-98 и др. Повышение интереса к ториевому циклу стимулируется факторами различной значимости для разных стран, но общий список (возможно, неполный) включает в себя:

- расширение ресурсной базы ядерной энергетики; усовершенствование реакторов различных типов по топливоиспользованию, по безопасности, по устойчивости к отвлечению ядерных материалов;
- возможность создания гибких топливных циклов с использованием всех делящихся и сырьевых материалов;
- создание систем, управляемых ускорителями, на основе ториевого blankets;

- появление новой сферы деятельности для ученых и специалистов, особенно для занимавшихся ранее оборонной деятельностью.

Для большей части стран со значимым весом ядерной энергетики вовлечение тория не является первоочередной задачей и для них (как, вероятно, и для России) путь к ториевому циклу будет долгим и эволюционным.

Но истинное понимание путей развития ториевого топливного цикла, трудно-

стей и способов их преодоления появится только при практическом подходе и проведении исследований.

Участники семинара в своих докладах отразили те ближайшие задачи, которые можно было бы решать без больших затрат, развивая и уточняя понимание путей, возможностей и целесообразности вовлечения тория в ядерную энергетику.

Руководитель семинара с российской стороны, д.т.н. М.Ф. Троянов

УДК 621.039.516.4:621.039.59

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ТОРИЙ-УРАНОВОГО ТОПЛИВА*

В.И.Волк, А.Ю.Вахрушин, Б.С.Захаркин, С.Л.Мамаев, В.С.Власов
ГНЦ РФ - ВНИИМ им. академика А.А.Бочвара



Для замкнутого торий-уранового топливного цикла с расширенным воспроизводством ^{233}U предложена новая технологическая схема репроцессинга, основанная на сочетании кристаллизационных и экстракционных операций. Схема предусматривает упаривание раствора, полученного при растворении топлива и кристаллизацию нитрата тория из охлажденного кубового раствора. Объем потока, содержащего ^{233}U и поступающего на экстракционную переработку, уменьшается в 10-30 раз. Экстракционная переработка обеспечивается экстрагентами, не образующими с сольватами тория второй органической фазы. Сокращение объемов перерабатываемых потоков обеспечивает быструю регенерацию ^{233}U и последующую рефабрикацию топлива, минимально усложненную продуктами распада четных изотопов урана.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из преимуществ торий-уранового цикла принято считать значительно меньший уровень накопления долгоживущих радионуклидов (Np, Am, Cm), по сравнению с уран-плутониевым циклом. При этом принимается, что денатуризация ^{233}U четными изотопами ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U препятствует военному использованию ^{233}U . Другой стороной проблемы являются растущие цены на уран и наличие в настоящее время достаточного количества делящегося материала (^{239}Pu , ^{235}U), необходимого для запуска торий-уранового цикла. Учитывая эти обстоятельства, вполне вероятно принятие решения в какой-либо из стран со значительными запасами тория о запуске этого топливного цикла.

Процесс Интерим-23, разработанный для переработки ториевого топлива, рассматривает только извлечение урана, оставляя проблему тория без решения. Торекс-процесс, предполагающий очистку обоих компонентов, становится громоздким и энергоемким из-за необходимости обработки разбавленных урановых реэкстрактов [1].

Другой проблемой является высокий фон γ -излучения как природного (или облученного) тория, так и получаемого ^{233}U , за счет наличия в них продуктов распада четных изотопов с жестким спектром. Изготовление топлива из таких материалов возможно либо дистанционно, либо непосредственно после химической очистки, до накопления продуктов распада до высокого уровня.

Исходя из этих соображений, мы постарались пересмотреть структуру технологической переработки ториевого топлива, чтобы сделать этот процесс экономически эффективным.

© В.И.Волк, А.Ю.Вахрушин, Б.С.Захаркин, С.Л.Мамаев, В.С.Власов, 1999

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу (Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ НИТРАТА ТОРИЯ

Поскольку вопрос вторичного использования тория не решен, конечным продуктом технологии должно быть соединение тория, в виде которого его можно хранить (до распада основного количества ^{228}Th) и которое позволяет легко направить торий на вторичную очистку без значительных реагентных затрат. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет нитрат тория, поэтому мы исследовали возможность отделения основной массы тория от урана кристаллизационными методами.

Рис.1 показывает изотерму растворимости четверной системы $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Th}(\text{NO}_3)_4\text{-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$, построенную методом сечений при постоянной концентрации азотной кислоты (для наглядности диаграмма повернута водным углом вперед). Изотермическая кривая на диаграмме представлена тремя ветвями. Первая ветвь АВ отвечает кристаллизации твердой фазы состава $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, вторая ветвь ВС - $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и третья CD - $\text{Th}(\text{NO}_3)_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Вне зависимости от концентрации азотной кислоты, характер кривой растворимости не претерпевает изменений, поэтому на рис.1 были выделены только бивариантные точки В, а также моновариантные С.

В результате математической обработки массива экспериментальных данных были получены две полиномиальные зависимости: равновесная концентрация тория в жидкой фазе от равновесных концентраций урана и азотной кислоты, и равновесная концентрация урана в жидкой фазе от равновесных концентраций тория и азотной кислоты, имеющих следующий вид:

$$C_{\text{Th}} = 0,204C_{\text{U}}^3 - 0,696C_{\text{U}}^2 - 0,465C_{\text{U}} + 0,074C_{\text{U}}^2C_{\text{HNO}_3} - 0,322C_{\text{U}}C_{\text{HNO}_3} + 0,034C_{\text{U}}C_{\text{HNO}_3}^2 - 0,219C_{\text{HNO}_3} + 2,875 \quad (1)$$

$$C_{\text{U}} = 0,071C_{\text{Th}}^3 + 0,29C_{\text{Th}}^2 - 0,778C_{\text{Th}} - 0,008C_{\text{Th}}^2C_{\text{HNO}_3} - 0,145C_{\text{Th}}C_{\text{HNO}_3} + 0,017C_{\text{Th}}C_{\text{HNO}_3}^2 - 0,134C_{\text{HNO}_3} + 2,141, \quad (2)$$

где C_{Th} , C_{U} и C_{HNO_3} - равновесные концентрации в жидкой фазе тория, урана и азотной кислоты соответственно, моль/л.

Для оценки поведения азотной кислоты при упаривании торий - урановых растворов были получены данные по равновесию пар - жидкость системы $\text{Th}(\text{NO}_3)_4\text{-UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при атмосферном давлении. Из этих данных следует, что нитраты уранила и тория высаливают азотную кислоту в паровую фазу как в отдельности, так и при совместном присутствии - с ростом концентрации солей, при постоянной концентрации азотной кислоты, ее концентрация в конденсате пара возрастает.

В результате математической обработки массива экспериментальных данных была получена полиномиальная зависимость логарифма равновесной концентрации азотной кислоты в конденсате паровой фазы от концентрации тория, урана и азотной кислоты в жидкой фазе, имеющая следующий вид:

$$\ln C_{\text{конд}} = 42,79C_{\text{U}}^3 + 0,113C_{\text{Th}}^3 - 0,09C_{\text{U}}^2C_{\text{HNO}_3} - 25,08C_{\text{U}}^2 - 0,44C_{\text{Th}}^2 - 0,19C_{\text{U}}C_{\text{Th}}C_{\text{HNO}_3} + 1,37C_{\text{HNO}_3} + 3,83C_{\text{U}} + 1,43C_{\text{Th}} - 5,3 \quad (4)$$

где $C_{\text{конд}}$ - равновесная концентрация азотной кислоты в конденсате паровой фазы, моль/л C_{Th} , C_{U} и

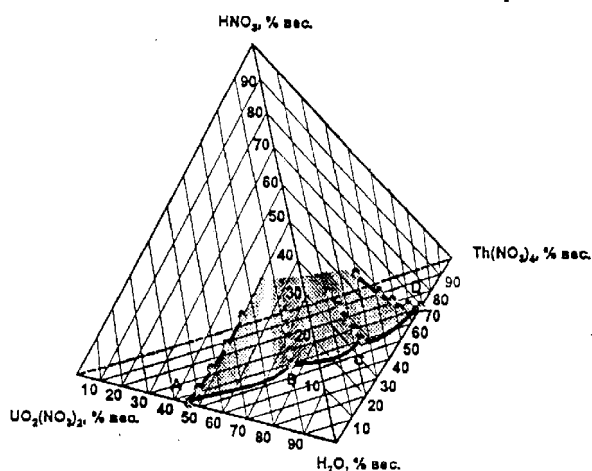


Рис.1. Диаграмма кристаллизации системы $\text{Th}(\text{NO}_3)_4\text{-UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C

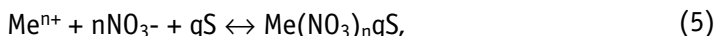
C_{HNO_3} - равновесные концентрации в жидкой фазе тория, урана и азотной кислоты соответственно, моль/л.

Из полученных данных следует, что упариванием растворов и кристаллизацией нитрата тория могут быть получены маточные растворы с содержанием урана до $0,5 \div 0,6$ моль/л. Более глубоким упариванием (до 900 г/л по Th) и охлаждением маточного раствора можно получить совместный плав нитратов урана и тория, удобный для промежуточного хранения или транспортировки, с одновременной отгонкой значительной части как азотной, так и фтористоводородной кислоты, которая используется при растворении любого вида ториевого топлива.

ЭКСТРАКЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ТОРИЯ И УРАНА ТРИАЛКИЛФОСФАТАМИ

Основной сложностью при экстракционной переработке четырехвалентных актинидов является ограниченная растворимость их сольватов с ТБФ в нормальных углеводородных разбавителях [2], поэтому были подробно исследованы системы ТБФ-гексахлорбутадиен и триизоамилфосфат- n-парафин [3, 4]. В первой системе вторая органическая фаза не образуется вообще, а во второй появление третьей фазы наблюдается при концентрации тория в равновесной водной фазе выше 200 г/л и концентрации азотной кислоты более 6 моль/л.

На основании полученного массива экспериментальных данных была разработана математическая модель, описывающая распределение азотной кислоты, тория и урана в данных системах. Модель описывает двухфазное равновесие на основе закона действующих масс:



где S - экстрагент, q - сольватное число. При этом учитывается наличие нескольких сольватов извлекаемых компонентов:

$$Y_{Me} = X_{Me} X_{NO_3} \gamma_{\pm}^{n+1} \sum K_i S^{q_i}, \quad (6)$$

где Y и X - концентрации компонентов в органической и водной фазах, соответственно, K_i - эффективные константы экстракции сольватов, $\gamma_{\pm}$ - среднеионные активности компонентов в водной фазе, которые для смеси электролитов рассчитывали из условий изопиестичности в соответствии с правилом Здановского.

Полученные результаты показали, что в обеих системах азотная кислота экстрагируется в виде негидратированного полусольвата и гидратированных ди- и полусольватов, торий - в виде три- и дисольвата и уран - в виде дисольвата. Значения констант экстракции для исследованных систем приведены в табл.1. Модель адекватно описывает распределение компонентов в широком диапазоне их концентраций (среднее отклонение расчетных и экспериментальных данных ~5%) и была использована для оптимизации экстракционного разделения урана и тория.

Предварительное концентрирование урана позволяет использовать обратную последовательность выделения компонентов, отличную от классического Торекс-процесса. Благодаря высокой стартовой концентрации урана в маточниках от кристаллизации, он вытесняет торий из экстракта в зоне подачи питающего раствора, а при создании в зоне отмывки урана от тория условий для реэкстракции урана, последний накапливается в ступени подачи питающего, приводя к предельному насыщению экстрагента ураном (рис.2). При соответствующей балансировке питающего, промывного растворов и экстрагента, в разделительном блоке получается экстракт урана не содержащий тория и водный ториевый рафинат, содержащий следы урана.

СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРИЙ-УРАНОВОГО ТОПЛИВА

Возможная схема кристаллизационно-экстракционной переработки топлива показана

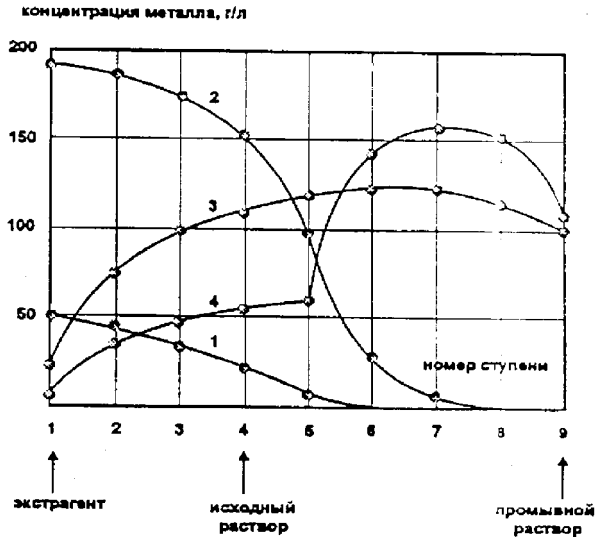


Рис.2. Профили концентраций урана и тория в водной и органической фазах разделительного экстракционного блока: 1, 2 - концентрации тория в органической и водной фазах соответственно; 3, 4 - концентрации урана в органической и водной фазах соответственно

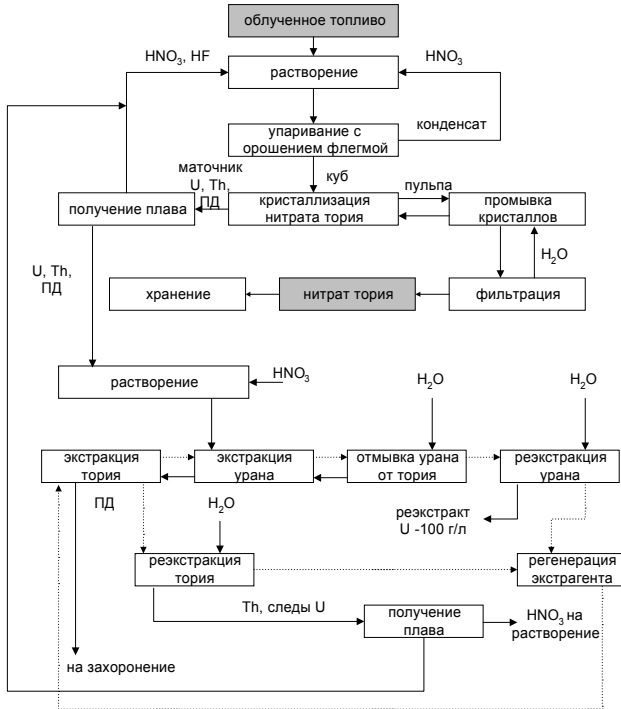


Рис.3. Принципиальная схема переработки торий-уранового топлива

на рис.3. Топливо, после растворения с добавкой фторид-иона, упаривается и из кубового раствора кристаллизуется нитрат тория, который после противоточной отмывки от урана и продуктов деления поступает на хранение. Маточник от кристаллизации целесообразно упаривать до получения совместного плава нитратов тория и урана, т.к. это позволит практически полностью вернуть фтористоводородную кислоту на операцию растворения, исключив повышенную коррозию оборудования на всех последующих этапах обращения с концентратом. Кроме того, в компактном виде плавы более удобно хранить до полного распада ²³³Ra (~ 2 года).

Вытеснительное разделение тория и урана при экстракционной переработке маточников с предельным насыщением экстракта ураном позволяет получать концентрированные реэкстракты урана, пригодные для получения оксидных топливных форм, что выгодно отличает эту схему от Торекс-процесса.

Рафинат от разделения, содержащий торий и продукты деления может не перерабатываться и сразу поступать на захоронение, поскольку 95-99% тория извлекается на кристаллизационной операции. Возможна очистка рафината либо в отдельном цикле экстракция-реэкстракция, либо отбором части экстракта тория в едином цикле с последующей реэкстракцией, как показано на рис.3.

Таблица 1

Эффективные константы экстракции азотной кислоты, нитрата тория и уранилнитрата триалкилфосфатами

Сольват	Константа	Значение констант в системе	
		ТБФ-ГХБД	ТиАФ-парафин
$\text{HNO}_3\text{ТБФ}$	K_{H1}	0.213	0.162
$\text{HNO}_3\text{2ТБФ}$	K_{H2}	0.259	0.394
$2\text{HNO}_3\text{ТБФ}$	$K_{\text{H/2}}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$
$\text{Th}(\text{NO}_3)_4\text{2ТБФ}$	K_{Th2}	2.72	1.75
$\text{Th}(\text{NO}_3)_4\text{3ТБФ}$	K_{Th2}	1190	1650
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{2ТБФ}$	K_{U}	57	92

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что данный подход к переработке торий-уранового топлива базируется на выпарных и кристаллизационных операциях, он позволяет примерно в 5 раз снизить объемы упариваемых растворов, по сравнению с самой экономической версией Торекс-процесса. Это связано с отсутствием в технологии растворов с низкой концентрацией урана, образующихся при его извлечении из растворов топлива с его низким содержанием.

Кроме того, образующийся разрыв между кристаллизационным и экстракционным циклом делает технологию более гибкой. Автономность и компактность экстракционного передела дает возможность разместить его в непосредственной близости от производства топлива на основе ^{233}U . Это позволит использовать для снаряжения ТВС свежеоочищенный (не содержащий или содержащий минимально продукты распада с жестким γ -спектром) уран, т.е. без специальных методов или дополнительной защитой.

Список литературы

1. Столер С., Ричардс Р. Переработка ядерного горючего. - М.: Атомиздат, 1964.
2. Николотова З.И. Экстракция нейтральными органическими соединениями: Справочник. - М.: Энергоиздат, 1987.
3. Волк В.И., Захаркин Б.С., Вахрушин А.Ю., Розен А.М., Мамаев С.Л., Власов В.С. Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по химии экстракции. - Адлер, 1991. - С.209.
4. Розен А.М., Волк В.И., Захаркин Б.С., Вахрушин А.Ю., Мамаев С.Л., Власов В.С., Адаев Д.П. // Радиохимия. -1992. - Т.34. - 2. - С. 41-57.

Поступила в редакцию 21.12.98.

КОНЦЕПЦИЯ ВОЗМОЖНОГО ВОВЛЕЧЕНИЯ ТОРИЯ В ЯДЕРНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СЕКТОР*

П.Н. Алексеев, Е.С. Глушков, А.Г. Морозов, Н.Н. Пономарев-Степной,
С.А. Субботин, Д.Ф. Цуриков

РНИИ РФ- Курчатовский институт, г. Москва



В современной мировой ядерной энергетике освоен замкнутый уран-плутониевый топливный цикл, который дает основание для развития будущей крупномасштабной ядерной энергетике. Пока не существует веских причин для замены его на замкнутый торий-урановый топливный цикл, однако имеется постоянный интерес увеличить сырьевую базу ядерной энергетике, дополнив ее ториевым топливом.

Российским научным центром - Курчатовский институт в кооперации с организациями Минатома ведутся работы по ториевой проблеме, включающие в себя физические, материаловедческие и технологические разработки, поиски оптимальной компоновки реактора и эффективных путей вовлечения тория в ядерную энергетике на основе комплексного технико-экономического и радиологического анализа.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный интерес к торию определяется рядом его преимуществ [1]:

- большая сырьевая база;
- пониженное содержание плутония и актинидов в облученном ториевом топливе;
- хороший нейтронный баланс в реакторах на тепловых нейтронах;
- хорошие технологические свойства и высокая радиационная стойкость.

В то же время торию присущи и недостатки, среди которых:

- присутствие в облученном ториевом топливе изотопа U-232, что в значительной мере определяет технологические трудности обращения с топливом при рециклировании;

- образование протактиния-233, что ухудшает нейтронный баланс и создает определенные трудности в управлении реактором.

В будущей крупномасштабной ядерной энергетике с замкнутыми нейтронно- избыточным U-Pu и нейтронно-дефицитным Th-U ядерными топливными циклами возможна трехкомпонентная структура [2]. В данной структуре рассматривается система реакторов трех типов, которые, кроме производства энергии выполняют дополнительно различные функции:

© П.Н. Алексеев, Е.С. Глушков, А.Г. Морозов, Н.Н. Пономарев-Степной,
С.А. Субботин, Д.Ф. Цуриков, 1999

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу
(Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

- реакторы на быстрых нейтронах - воспроизводство ядерного топлива и обеспечение необходимого баланса нейтронов в системе (при их доле ~ 50%);
- реакторы на тепловых нейтронах - маневренные режимы, расширение сферы использования в топливно-энергетическом балансе и минимизация количества Pu в равновесном топливном цикле ЯЭ (их доля ~ 45%);
- реакторы-перезагрузчики, например, жидкосолевые реакторы, - замыкание топливного цикла по МА и минимизация долгоживущих радиоактивных отходов (РАО) (их доля ~ 5%).

Сейчас сложилась благоприятная ситуация, стимулирующая анализ дальнейших путей развития ЯЭ и, особенно, поиск путей привлечения и использования тория в ЯЭ. Снижение темпов развития ЯЭ временно сняло актуальность срочного решения проблемы исчерпания уранового топлива. Вернее, для решения этой проблемы предоставлено больше времени, чем ранее предполагалось. За это время без ненужной спешки, при приемлемой интенсивности вложения отпускаемых на решение фундаментальных проблем ЯЭ средств, могут быть проведены исследования в целях создания структуры оптимального топливного цикла ЯЭ с привлечением урана, тория, электроядерных и термоядерных источников нейтронов, и решения проблемы создания безотходного по актинидам топливного цикла ЯЭ. В частности, следует рассмотреть возможность выведения U-236 из топливного цикла для ограничения скорости генерации трансурановых (искусственных по отношению к природе) нуклидов.

Для реализации ядерного топливного цикла с расширенным воспроизводством топлива необходима комбинация делящегося и сырьевого материалов. В принципе можно использовать следующие их комбинации: U-238+делящийся изотоп, или/и Th-232+делящийся изотоп. В качестве делящегося изотопа можно использовать как природный U-235, так и искусственные Pu-239 или U-233. Эти циклы могут гармонично дополнять друг друга.

Конкретными шагами по реализации вовлечения тория в ЯЭ могут стать:

- в ближайшие 10 – 15 лет - использование тория в существующих LWR и FBR для улучшения их эксплуатационных характеристик и безопасности работы практически без изменения их конструкции; при этом за счет гомогенного введения тория в топливо, гетерогенного размещения тория в отдельных ТВЭлах или тория в комбинации с выгорающим поглотителем, использования тория в подвижных компенсаторах реактивности и создания ториевых экранов, возможно, удастся решить следующие задачи: оптимизация эффектов реактивности; улучшение физико-химических свойств топлива; увеличение запасов до предельных параметров; снижение запасенной энергии; повышение глубины выгорания; уменьшение утечки нейтронов;

- в ближайшие 10 – 20 лет – оптимизация конструкции и режимов работы ТВЭлов, ТВС, активной зоны существующих реакторов с учетом возможности использования тория и урана-233 для улучшения безопасности и экономичности, снижения скорости наработки трансурановых нуклидов в системе ЯЭ (при этом следует анализировать всевозможные топливные циклы, топлива, ЯЭУ, причем в различных комбинациях и предположениях);

- в течение 20 – 50 лет – исследование и создание способов наработки U-233 как в критических, так и в подкритических реакторах, с использованием электроядерных и термоядерных источников нейтронов; поиск оптимальных путей конверсии трансурановых нуклидов в делящиеся нуклиды в пределе - с переводом ядерного топливного цикла на режим производства энергии без сопутствующей генерации трансурановых нуклидов (при этом не следует упускать из внимания возможность заключительного этапа существования ЯЭ с ликвидацией всех опасных искусственных долгоживущих радионуклидов).

Интерес к использованию тория в настоящее время повышается также в связи с необходимостью утилизации высокообогащенного урана и плутония, высвобождающихся при демонтаже ядерного оружия. Схема плутоний-ториевого топливного цикла имеет важное значение с точки зрения проблемы нераспространения делящихся материалов.

Для практической реализации замкнутого торий-уранового топливного цикла потребуется значительное вложение средств. Однако, учитывая потенциальные возможности ториевого цикла и длительность этапа освоения новых топливных технологий, следует сейчас продолжить НИОКР по выбору оптимального использования тория как в действующих, так и в перспективных реакторах.

В качестве основных направлений вовлечения тория в ядерную энергетику в РНЦ "КИ" сейчас рассматриваются:

- ториевый легководный реактор ВВЭРТ с гетерогенной компоновкой ТВС активной зоны с топливом U-235 - Th-232 [3];
- быстрые жидкометаллический и газоохлаждаемый реакторы с ториевыми экранами [4];
- высокотемпературный газоохлаждаемый реактор с уран-ториевым топливом [5];
- жидкосолоевой реактор, работающий на расплавах фторидов U-233 и Th-232 [6].

ВНЕДРЕНИЕ ТОРИЕВОГО ТОПЛИВА В СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ ВВЭР-1000

Концепция активной зоны энергетического легководного реактора, в которой полностью реализуются положительные качества ториевого топлива, пока не разработана.

В начале девяностых годов появились работы А. Радковского, в которых была предложена концепция легководного уран-ториевого реактора, учитывающая сегодняшние потребности ядерной энергетики. А. Радковский долгое время работал в США, где принимал активное участие в программе ториевых экспериментов на реакторе "Шиппингпорт". Идеи А. Радковского были запатентованы им как концепция реактора RTR (Radkowsky Thorium Reactor).

В качестве исходных принципов реактора RTR были выбраны следующие:

- ни загружаемое, ни выгружаемое из реактора топливо не может быть использовано для производства ядерного оружия;
- в качестве загрузки реактора может быть использован оружейный или реакторный плутоний;
- значительная часть U-233 сжигается в этом же реакторе без репроцессинга; для повышения эффективности использования тория в реакторе используется система компенсации реактивности, основанная на секционированных по высоте подвижных топливных запальных частях.

В качестве прототипа была использована концепция гетерогенной компоновки активной зоны германо-бразильского проекта ториевого реактора.

В 1994 г. по предложению кампании RTPC (Radkowsky Thorium Power Corp.) специалисты РНЦ "Курчатовский институт" выполнили расчетную оценку характеристик RTR и подтвердили основные положения концепции RTR. Использование тория в гетерогенном реакторе в цикле без переработки может быть эффективным, но для этого требуется разработать ТВЭЛ бланкета, имеющие время жизни вдвое большее, чем у существующих ТВЭЛ, и ТВЭЛ запальной зоны, обладающие высокой энергонапряженностью. Исследования специалистов РНЦ "КИ" показали также, что секционированная по высоте активной зоны система подвижных запальных частей ТВС вносит существенные возмущения в пространственное распределение энерговыделения, что снижает энергонапряженность реактора. Кроме того, необходимость их перемещения в качестве органов компенсации вряд ли приемлема для энергетического реак-

тора с позиций надежности и безопасности. Вариант сжигания оружейного плутония в RTR представляет интерес, однако для обеспечения условий нераспространения в этом случае необходимы дополнительные модификации топливного цикла.

В РНЦ "Курчатовский институт" были также проанализированы возможности применения подхода А. Радковского к реакторам типа ВВЭР. Сочетание основных положений RTR с российскими технологиями судовых реакторов и реакторов ВВЭР при исключении перечисленных недостатков схемы RTR делает эту концепцию реалистичной. В рассмотренных вариантах оказалось возможным снизить риск распространения, уменьшить количество долгоживущих РАО в ОЯТ, обеспечить экономию природного урана за счет эффективной наработки в ториевых элементах урана-233 и его сжигания в этих же элементах без переработки. В предлагаемых вариантах реакторов ВВЭР с ториевым топливом удалось избежать недостатков концепции RTR.

Изменение мировой ситуации с АЭ и смещение акцентов в ее развитии на обеспечение безопасности, экологичности, нераспространения и повышенной экономической эффективности при отсутствии необходимости замыкания топливного цикла в ближайшей перспективе повышают привлекательность данного варианта вовлечения тория в топливный цикл легководящих реакторов. Предложенная в результате исследований РНЦ "КИ" и Лаборатории Радковского концепция легководного уран-ториевого реактора ВВЭР-Т отвечает требованиям развития ядерной энергетики на современном этапе.

КОНЦЕПЦИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ СХЕМА ВВЭР-Т

Основные принципы концепции. Внедрение в ядерную энергетику ториевого цикла с переработкой топлива и повторным использованием урана-233 несмотря на ожидаемые в перспективе преимущества, сдерживается необходимостью значительных вложений, которые вряд ли оправдаются на коротком интервале времени. Для быстрой реализации преимуществ ториевого цикла при окупаемости затрат на разработку в достаточно короткий интервал времени были предложены следующие основные положения концепции реактора ВВЭР-Т:

- реакторная установка максимально использует технологию, оборудование и технические решения серийных реакторов ВВЭР-1000; внедрение тория должно представлять замену ТВС активной зоны стандартного ВВЭР-1000 при неизменной единичной мощности блока, сохранении внутриреакторных конструкций и основного оборудования первого контура; в этом случае внедрение тория может быть осуществлено уже в действующих реакторах ВВЭР-1000;
- на первых этапах торий эффективно используется в открытом топливном цикле без переработки облученного топлива; по мере создания цехов по переработке отработавших ториевых элементов и по производству твэл из урана – 233 может быть внедрен замкнутый топливный цикл;
- ни загружаемое, ни выгружаемое из реактора топливо не может быть использовано для производства ядерного оружия; обогащение урана по делящимся изотопам в исходном топливе, так же, как и в отработавшем топливе отвечает рекомендациям МАГАТЭ по нераспространению (не превышает 20%); наработка реакторного плутония в несколько раз ниже, чем в действующих реакторах ВВЭР-1000;
- облегчение проблемы обращения с ОЯТ из-за уменьшения объемов хранилищ, сокращения объемов ОЯТ и снижения удельной наработки плутония и младших актинидов в реакторе;
- улучшение экономических показателей ВВЭР-Т за счет снижения объемов фабрикации твэл и экономии природного урана;
- повышение уровня безопасности реактора благодаря уменьшению содержания в активной зоне плутония и младших актинидов;

- в качестве дополнительной линии в случае необходимости реализуется утилизация оружейного урана и плутония.

Физическая схема реактора ВВЭР-Т. В соответствии с предпосылками, изложенными выше, были рассмотрены две схемы вовлечения тория в топливный цикл реакторов типа ВВЭР:

- гомогенная активная зона со смешанным диоксидным топливом с добавками в торий делящегося материала (U или Pu);

- гетерогенная компоновка активной зоны с использованием диоксида тория с добавками диоксида урана или плутония в бланкете и уран-циркониевого топлива в запале.

Возможность реализации указанных основных принципов концепции была изучена для двух физических схем компоновки активной зоны реактора ВВЭР-Т:

- компоновка активной зоны из гомогенных ТВС; во всех твэл используется топливо из смешанного диоксида урана и тория; были рассмотрены как случай прямой замены, когда сохраняются неизменными как в ВВЭР-1000 энергетические и геометрические параметры решетки ТВС и твэл, так и случай оптимизированного шага решетки и размера твэл;

- компоновка активной зоны из гетерогенных ТВС; запальная часть гетерогенной ТВС состоит из твэл, содержащих урановое топливо в виде уран-циркониевого сплава; бланкетная часть, поглощающая избыточную часть нейтронов запальной зоны, состоит из твэл, содержащих топливо из смеси диоксида урана и тория.

Гомогенные ТВС. Гомогенный вариант с традиционной геометрией ТВС и твэл не дает преимуществ по сравнению с существующими реакторами ВВЭР-1000.

При сопоставлении поведения активной зоны ВВЭР-1000 с традиционной UO_2 и $(U-Th)O_2$ топливными загрузками (прямая замена) в определяющих авариях явного преимущества ториевой системы не наблюдается.

Снижение ксенонового эффекта реактивности и ксеноновой неустойчивости характерно для ториевой зоны, однако добавляется большой протактиниевый эффект реактивности.

При этом эффективная доля запаздывающих нейтронов ниже, чем в традиционной урановой системе.

Уменьшение величины положительной реактивности, которая вводится при подключении «холодной» петли для ториевой активной зоны является положительным моментом для безопасности, однако более слабый отрицательный плотностной коэффициент реактивности ухудшает протекание аварии с вскипанием теплоносителя.

В случае прямой замены уранового на уран - ториевое топливо, несмотря на увеличение коэффициента воспроизводства, необходимые для обеспечения требуемой глубины выгорания начальные запасы реактивности для уранового и ториевого топлива практически совпадают.

Была также выполнена вариация топливной решетки при неизменных геометрических параметрах твэл с целью оптимизация топливного цикла. Оптимизация параметров ТВС проводилась по критерию минимума стоимости годовой топливной подпитки с учетом выполнения условий нераспространения на всех стадиях топливного цикла.

Исследования показали, что оптимальный шаг решетки твэлов находится в диапазоне 1.36-1.46 см. Для сохранения мощности требуется увеличить среднюю линейную нагрузку твэл с 166 до 206 Вт/см и увеличить в два раза выгорание уран-ториевого оксидного топлива. Условия критичности в течение увеличенной кампании топлива поддерживаются благодаря улучшению баланса нейтронов в реакторе за счет использования разреженной, относительно ВВЭР, решетки топливных элементов в сборке.

Оптимизированная по параметрам решетки компоновка ТВС ВВЭР-Т обладает естественной простотой конструкции и позволяет обеспечить выполнение основных положений концепции ВВЭР-Т. Однако эффективное использование тория в этом варианте может быть получено только в случае переработки облученного топлива и повторного использования образовавшегося урана-233. Реализация этого варианта сталкивается с проблемой обоснования работоспособности твэл при более высоких, чем у традиционных ВВЭР-1000, линейных нагрузках и глубинах выгорания. Кроме того, изменение шага решетки твэл находится в противоречии с требованием совместимости ТВС с внутрикорпусными устройствами реактора ВВЭР-1000. Изменение шага решетки твэл приводит к изменению положения центров каналов, используемых для органов регулирования. В этом случае потребуются изменение конструкции блока прижимных труб и расположения технологических каналов СУЗ. Такой вариант может рассматриваться для реакторов нового поколения при внедрении переработки топлива.

Гетерогенная ТВС. ТВС состоит из центральной запальной части с топливом на основе уран-циркониевого сплава и периферийной бланкетной части с топливом на основе диоксида урана и тория. Предполагается, что ТВС является разборной. Каждая из этих частей имеет собственную функциональную нацеленность. Бланкет, находясь в подкритическом состоянии, эффективно нарабатывает и сжигает уран-233, поглощая в тории избыточные нейтроны запала. Запал обеспечивает подпитку бланкета нейтронами. Обе части обеспечивают выполнение условий критичности реактора при относительно слабом изменении реактивности в течение кампании.

Гетерогенная компоновка ТВС позволяет отдельно оптимизировать параметры решетки твэл запала и бланкета, добиваясь улучшения баланса нейтронов и снижения наработки плутония и актинидов. В связи с различными функциями бланкета и запала оптимальные параметры каждого из них достигаются при пространственно-энергетическом сдвиге спектра нейтронов: накопление урана-233 осуществляется в более жестком спектре бланкета, а смягченный спектр запала позволяет снизить наработку плутония-239. Эта цель достигается при величине водо-топливного отношения в бланкете равной 1.6, а в запале равной 3, в отличие от величины водо-топливного отношения 1.8 для ВВЭР-1000.

Оптимизация параметров бланкета. Исходя из концепции гетерогенной компоновки ТВС, основной задачей бланкета является наработка и сжигание ^{233}U . Желательно, чтобы в течение кампании бланкет был подкритичным, но уровень подкритичности был бы незначителен. При высоком уровне подкритичности бланкета придется либо значительно увеличить содержание урана в топливе запала, либо снизить долю ТВС, отводимую под бланкет. И то и другое отрицательно скажется на экономических показателях топливного цикла. Для обеспечения стабильного уровня подкритичности бланкета при кампании 80-100 ГВт сут/т, коэффициент воспроизводства ^{233}U в бланкете должен быть выше единицы, чтобы скомпенсировать не только выгорание ^{235}U , но и паразитное поглощение осколков деления.

Суммируя результаты расчетов, можно сделать следующие выводы: при оптимальной расстановке ТВЭЛ бланкета должно

- обеспечиваться водо-топливное отношение 1.5-1.8;
- содержание UO_2 с обогащением 20% по ^{235}U в топливе бланкета должно лежать в интервале 0.09-0.14. При более высокой доле UO_2 бланкет будет длительное время надкритичным в рабочем состоянии.

Оптимизация параметров запала. При определении шага решетки ТВЭЛ зоны запала следует учитывать два обстоятельства:

- коэффициент размножения зоны запала при фиксированном содержании ура-

на в топливе должен быть как можно выше, т.к. именно это определяет длительность его кампании;

- наработка плутония должна быть минимальной.

Выполнение этих требований возможно при высоких значениях водо – уранового отношения.

Для того, чтобы было выполнено условие сохранения внутрикорпусной конструкции реактора ВВЭР и, в частности, блока прижимных труб, в зоне запала рассмотрена расстановка ТВЭЛ различного диаметра. Условие совместимости с блоком прижимных труб определяет выбор ТВЭЛ запала с шагом решетки, меньшим, чем для реактора ВВЭР.

Оптимизация гетерогенной схемы ТВС позволила получить удовлетворительные нейтронные параметры. Однако для сохранения мощности реактора требуется обеспечить такую же среднюю энергонапряженность гетерогенной ТВС, как и для ТВС реактора ВВЭР. В подкритичном бланкете при небольшом содержании урана энергонапряженность ТВЭЛ в два раза ниже средней энергонапряженности. Это уменьшение компенсируется более высокой энергонапряженностью ТВЭЛ запала. Выполнение условия эффективного использования тория в цикле без переработки при пониженной энергонапряженности ТВЭЛ бланкета приводит к необходимости повышения длительности кампании.

С учетом этих обстоятельств гетерогенная ТВС должна быть разборной. Такая схема позволяет реализовать двухкомпонентный топливный цикл. Топливо запала, имеющее при высокой энергонапряженности относительно короткую кампанию, извлекается из ТВС при достижении выгорания (80-100) ГВт.сут/т и направляется на хранение или переработку. Топливо бланкета, имеющее длительную кампанию, используется при перегрузках реактора с новыми запалами и после выгрузки из реактора отправляется на длительное хранение без переработки.

В случае использования разборной гетерогенной компоновки ТВС в целях экономии урана и работы по обогащению можно замкнуть топливный цикл по топливу запала при относительно небольших объемах переработки. При этом необходимый объем хранилищ ОЯТ может быть снижен в три раза по сравнению с открытым циклом действующих ВВЭР-1000. В случае использования открытого цикла для ОЯТ бланкета и запала объем хранилищ снижается приблизительно в два раза по сравнению с объемами хранилищ ОЯТ ВВЭР.

Таким образом, основы физической схемы ВВЭР-Т заключаются в следующем:

- внутрикассетная гетерогенность; гетерогенная разборная ТВС состоит из ториевого бланкета и уранового запала; в бланкете используется смесь окислов тория и урана; в запале – уран-циркониевый сплав; обогащение урана в обеих композициях не более 20% на всех стадиях топливного цикла;
- пространственно-энергетический сдвиг спектра нейтронов; в бланкете реализуется жесткий спектр, а в запале смягченный спектр; подкритический бланкет подпитывается избыточными нейтронами запала;
- сохранение средней тепловой напряженности ТВС; пониженная тепловая напряженность элементов бланкета компенсируется высокой тепловой напряженностью ТВЭЛ запала;
- двухкомпонентный топливный цикл запал - бланкет; топливо запала имеет глубокое выгорание (80-100 ГВт сут/т т.м.) и оно может быть переработано; ториевые элементы бланкета имеют длительную кампанию (10 лет) и не подлежат переработке.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРИЙ-УРАНОВОГО ТОПЛИВА В БР

Реакторы на быстрых нейтронах также могут работать в торий-урановом топливном цикле, однако при этом по характеристикам воспроизводства они уступают уран-плутониевым системам.

Как показывают расчетные исследования использование торий-уранового топлива в БР может обеспечить, например:

- снижение положительного плотностного и пустотного эффектов реактивности;
- уменьшение наработки трансурановых нуклидов в реакторном замкнутом топливном цикле;
- наработку урана-233 для реакторов на тепловых нейтронах.

При замене в БР урановых экранов на ториевые происходит некоторое увеличение содержания плутония в активной зоне и изменяется спектр нейтронов в реакторе, что влечет за собой снижение по абсолютной величине мощностного и температурного эффектов реактивности.

В многокомпонентной структуре ядерной энергетики в будущем целесообразно использовать «перекрестный» замкнутый топливный цикл с обменом топлива между урановыми тепловыми реакторами и быстрыми плутониевыми реакторами с ториевыми экранами. В таком цикле быстрые реакторы с $K_{BA} \approx 1$, сохраняя плутониевое топливо в активной зоне, нарабатывают в своих ториевых экранах U-233 для запуска и подпитки урановых тепловых реакторов, которые, в свою очередь, работают на урановом топливе из смеси изотопов U-233 и U-238, накапливая плутоний для запуска новых быстрых реакторов. Этот топливный цикл привлекателен, в частности, тем, что тепловые и быстрые реакторы работают на наиболее эффективном для них в виде топлива. Кроме того, исключается проблема протактиниевого отравления тепловых реакторов, имеющая место в торий-урановом цикле.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР С УРАН - ТОРИЕВЫМ ТОПЛИВОМ

С самого начала проектирования ВТГР в нем рассматривалась возможность использования ториевого топлива. В спектре ВТГР уран-233 обладает очень хорошими ядерно-физическими свойствами, что позволяет достигнуть высокого уровня конверсии и лучше использовать природные топливные ресурсы в сравнении с традиционным урановым или уран-плутониевым топливными циклами.

U-233	U-235	Pu-239
$\nu_{эфф} = 2.29$	2.05	1.80

коэффициент конверсии U-233 зависит от многих факторов: топливный цикл, состав и размеры реактора, наличие зоны воспроизводства, глубина выгорания, температура замедлителя, но основное влияние связано с отношением ядер графита и ядер делящегося материала (C).

Оптимальная область значений C для наработки U-233 находится для ВТГР в диапазоне $C = 5000 \div 15000$.

В открытом топливном уран-ториевом цикле преимущества урана-233 не могут проявиться в полной мере. Лучшая экономичность ториевого топливного цикла достигается в замкнутом уран-ториевом цикле. В РНЦ "КИ" разрабатывается сухая газотриодидная технология переработки отработавших топливных элементов ВТГР, которая должна производиться дистанционно.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРИЕВОГО ТОПЛИВА В ЖИДКОСОЛЕВЫХ РЕАКТОРАХ

Физические особенности ЖСР в случае работы реактора в уран-ториевом топливном цикле позволяют достигнуть в нем расширенного воспроизводства. В настоящее время К. Фурукавой, А. Леноком и другими энтузиастами ЖСР предложена концепция. «Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetic», которая по мнению авторов, обеспечивает практическое решение всех проблем дальнейшего развития ЯЭ. В

РНЦ "КИ" систематические исследования по проблеме ЖСР с 1976 г. концентрируются вокруг следующих вопросов:

- проектные исследования возможных областей применения ЖСР;
- безопасность ЖСР;
- ядерные данные и физика ЖСР;
- конструкционные материалы для ЖСР;
- свойства топливных солей и технология подготовки теплоносителя;
- теплофизика жидкосолевых теплоносителей;
- петлевые технологические внутриреакторные испытания;
- химия и радиохимия топливных солей.

В настоящее время РНЦ "КИ" в содружестве с РФЯЦ ВНИИТФ ведется разработка проекта демонстрационного стенда с принудительной циркуляцией топливной расплавно-солевой композиции и опытного ядерного реактора на расплавах солей, которые предполагается разместить в Снежинске.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурогов В.М., Троянов М.Ф., Шмелев А.Н. Использование тория в ядерных реакторах. - М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Subbotin S., Alekseev P., Ignatyev V. e.a. Harmonization of Fuel Cycles For Long-Range and Widescale Nuclear Energy System. In Proc. of GLOBAL'95, 1995. - Vol. 1. - P. 199-206.
3. Пономарев-Степной Н.Н., Лукин Г.Л., Морозов А.Г. и др. Легководный ториевый реактор ВВЭР-Т // Атомная энергия. - 1997. - Т. 83. - № 4. - С. 291-298.
4. Slesarev I.S., Morozov A.G., Tsurikov D.F.. Thorium Utilization in Solving the Nuclear Fuel Problem IAEA-TECDOC-412, Vienna, 2-4 December, 1985.
5. Пономарев-Степной Р.Р., Глушков Е.С., Цуриков Д.Ф.. Возможность воспроизводства делящегося материала в высокотемпературных газографитовых реакторах (ВТГР) / Препринт РНЦ КИ, ИАЭ-2677. - М., 1976.
6. Alekseev P.N., Ponomarev-Stepnoi N.N., Subbotine S.A. e.a. Harmonization of fuel cycles for nuclear energy system with the use of molten salt technology Nuclear Engineering and Design 173 (1997) 151-158.

Поступила в редакцию 21.12.98.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ТОРИЙ*

**Г.Н.Казанцев, И.С.Курина, И.Я.Овчинников, В.В. Попов,
В.Н.Сугоняев**

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Имеющийся в ГНЦ РФ-ФЭИ технологический опыт разработки различных топливных композиций позволил вести работы по созданию торийсодержащих топливных композиций в трех направлениях:

- создание металлического торийсодержащего топлива;
- создание керамического торийсодержащего топлива;
- создание керметного торийсодержащего топлива.

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ТОРИЙСОДЕРЖАЩЕГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

При изготовлении сплава Th-U-Zr используется метод дуговой плавки с нерасходуемым электродом. В качестве исходных материалов используются металлический U и Th, а также иодидный цирконий. Изготовление слитков проводится в дуговой печи типа МИФИ с использованием медного водоохлаждаемого тигля. В качестве нерасходуемого электрода используется вольфрам. Плавление проводится в среде аргона. Для осушки аргона и его очистки от кислорода плавки в дуговой печи используется циркониевый геттер.

Между водоохлаждаемым электродом с вольфрамовым наконечником и подвергаемым плавке материалом зажигалась дуга. Металл (Th, U, Zr) служит положительным электродом и плавится за счет тепла, выделяемого дугой. После того как расплав затвердевает и остывает, слиток переворачивается и переплавляется еще раз. Такие операции с переплавом слитков проводятся несколько раз, что необходимо для получения достаточно однородного сплава (Th, U, Zr).

Равномерность распределения тория, урана и циркония по объему слитка контролируется микрорентгеноспектральным анализом.

После изготовления сплава в дуговой печи слитки имеют форму, плохо пригодную для механической обработки. Изготовление топливных блочков из слитков осуществляется методом вакуумного переплава. Вакуумный переплав слитков проводится в печи электросопротивления СШВЛ с использованием вольфрамовых нагревателей. В качестве контейнерного материала для вакуумного переплава слитков используется сборка из двух кварцевых ампул. Верхняя ампула имеет от-

© Г.Н.Казанцев, И.С.Курина, И.Я.Овчинников, В.В. Попов, В.Н.Сугоняев, 1999

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу (Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

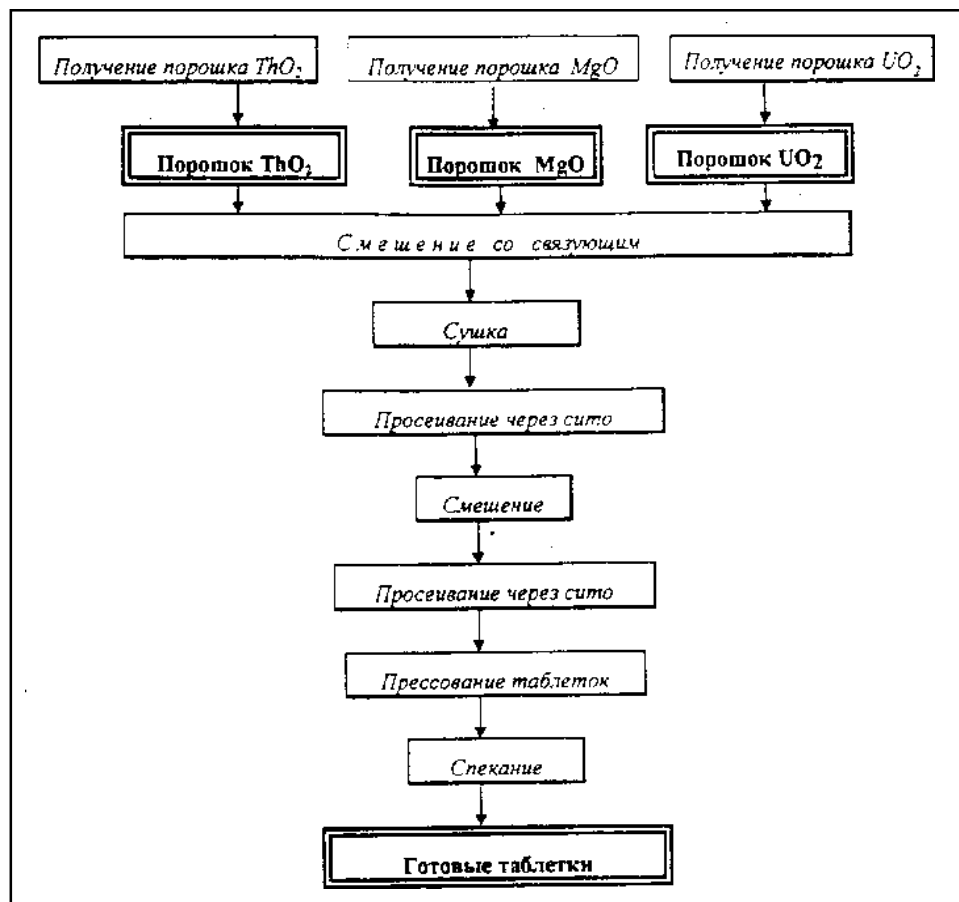


Рис. 2.1. Технологическая схема получения таблеток композиции $UO_2 + ThO_2 + MgO$ способом механического смешения порошков

верстие в дне. Плавка проводится в вакууме. Температура на внешней поверхности кварцевого тигля контролируется с помощью W-Re термпары.

Охлаждение сплава проводится вместе с печью.

При оптимизированном режиме переплава толщина слоя взаимодействия между сплавом и кварцем не превышает 0,25-0,3 мм.

После переплава нижняя кварцевая ампула разрушается механическим способом, а полученные цилиндрические стержни обрабатываются механическим способом.

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ UO_2 И ThO_2

В ГНЦ РФ-ФЗИ изготовление керамических топливных композиций на основе диоксидов урана и тория осуществляется двумя способами: способом механического смешения порошков оксидов и способом совместного осаждения компонентов из растворов с последующими операциями термической обработки порошков, прессования и спекания изделий (таблеток, втулок). При этом в процессе изготовления изделий в их состав вводятся дополнительные компоненты с целью достижения заданных свойств (улучшения технологичности порошков, повышения теплопроводности, механической прочности изделий и т.д.).

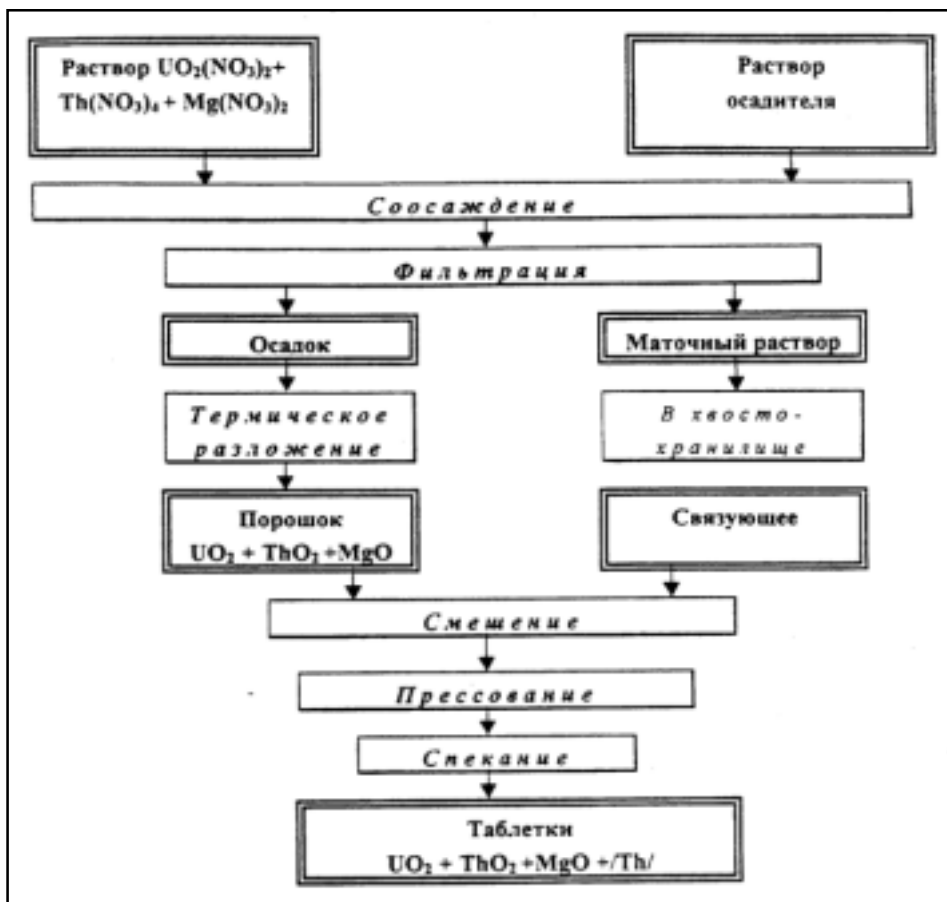


Рис. 2.2. Технологическая схема получения таблеток композиции $UO_2 + ThO_2 + MgO + Th/$ соосаждением гидроксидов магния, урана и тория из раствора

Получение изделий способом механического смешения порошков

На рис.2.1 представлена технологическая схема изготовления изделий композиций $UO_2 + ThO_2 + MgO$ (CaO и др.).

Схема включает в себя основные операции:

- изготовление исходных порошков;
- смешение порошков с введением связующего вещества;
- прессование изделий;
- спекание изделий.

Для приготовления смеси используются порошки с оптимальными свойствами (полной удельной поверхностью, гранулометрическим, химическим, фазовым составами и др.). Режимы прессования и спекания подбираются такими, чтобы получить изделия с оптимальными плотностью (пористостью), механической прочностью и т.д.

Получение изделий способом совместного осаждения компонентов из растворов

Разработан способ получения многокомпонентных топливных композиций по технологической схеме, представленной на рис.2.2. Аппаратурное оформление (рис.2.3) процесса включает в себя:

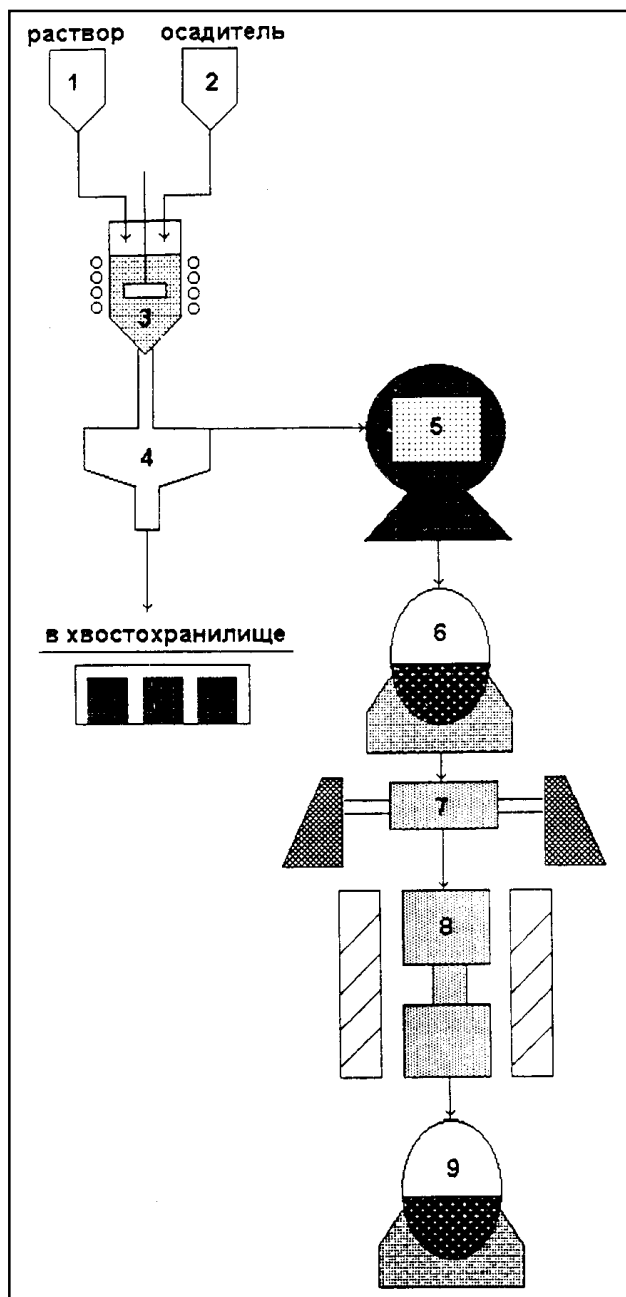


Рис. 2.3. Аппаратурное оформление процесса получения торийсодержащих композиций способом соосаждения из раствора

такой композиции было разработать технологию получения топлива на основе оксида плутония в торийсодержащей матрице для утилизации Pu оружейного происхождения. Диоксид урана использовался в качестве имитатора PuO_2 .

Композиция получена соосаждением компонентов U, Th, Mg из нитратного раствора аммиаком с последующими операциями прокаливания осадка, восстановления водородом, прессования и спекания таблеток.

Спеченные при температуре $1500^{\circ}C$ топливные таблетки имели плотность $\sim 90\%$

- емкость для подачи раствора, содержащего уран, торий и другие компоненты (1);
- емкость для подачи осадителя (2);
- аппарат для соосаждения (3);
- оборудование для фильтрации пульпы (4);
- печь для термической обработки осадка на воздухе (5);
- печь для термической обработки осадка в восстановительной среде (6);
- смеситель (7);
- пресс;
- печь для спекания таблеток (9).

Как правило, исходные компоненты растворяют в азотно-кислом растворе.

В качестве осадителя используется водный раствор аммиака или оксалат аммония. При создании топливной композиции значительное внимание уделяется процессам получения порошков, свойства которых оказывают определяющее влияние на качество спеченных изделий.

Для различных схем получения таблеток (втулок) различных топливных композиций на основе оксидов, оптимальные свойства промежуточных оксидов индивидуальны.

Способом соосаждения была создана композиция $UO_2 + Th + ThO_2$.

Композиция $UO_2 + Th + ThO_2$ была получена с участием оксида магния. Целью создания

от теоретической, равномерную микроструктуру (рис.2.4). Рентгеноструктурный анализ выявил в композиции фазы: UO_2 , ThO_2 , Th и фазу типа перовскита ($MgThO_3$). Металлический торий равномерно распределен в объеме композиции в виде мельчайших блестящих вкраплений. Материал топливных таблеток не взаимодействовал с водой и не растворялся в растворе азотной кислоты при температуре $\sim 100^\circ C$.

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ТОРИЙСОДЕРЖАЩЕГО КЕРМЕТНОГО ТОПЛИВА

Керметное топливо представляет собой дисперсную систему металлической матрицы (Th-Zr) и частиц керамического топлива.

Металлическая матрица (Th-Zr) получается методом литья, описанным в п.1, с последующим диспергированием ее на частицы размером 50-200 мкм методом распыления вращающегося электрода, изготовленного из Th-Zr сплава.

Частицы керамического топлива (ThO_2-UO_2) получают путем дробления таблеток из того же материала, изготовленных методом, описанным в п.2.

Шихта для изготовления керметного топливного сердечника готовится путем смешения частиц (Th-Zr) с частицами (ThO_2-UO_2) в нужном соотношении после введения пластификатора. Процесс брикетирования сердечника производится на 80-тонном прессе. Брикеты просушиваются и отгазовываются в печи СВЧ. После отгазовки брикеты помещаются в циркониевый стакан и вместе со стаканом калибруются до необходимого размера через фильеру. Полученные таким образом керметные топливные стержни можно разрезать, дегазировать и использовать для изготовления твэла.

ДИСПЕРСИОННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ThO_2-UO_2 С МАТРИЦЕЙ ИЗ РАСШИРЕННОГО ПИРОГРАФИТА

Расчетные исследования показали, что рассматриваемая композиция позволяет улучшить характеристики реактора за счет дополнительного твердого замедлителя и холодного топлива. Предполагается, что в твэлах с таким топливом отсутствует химическое взаимодействие и существенно уменьшается механическое взаимодействие топливной композиции и оболочки на переходных режимах работы реактора и при протекании аварий.

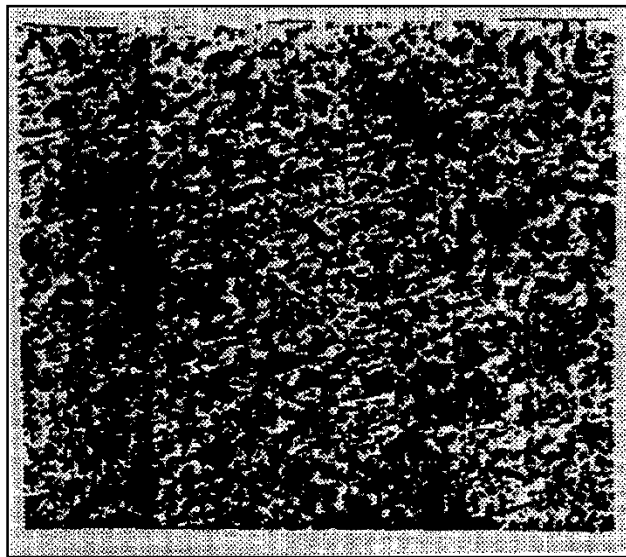


Рис. 2.4. Фотография микроструктуры образца композиции матричного материала Th+ ThO_2 +MgO (увеличение=200)

Материалы, входящие в состав топливной композиции существенно различаются по плотности, что затрудняет использование традиционных технологических схем, применяемых в порошковой металлургии. Для изготовления экспериментальных образцов используется способ послойного (порционного) заполнения полости прессформы компонентами топливной композиции и дальнейшего прессования.

Измеренный коэффициент теплопроводности рассматриваемой композиции (50% об. ThO_2-UO_2 + 50% об. пирографит) при $700^\circ C$ составил

7,8 Вт/м·град вдоль оси прессования образцов и 27,0 Вт/м·град – поперек оси прессования. Такое различие в величине коэффициента теплопроводности объясняется наличием текстуры матрицы из расширенного пирографита.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДИОКСИДА УРАНА-233

Учитывая тот факт, что в уране-233 неизбежно присутствует в качестве примеси U-232, желательно иметь технологию изготовления компактных изделий из диоксида, которая включала бы минимальное количество технологических операций и была бы менее продолжительной по времени по сравнению с традиционными технологиями порошковой металлургии.

В результате проделанной в этом направлении работы нам удалось:

- в качестве исходного продукта использовать окись-закись урана-233, из которой предварительно методом химического разделения удалялся торий-228 - первый дочерний продукт деления урана-232;

- существенно сократить технологический процесс по времени (на 30-40%) и по числу операций, а, следовательно, уменьшить количество используемого технологического оборудования;

- осуществить надежный контроль за дозиметрической обстановкой как в процессе проведения работ, так и после их окончания.

Готовые таблетки диаметром 8,95-9,0 мм и высотой 2,5-3,0 мм имели кислородный коэффициент $(O/U) < 2,04$, плотность $\sim 10 \text{ г/см}^3$, имели хорошую поверхность и не нуждались в механической обработке.

Технологические потери по урану составили около 1%.

Мощность экспозиционной дозы составляла:

- от двух таблеток массой 3,2 г на расстоянии 2 см – 0,9 мкР/с;
- от партии таблеток массой 29 г, помещенных в циркониевую трубу с толщиной стенки 0,5 мм, на расстоянии 2 см $\sim 24 \text{ мкР/с}$.

Поступила в редакцию 21.12.98.

ПУТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРИЕВОГО ЦИКЛА В ЛЕГКОВОДНЫХ И БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ*

**В.М. Декусар, Е.В. Долгов, В.Г. Илюнин, А.Г. Калашников,
В.А. Пивоваров, М.Ф. Троянов, З.Н. Чижикова, В.Н. Шарапов**
ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Развитый топливный цикл с широкомасштабным использованием тория для России является направлением достаточно далекой перспективы. Однако полезные качества использования тория в легководных и быстрых реакторах могут быть использованы и в недалеком будущем. Такими полезными качествами являются повышение характеристик безопасности, меньшее накопление актинидов, повышенная сопротивляемость несанкционированному отвлечению делящихся материалов.

В докладе рассматриваются характеристики и проблемные вопросы реакторов, с помощью которых может быть начато вовлечение тория в ядерную энергетику.

ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ТОРИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В ВВЭР НА ОСНОВЕ ОРУЖЕЙНОГО ИЛИ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА

Необходимость вовлечения тория в топливный цикл ВВЭР сейчас не диктуется исчерпанностью сырьевых ресурсов урана. В России запасов урана для обеспечения работы действующих АЭС с тепловыми реакторами хватит на десятки лет. Работы по ториевому циклу ведутся в плане изучения перспектив развития ядерной энергетики и путей вовлечения в нее тория, как дополнительного ресурса. Одновременно изучаются те полезные качества, которые может принести с собой использование тория в реакторах существующего типа. Общее состояние работ по ториевому циклу в России изложено в работе [1].

Можно ожидать, что внедрение ториевого топливного цикла с наработкой ^{233}U в ВВЭР поможет улучшить их технико-экономические характеристики и снизить накопление радиологически опасных плутония и младших актинидов.

Известными преимуществами ^{233}U по сравнению с другими делящимися нуклидами являются более высокое значение $\nu_{\text{эфф}}$, меньшее сечение поглощения нейтронов продуктами деления, меньший выход «отравляющего» осколка деления ^{135}Xe . Последнее обстоятельство должно приводить к снижению в реакторах про-

© **В.М. Декусар, Е.В. Долгов, В.Г. Илюнин, А.Г. Калашников, В.А. Пивоваров,
М.Ф. Троянов, З.Н. Чижикова, В.Н. Шарапов, 1999**

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу
(Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

странственных колебаний поля энерговыделения при внесении локальных возмущений по реактивности. Более высокое значение коэффициента воспроизводства или конверсии будет способствовать уменьшению запаса реактивности на кампанию и сделает возможным осуществление кампаний ВВЭР длительностью в 1.5÷2.0 календарных года.

Для снижения потерь в накоплении ^{233}U за счет поглощения нейтронов в ^{233}Pa желательно использовать ядерные реакторы с пониженным значением плотности нейтронного потока. В этом смысле для рассматриваемой задачи в России подходит разрабатываемый реактор ВВЭР-640, нейтронный поток в котором в 1.5 раза ниже, чем в ВВЭР-1000.

Наиболее простым началом вовлечения тория в ядерную энергетику представляется изготовление для действующих ВВЭР ТВС при сохранении величины кампании и их конструкции. Это снимало бы проблему изменения и нового обоснования теплогидравлических и термомеханических характеристик активной зоны. Привлекательной топливной композицией является керметное топливо с матрицей из металлического тория или сплава тория с цирконием, в которой равномерно распределены частицы диоксида обогащенного урана.

Возможен вариант использования смешанных оксидов тория и обогащенного урана. Этот вариант реалистичнее, но керметный вариант предпочтительнее по физике и по возможности будущей переработки топлива.

В качестве обогащенного урана может использоваться оружейный уран высокого обогащения, но с точки зрения защиты от несанкционированного выделения из свежего топлива высокообогащенного урана предпочтительнее использовать уран с обогащением не выше 20%. Такой уран может быть получен из оружейного урана путем разбавления.

На первом этапе внедрения тория отработавшие ТВС с ториевым топливом можно не перерабатывать, а складировать, дожидаясь лучших времен, когда технология переработки ториевого топлива будет освоена.

В более далекой перспективе можно рассматривать варианты использования тория в ВВЭР и с изменением конструкции активной зоны, например, в сторону увеличения коэффициента конверсии, в сторону ужесточения спектров с целью дальнейшего снижения ксеноновых колебаний мощности в реакторе. Но сейчас следует сосредоточиться на внедрении ториевых ТВС уже освоенной конструкции.

Инициализация ториевого топливного цикла на основе ^{233}U предпочтительнее, чем с использованием плутония. Она проще осуществима и менее трудоемка.

В качестве примера проведены расчеты реактора типа ВВЭР-1000 с керметной топливной композицией, состоящей из металлического тория и распределенного в нем равномерно диоксида оружейного урана.

Полагая, что керметное топливо способно обеспечить глубокое выгорание, была рассмотрена для стационарного режима схема перегрузок ТВС с кратностью 5.43 (часть ТВС работает пять кампаний, часть шесть) в отличие от серийного реактора ВВЭР-1000 с трехгодичной кампанией ТВС.

Для выравнивания радиального поля энерговыделения используются два типа ТВС, различающихся по содержанию урана (5и 6% объемных).

Для определения нейтронно-физических характеристик применялась компьютерная программа АСАДЕМ, разработанная в ГНЦ РФ-ФЭИ. Программа в двухгрупповом диффузионном приближении учитывает трехмерную геометрию активной зоны и влияние теплогидравлических характеристик на групповые константы[2]

Основные характеристики реактора и топливного цикла приводятся ниже в табл.1. Более подробно они представлены в [2].

Таблица 1

Основные характеристики ВВЭР-1000 с керметным уран-ториевым топливом

1	Загрузка ^{232}Th в ТВС, кг	540
2	Критическая концентрация бора в теплоносителе в начале кампании, г/кг H_2O	0,65
3	Кампания реактора, эфф.сут.	288
4	Расход ^{235}U за кампанию, кг	735
5	Количество заменяемых ТВС для обеспечения кампании, шт.	30
6	Средняя глубина выгорания топлива в выгружаемых ТВС, МВт-сут/кг т.а.	52,0
7	Максимальный за кампанию коэффициент неравномерности мощностей ТВС	1,39
8	Количество выгружаемого урана, кг	551
9	В том числе ^{233}U ^{235}U	277 93
10	Содержание ^{232}U в выгружаемом уране, ppm	3200
11	Количество выгружаемого плутония	8,9

По сравнению с топливом из диоксида урана в 10÷50 раз (в зависимости от изотопа) меньше нарабатывается младших актинидов, представляющих наибольшую экологическую опасность. Исключение составляет ^{237}Np , который накапливается примерно в тех же количествах, что и в серийном реакторе ВВЭР-1000.

Представляется, что уже сейчас могут быть начаты работы по технологии изготовления керметных твэлов с ториевой матрицей, включая реакторные испытания опытных образцов.

Однако заметное вовлечение тория в топливный цикл может произойти лишь в случае, если будет показано, что это приводит к повышению безопасности АЭС и их экономичности. Необходим дальнейший тщательный анализ.

РЕАКТОРЫ ВВЭР С ТОПЛИВОМ $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ и $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2$

На данном этапе рассматривался простейший способ вовлечения оружейного плутония в топливный цикл - полная или частичная замена уранового топлива на смесь $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ в стандартной решетке реактора ВВЭР-1000. Кроме того, в той же решетке рассматривался вариант замены уранового топлива на $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ топливо.

Исследовались следующие варианты реактора ВВЭР-1000: с полной и частичной 1/3 активной зоны) загрузкой $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ топлива и с полной загрузкой $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ топлива. Как и в случае штатного реактора, ТВС 1-го года содержит стержни выгорающего поглотителя (СВП) на основе бора, которые удаляются при перегрузке. Изменение реактивности при выгорании компенсируется растворенным бором.

В рассматриваемых реакторах использовалась обычная схема перегрузок «out-in», применяемая в штатных реакторах ВВЭР-1000. Содержание Pu или ^{233}U в топливе определялось из условия обеспечения длительности топливного цикла в рассматриваемых вариантах, приблизительно равного длительности топливного цикла штатного реактора и при условии непревышения коэффициентами неравномерности распределения мощности предельно допустимых значений.

Некоторые результаты расчетов показаны в табл.2 в сравнении с аналогичными результатами для штатного реактора и реакторов с МОХ-топливом $(\text{U-Pu})\text{O}_2$. Здесь и далее характеристики приведены для равновесного цикла.

Таблица 2

Характеристики топливного цикла

Тип реактора		Штатный ВВЭР-1000	Реактор с топливом (Pu-U)O ₂				Реактор с топливом (Pu-Th)O ₂				Реактор с топливом (²³³ U-Th)O ₂	
Характеристики			Частичная (1/3) загрузка		Полная загрузка		Частичная (1/3) загрузка		Полная загрузка			
Тип ТВС		UO ₂	UO ₂	PuO ₂ -UO ₂	PuO ₂ -UO ₂	UO ₂	PuO ₂ -ThO ₂	UO ₂	PuO ₂ -ThO ₂	PuO ₂ -ThO ₂	²³³ UO ₂ -ThO ₂	
Вес топлива, т т.а.		65.4	65.5		65.6	65.9		66.9		67.8		
Среднее начальное содержание в топливе, % • ²³³ U • ²³⁵ U • Pu		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.4	
		4.3	4.23	0.2	0.2	4.23	-	-	-	-	-	
		-	-	3.7	4.5	-	4.8	5.5	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Длительность цикла, эфф.сут.		294,1	295		295	295,3		299		292		
Ежегодная загрузка, кг • ²³³ U • ²³⁵ U • Pu+ ²⁴¹ Am		-	-	-	-	-	-	-	-	-	732.3	
		941	611.5	13.9	41.4	611.5	-	-	-	-	-	
		-	-	268	978	-	354.6	1120	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Среднее содержание в выгружае- мых ТВС, кг/т т.а. • ²³³ U • ²³⁵ U • Pu		-	-	-	-	-	-	4.5	13.2	19.4	-	
		11.3	7.5	0.9	0.9	7.3	7.3	0.20	7.3	0.20	0.9	0.9
		10.6	15.2	30.4	30.4	12.2	12.2	20.8	12.2	20.8	20.8	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ежегодно выгружаемый Pu, кг		234	330		6610	266		462		-		
Делящиеся изотопы в выгружае- мом Pu, ²³⁹ Pu/ ²⁴¹ Pu, полное, %		57.2/14.5, 71.7	50.9/16.4, 67.3		50.5/16.8, 67.3	44.6/19.7, 64.3		36.3/22.4, 58.7		-		
		Ежегодный баланс выгрузки- загрузки Pu, кг	+234	+62		-317	-88		-758		-	
Ежегодное ²³³ U+ ²³⁵ Pa, кг		-	-		-	100.1		293.7		436.6		
Ежегодное накопление младших актинидов (после выдержки в те- чение 3-х лет), кг		19.7	23.2		31.1	22.4*		29.7*		1.9*		
Доля ²³² U в выгружаемом уране, ppm		-	-		-	3860		3675		2500		

* - Включая ²³¹Pa

Как видно из табл.2, вариант реактора с полной загрузкой $(\text{Th-Pu})\text{O}_2$ топливом потребляет ежегодно 1220 кг оружейного плутония, реактор с частичной загрузкой - 354 кг такого плутония. Ежегодные балансы между выгружаемым и загружаемым Pu составляют -758 и -88 кг соответственно. Соответствующие значения для $(\text{Pu-O})\text{O}_2$ топлива составляют -317 и +62 кг. С этой точки зрения реактор с полной загрузкой $(\text{Pu-Th})\text{O}_2$ топлива является наиболее эффективным выжигателем Pu.

Реактор с частичной загрузкой топливом $(\text{Pu-Th})\text{O}_2$ уменьшает запасы плутония, в то время как реактор с частичной загрузкой $(\text{Pu-U})\text{O}_2$ перерабатывает оружейный Pu в энергетический, не уменьшая их по количеству. Выгруженный Pu из реакторов с Th содержит существенно меньшее количество ^{239}Pu по сравнению с отработавшим топливом штатного реактора и реакторов с $(\text{Pu-U})\text{O}_2$ топливом. Реактор с $(^{233}\text{U-Th})\text{O}_2$ топливом ежегодно потребляет 732 кг ^{233}U , при этом нарабатывает его в количестве 437 кг с содержанием ^{232}U 2500 ppm.

Табл.3 показывает некоторые характеристики, важные для безопасности. Расчеты выполнялись для номинальной мощности. На начало цикла (ВОС) результаты получены с учетом распада ^{233}Pa и накопления ^{233}U за 30-суточный интервал между перегрузками. Сравнение производится со штатным реактором, чтобы оценить, требуются ли изменения в конструкции реактора с целью сохранения безопасности на уровне штатного реактора.

Расчеты эффективности СУЗ проводились для системы, состоящей из 61 стержня, как и в штатном реакторе. Расчеты температуры повторной критичности выполнялись для наиболее неблагоприятного периода - конца цикла, при этом принималось во внимание зависание наиболее эффективного кластера.

В реакторах с $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ топливом температура повторной критичности увеличилась со 197°C в штатном реакторе до 255°C в реакторе с полной загрузкой и до 235°C - с частичной загрузкой. Так как коэффициенты реактивности по температуре воды и топлива близки в этих реакторах, это увеличение объясняется, главным образом, уменьшением эффективности СУЗ. Для того, чтобы уменьшить T_{RC} в реакторе с полной загрузкой $(\text{Pu-Th})\text{O}_2$ топлива и, следовательно, обеспечить уровень безопасности по отношению к

Таблица 3

Характеристики, важные для безопасности (ВОС/ЕОС)

Характеристики	Тип реактора: штатный ВВЭР-1000	$\text{PuO}_2\text{-UO}_2$		$\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$		$^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2$
		Частичная загрузка	Полная загрузка	Частичная загрузка	Полная загрузка	Полная загрузка
$S_{\text{вк}}, \text{ г/кг}$	6.5/0	7.1/0	10.8/0	7.5/0	12.6/0	7.2/0
$\Delta\rho_{\text{вк}}, \%$	7.9/0	7.9/0	7.2/0	8.1/0	7.8/0	9.5/0
$\frac{\partial\rho}{\partial t_{\text{F}}}, \frac{10^{-5}}{^\circ\text{C}}$	-2.3/-2.6	-2.4/-2.6	-2.6/-2.7	-2.6/-2.7	-3.0/-3.1	-2.60/-2.57
$\frac{\partial\rho}{\partial t_{\text{H}_2\text{O}}}, \frac{10^{-5}}{^\circ\text{C}}$	-18.8/-52.0	-24.4/57.6	-33.3/-63.5	-21.6/-52.4	-26.1/-50.9	10.9/-25.5
$\beta_{\text{эф}}, 10^{-2}$	0.63/0.56	0.53/0.50	0.34/0.50	0.52/0.49	0.28/0.32	0.30/0.31
Полная эффективность СУЗ, %	7.03/6.96	7.07/7.22	5.82/6.41	6.63/6.85	5.48/6.12	-
$T_{\text{RC}}, ^\circ\text{C}$	197	229	250	235	255	-
Коэффициенты неравномерности	1.28	1.28	1.29	1.36	1.33	1.28
Эффект распада ^{233}Pa (полный), % ЕОС, $T=20^\circ\text{C}$, $N=0$	-	-	-	0.8	2.0	2.62

авариям с быстрым охлаждением активной зоны не хуже, чем он имеет место в штатном реакторе, необходимо увеличить количество стержней до 109, а обогащение бора в них - до 30÷40% по ^{10}B .

При частичной загрузке $(\text{Pu-Th})\text{O}_2$ топлива необходимое снижение T_{RC} может быть достигнуто повышением обогащения бора в стержнях. По-видимому, возможен и другой вариант: использование компоновок активной зоны с пониженной утечкой нейтронов и применением гадолиниевого выгорающего поглотителя без повышения обогащения бора. В обоих случаях не потребуются переделка крышки реактора.

Эффективная доля запаздывающих нейтронов в реакторе с полной загрузкой значительно ниже, чем в штатном реакторе. Это уменьшение может оказаться нежелательным при авариях с выбросом стержня СУЗ. Следовательно, требуется расчетный анализ таких аварий. В реакторе с частичной загрузкой значение $\beta_{\text{эфф}}$ близко к соответствующему значению штатного реактора.

В реакторе с $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ топливом принципиально важным является изменение знака ТКР по температуре воды с отрицательного на положительный ($10,9 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$) по сравнению с $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ топливом. Расчеты показывают, что положительный знак остается во всем диапазоне изменения мощности от МКУ до номинальной. Наличие положительного ТКР не допускается ПБЯ РУ АС-89. Уменьшение ТКР воды может быть достигнуто за счет:

- использования выгорающих поглотителей на основе гадолиния и эрбия;
 - изменения решетки с увеличением коэффициента конверсии;
 - частичного замещения ^{233}U на плутоний.
 - использования стержней для компенсации части избыточной реактивности, а также нетрадиционных способов компенсации, например, раздвижения активной зоны и др.
- Для реактора ВВЭР с $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ топливом требуется полная оптимизация активной зоны.

БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОРИЯ

Использование тория в быстрых реакторах рассматривалось в различных аспектах.

Самой близкой задачей может быть использование тория в радиальном бланкете. Это дает возможность не накапливать в нем плутоний, а выделение урана-233 отложить до тех пор, когда уран-233 будет востребован. В то же время такое решение исключает бесполезную трату нейтронов, которая свойственна предложению заменять в быстрых реакторах урановый радиальный бланкет на стальной.

В ториевом радиальном бланкете быстрого реактора накапливается уран-233 с меньшим содержанием урана-232 по сравнению с другими способами наработки урана-233. Расчеты реактора типа БН-800 с ториевым бланкетом показывают, что в нем можно накапливать несколько десятков кг урана-233 в год с содержанием урана-232 менее 10 ppm. Эта возможность подтверждена экспериментально на реакторе БН-350.

Содержание урана-232 в уране-233 ниже 10 ppm может облегчить решение проблем разработки и испытаний топлива на основе урана-233 [1]. Однако будущие технологии ториевого цикла должны быть приспособлены к работе с ураном-233, содержащим уран-232 в концентрациях сотни и тысячи ppm.

Сравнительное изучение двух типов быстрых бридеров - уран-плутониевого и уран-233-ториевого показывают, что по воспроизводству первый заметно эффективнее второго. Это определяется более низким вкладом деления тория по сравнению с ураном-238.

Нашим институтом был для быстрых реакторов предложен так называемый смешанный цикл [3], в котором используются плутоний, уран-233, уран-238 и торий. Цен-

тральная часть активной зоны загружается топливной смесью урана-233 и урана-238 (например, в оксидной форме), периферийная часть активной зоны - смесью плутония и урана-238 (например, также в виде оксида). Торцевой бланкет – на основе обедненного урана, боковой - на основе тория.

В результате вторичный уран-233 будет накапливаться только в бланкете, а плутоний - только в активной зоне.

Можно представить и другие схемы осуществления смешанного цикла, например, возможно полное гомогенное смешение оксидов плутония, урана-233 и урана-238 в топливных элементах. Сравнительные расчеты показывают, что зонные размещения (^{233}U - в центральной части, Pu - на периферии, Th - в бланкете) имеет определенные и существенные преимущества по целому ряду факторов:

- лучшие характеристики по безопасности по сравнению с плутониевым бридером; при одинаковом Допплеровском коэффициенте реактивности пустотный натриевый эффект имеет большую отрицательную компоненту, и в целом, пустотный эффект может быть отрицательным;
- эффективная доля запаздывающих нейтронов в активной зоне с ураном-238 выше, чем в случае использования тория;
- размещение тория не в активной зоне, а в бланкете практически исключает проактиниевый эффект реактивности.

Кроме этого, можно отметить и другие особенности:

- воспроизводимый уран-233 является наиболее чистым по урану-232 по сравнению с любым другим способом его наработки в активных зонах энергетических реакторов;
- представляется возможным в радиальном бланкете использовать металлический торий; его растворение при радиохимической переработке будет проще, чем оксида тория; в свою очередь, для переработки и изготовления топлива активной зоны с UOX и MOX -топливом будут пригодны известные технологии.

В развитом топливном цикле с использованием тепловых и быстрых реакторов, потребляющих как уран, так и торий, появится возможность эффективного сочетания лучших качеств каждого типа реактора и каждого типа топлива путем организации рациональных перетоков топлива.

Список литературы

1. *Trojanov M.F., Ilunin V.G., Kalashnikov A.G. et. al.* Some research and development of Thorium fuel cycle in Russia in Proc. of the ICENES-98, Tel-Aviv, 28.06-2.07.98. -V. 2. - P. 681.
2. *Dolgov E.V., Pivovarov V.A., Sharapov V.N.* Complex approach to utilization of weapon-grade fissile materials. Preprint IPPE-2530, Obninsk, 1998.
3. *Leipunski A.I. et. al.* Uses of Atomic Energy. Proc. of the third Intern. Conference. - Vienna, 1965. V. 6. - P. 170.

Поступила в редакцию 21.12.98.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ И РЕАКТОРАХ В ОБОСНОВАНИЕ УРАН-ТОРИЕВОГО ЦИКЛА*

В.И.Голубев, А.В. Звонарев, Г.Н.Мантуров, Ю.С.Хомяков, А.М.Цибуля

ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



На шести критических сборках КБР (№№18÷23) были исследованы уран - ториевые композиции с различным содержанием замедлителя. Сборки КБР-18÷21 были построены по единому принципу - центральная подкритическая зона в форме равновеликого цилиндра, собранная из блоков оксида обогащенного урана и металлического тория и окруженная запальной зоной из обогащенного урана. Материальный состав центральных зон выбирался таким образом, чтобы коэффициент размножения K_{∞} композиций центральных зон был близок к единице. Отношение концентраций ядер добавленного в зону водорода в виде тонких полиэтиленовых (CH_2) фольг и ^{235}U варьировалось от 0 до ~70. При этом обогащение топлива менялось от 10 до 2.5%. Сборки КБР-22 и 23 представляли собой реальные критические системы с уран-ториевыми активными зонами. В экспериментах определялись критичность систем, величина K_{∞} композиции центральных зон, которая находилась из значений реактивностей элементарных ячеек и топливной компоненты ячеек. Кроме того, в центральной области исследованных зон измерены отношения сечений захвата и деления ^{232}Th и ^{238}U к сечению деления ^{235}U . С помощью твердотельных детекторов измерялись относительные сечения деления ряда трансурановых нуклидов. На реакторе БН-350 проведены эксперименты по облучению образцов тория с целью определения интенсивности накопления ^{233}U и содержания ^{232}U . Помимо этого, в разных зонах реактора измерялись относительные сечения деления, захвата и ($n, 2n$) для ^{232}Th , ^{233}U и ^{231}Pa .

В рамках программы исследования возможности использования ториевого цикла в быстрых реакторах был выполнен ряд экспериментов на критических сборках и на реакторе БН-350. Экспериментальная программа включала изучение характеристик уран-ториевых композиций на критических сборках КБР (стенд КОБРА) и исследование изменения нуклидного состава в ториевых образцах, облученных в активной зоне и в отражателе реактора БН-350.

Стенд КОБРА представляет собой набор вертикально расположенных стальных труб (диаметр 5.0 см, толщина стенки 0.1 см и длина около 160 см), закрепленных на толстой стальной опорной плите и заполненных блоками различных материалов. Все исследованные сборки сконструированы в форме квазичилиндрических центральных ("test") зон, диаметром и высотой около 50 см, составленных из

© В.И.Голубев, А.В. Звонарев, Г.Н.Мантуров, Ю.С.Хомяков, А.М.Цибуля, 1999

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу (Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

блочков окиси обогащенного урана (толщиной 0.173 см) и блочков металлического тория толщиной 1.0 см. В процессе экспериментов исследованы четыре сборки. Центральная зона первой из этих сборок (КБР-18) состояла только из блочков урана и тория. В центральные зоны других сборок (КБР-19÷21) было добавлено различное количество замедлителя - водорода в виде тонких фольг полиэтилена (CH₂). Состав элементарных ячеек центральных зон всех сборок выбирался таким, чтобы величина K_∞ этих композиций была близка к единице. При этом условия центральные зоны являются подкритическими и для обеспечения критичности сборки вокруг центральных зон размещена так называемая запальная зона (driver), содержащая обогащенный металлический уран и отражатель из окиси обед-

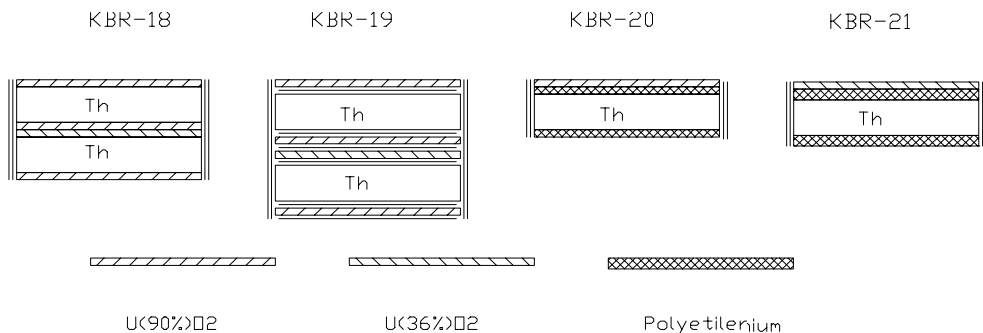


Рис.1. Композиция элементарных ячеек центральных зон критических сборок КБР-18÷21

ненного урана. Конструкция элементарных ячеек центральных зон всех сборок показана на рис.1. Основные характеристики центральных зон приведены в табл.1.

Основной измеряемой величиной в экспериментах на сборках КБР-18÷21 был функционал K⁺, определяемый как

$$K^+ = \int (\varphi^+ P \varphi) dE / \int (\varphi^+ A \varphi) dE.$$

Здесь P и A - операторы рождения и поглощения нейтронов на спектре потока и ценности в центральной ячейке исследуемой зоны. Если размеры центральной

Таблица 1
Параметры центральных уран-ториевых зон сборок КБР-18÷21

Сборка	КБР-18	КБР-19	КБР-20	КБР-21
Радиус центр. зоны, см	25.6	25.4	24.8	25.0
Высота центр.зоны, см	48.5	50.0	56.5	56.1
Ядерные концентрации элементов (относит.)				
²³⁵ U	1.00	1.00	1.00	1.00
²³⁸ U	0.30	0.30	0.11	1.75
O	2.60	2.60	2.21	5.51
²³² Th	8.66	8.66	14.72	36.76
H	-	1.10	9.90	73.65
C	-	0.55	4.95	36.83
Нерж. сталь X18H10	6.0	6.3	8.4	24.7
Доля нейтронов в спектре ниже 10 kev (расч.)	0.8%	9.5%	26%	37%

Таблица 2

Размножающие характеристики центральных уран-ториевых зон сборок КБР-18÷21

Сборка	КБР-18	КБР-19	КБР-20	КБР-21
K^+_{exp}	0.970 (4)	0.980 (4)	1.017 (5)	0.929 (5)
K_{∞}/K^+_{calc}	1.004	1.002	1.000	0.997
$K_{\infty\text{ het}}/K_{\infty\text{ hom}}$	1.002	1.016	1.036	1.054
K^+_{exp}/K^+_{calc}	0.99	1.00	1.02	0.98

зоны достаточно велики, т. ч. влияние запальной зоны на формирование нейтронного спектра в центре сборки незначительно, то функционал K^+ близок к величине K_{∞} этой композиции.

Функционал K^+ связан с непосредственно измеряемыми в эксперименте величинами - эффектами реактивности элементарной ячейки и реактивности топливной составляющей этой ячейки (ρ_{cell} и ρ_{fuel}) соотношением

$$K^+ = 1/\{1 - (\rho_{cell}/\rho_{fuel}) \times f\},$$

где f - расчетный параметр, погрешность оценки которого несущественна, если отношение ρ_{cell}/ρ_{fuel} близко к нулю, т.е. $K^+ \approx 1$.

Измерения реактивностей ячеек и блоков обогащенного урана выполнялось с помощью реакторного осциллятора с пневматическим приводом. Экспериментальные и расчетные параметры исследованных центральных зон сборок КБР-18÷21 показаны в табл.2.

Расчет коэффициентов размножения и оценка гетерогенных эффектов были выполнены по программам КРАБ и FFCR с константами из библиотеки БНАБ-78.

В центре рассматриваемых критических сборок были проведены также измерения отношений средних сечений деления и захвата ^{232}Th и ^{238}U к сечению деления ^{235}U методом активационных детекторов. В сборках КБР-18 и 19 активационные фольги размещались в полости, образованной после извлечения элементарной ячейки, так что результат измерений можно рассматривать как усредненный по спектру в центре сборки. В сборках КБР-20 и 21, в центральных зонах которых содержится сравнительно большое количество замедлителя, активационные фольги размещались между отдельными блоками ячейки, а также внутри разрезанного ториевого блока. Таким образом было получено распределение скоростей реакций по высоте элементарной ячейки. Результаты измерений показаны в табл.3. Отметим, что данные для сборок КБР-20 и 21 усреднены только по толщине ториевого блока. Числа в скобках означают экспериментальные погрешности в последних десятичных позициях.

Таблица 3

Экспериментальные значения относительных сечений захвата и деления ^{232}Th и ^{238}U

Сборки	КБР-18	КБР-19	КБР-20	КБР-21
$\sigma_c(\text{Th})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.154 (7)	0.20 (1)	0.060 (3)	0.023 (1)
$\sigma_c(^{238}\text{U})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.127(5)	0.28(1)	0.47(2)	-
$\sigma_f(\text{Th})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.0066(3)	0.0061(2)	0.0030(1)	0.00080(4)
$\sigma_f(^{238}\text{U})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.0262(5)	0.0251(7)	0.0103(4)	0.0027(1)

Помимо упомянутых выше сборок с центральными подкритическими исследуемыми зонами на стенде КОБРА были рассмотрены две критические сборки - КБР-22 и 23 с уран-ториевыми активными зонами. Элементарные ячейки этих активных зон состояли из блоков металлического обогащенного (90%) урана толщиной 0.56 см и блоков металлического тория. Кроме того, в активную зону сборки КБР-23 был добавлен замедлитель - блоки полиэтилена толщиной 0.5 см. Структура элементарных ячеек этих сборок показана на рис.2.

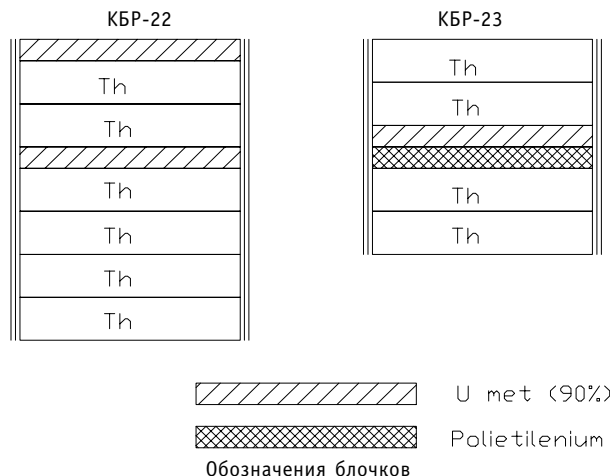


Рис.2. Композиция элементарных ячеек активных зон критических сборок КБР-22 и КБР-23

Кроме того, в активную зону сборки КБР-23 был добавлен замедлитель - блоки полиэтилена толщиной 0.5 см. Структура элементарных ячеек этих сборок показана на рис.2.

Основной целью этих экспериментов было сопоставление измеренных критических параметров ($K_{эфф}$) для систем с различной "жесткостью" нейтронного спектра с соответствующими расчетными данными. В табл.4 приведены основные характеристики активных зон сборок КБР-22 и 23.

В центре активных зон сборок КБР-22 и 23 активационным методом были измерены

отношения сечений захвата ^{232}Th , ^{238}U и ^{237}Np к сечению деления ^{235}U . В сборке КБР-22, активная зона которой не содержит водорода, величина этих функциона-

Таблица 4

Характеристики критических сборок с уран-ториевыми активными зонами

Сборки	КБР-22	КБР-23
Ядерные концентрации (относительные)		
^{235}U	1.00	1.00
^{238}U	0.12	0.12
^{232}Th	3.98	5.30
H	-	1.94
C	-	0.97
Нерж. сталь X18H10	1.5	2.1
Радиус активной зоны (критический), см	42.03	40.03
Высота активной зоны, см	61.0	81.3
Толщина отражат.(UdepI O_2)		
Верхний и нижний, см	45	34
Радиальный, см	40	40
Критич. загрузка ^{235}U , кг	524.0	475.3
Доля нейтронного спектра ниже 10 keV, (расч), %	0.4	13

Таблица 5

Сравнение измеренных и рассчитанных относительных сечений реакций в различных зонах реактора БН-350

Ячейка	ЗМО(93)	БЗВ(262)	ВБЭ(118)
Реакция	Р/Э	Р/Э	Р/Э
$^{231}\text{Pa}(n,\gamma)$	1.57	1.47	1.58
$^{232}\text{Th}(n,\gamma)$	1.03	1.00	1.03
$^{232}\text{Th}(n,f)$	0.96	-	0.96
$^{232}\text{Th}(n,2n+\gamma,n)$	0.94	-	-
$^{233}\text{U}(n,f)$	1.00	-	0.98

лов практически не зависит от места расположения активационных детекторов. В случае же КБР-23, например, относительное сечение захвата тория в районе полиэтиленового блока почти в два раза превышает сечение внутри ториевого блока.

В центре всех рассмотренных выше сборок методом трековых детекторов были измерены относительные сечения деления ряда трансурановых нуклидов. В настоящее время проводится расчетный анализ всех исследованных уран-ториевых сборок с использованием различных расчетных программ и систем ядерных констант. Результаты такого анализа могут оказаться полезными для проверки расчетных методик, уточнения сечений тория, а также для составления benchmark моделей.

На реакторе БН-350 выполнено несколько серий измерений, связанных с проблемами ториевого цикла. В частности, определялись отношения сечений реакций на ^{232}Th , ^{231}Pa и ^{233}U к сечению деления ^{235}U в различных зонах реактора: в зоне малого обогащения (ЗМО), в боковой зоне воспроизводства (ВБЗ) и в экспериментальной сборке из обедненного металлического урана (ВЗВ) внутри зоны малого обогащения. Образцы в виде оксидов или металлической проволоки диаметром 0.8 мм помещались в капсулы из нержавеющей стали размером 1.6×0.16 мм. Облучение образцов осуществлялось в межтвельном пространстве ТВС при мощности реактора 5 МВт в течение 3 ч. Положение образцов в ТВС определялось с помощью пеленгации специально загруженного источника ^{192}Ir .

Результаты эксперимента сравнивались с данными расчета, выполненного по программе TRIGEX, что показано в табл.5.

Как видно, результаты экспериментов указывают на необходимость существенного снижения, принимавшегося в расчете сечения радиационного захвата нейтронов в ^{231}Pa . Остальные измерявшиеся отношения сечений согласуются с расчетными в пределах экспериментальных погрешностей.

Поступила в редакцию 22.12.98.

УДК 621.039.526:621.039.516.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРИЯ, ОБЛУЧЕННОГО В БОКОВОМ ЭКРАНЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА, И В ТЕПЛОВОМ СПЕКТРЕ ГРАФИТОВОГО РЕАКТОРА*

А.В.Звонарев, Б.Я.Зильберман, В.И.Иванов, Н.А.Нерозин, В.Б.Павлович, Б.А.Петрухин, Ф.П.Раскач, Э.Я.Сметанин, Л.В.Сытник, М.Ф.Троянов, Ю.С.Хомяков, Л.А.Чернов, И.Г.Шейнкер
ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Для определения возможностей накопления урана-232 ниже 10ppm ФЭИ организовал облучение образцов тория в боковом экране быстрого реактора БН-350 и в тепловом графито-водном реакторе с последующим радиохимическим анализом облученных образцов.

Основные результаты этих работ представлены в статье.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем ториевого цикла является образование урана-232, продукты распада которого - жесткие гамма-излучатели. Уран-232 сопровождает уран-233 на всех этапах технологии изготовления топлива и уже примерно через 1.5÷2 мес. определяет радиационную обстановку на рабочих местах.

На первой стадии освоения топлива на основе урана-233 было бы полезно не осложнять поисковые работы по технологии нового топлива и иметь уран-233 (хотя бы в небольших количествах) с низким содержанием урана-232 [1,2].

В ФЭИ условно принято, что при содержании урана-232 в уране-233 менее 10ppm ($<10^{-3}$ %) возможно использование перчаточных боксов. При содержании более 10ppm необходимо защитное оборудование, манипуляторы.

ОБЛУЧЕНИЕ ТОРИЯ В ЭКРАНЕ РЕАКТОРА БН-350

Цель данных исследований состояла в изучении изменений в нуклидном составе ториевых образцов, облучающихся в экране быстрого реактора, в зависимости от места и продолжительности облучения и, в частности, в исследовании возможности получения урана-233 с малым содержанием урана-232 (рис.1).

Предварительные оценки и анализ спектров нейтронов в различных зонах реактора БН-350 позволили предположить, что возможным перспективным местом для прямой наработки урана-233 с низким содержанием урана-232 могут быть

© А.В.Звонарев, Б.Я.Зильберман, В.И.Иванов, Н.А.Нерозин, В.Б.Павлович, Б.А.Петрухин, Ф.П.Раскач, Э.Я.Сметанин, Л.В.Сытник, М.Ф.Троянов, Ю.С.Хомяков, Л.А.Чернов, И.Г.Шейнкер, 1999

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу (Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

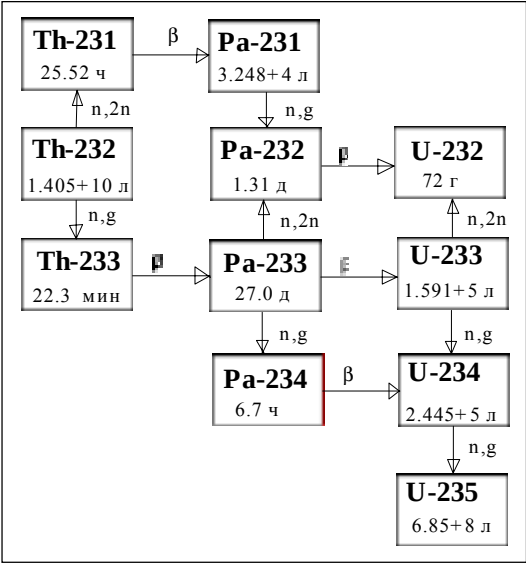


Рис.1. Схема взаимных превращений нуклидов Th-U

образцы содержали металлический торий. Образцы-свидетели размещались в межтвэльном пространстве ТВС бокового экрана и фиксировались с помощью специального держателя.

Образцы облучались в ячейках 619, 639, 656, и 672 (рис.2) в первом эксперименте в течение одной микрокампании, во втором- трех микрокампаний. После облучения ТВС поступала в бассейн выдержки, где из сборки извлекался образец-свидетель, который затем разделялся на отдельные капилляры. Последние были доставлены в ФЭИ для радиохимических исследований.

Технология исследований включила следующие операции: растворение капилляров при кипении в азотной кислоте с плавиковой кислотой, анализ растворов на содержание Th, U-233, радионуклидов Ce-144, Cs-137 (мониторы выгорания). С помощью экстракционно-хроматографических и сорбционных методов выделялась фракция U-233, проводилась глубокая очистка урана от тория, продуктов деления, химических примесей. После этого проводился альфа- и масс-спектрометрический анализы. В результате измерений были получены относительные накопления следующих вторичных нуклидов: Pa-233, U-232, U-233, U-234. В табл.1 приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных.

ОБЛУЧЕНИЕ ТОРИЯ В ТЕПЛОМ ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ

В ФЭИ были также проведены радиохимические исследования Th, облученного в уран-графитовом реакторе.

Таблица 1

Сравнение результатов расчета и эксперимента в реакторе БН-350

Изотоп	Ячейка 619 (Р-Э)/Р, %	Ячейка 639 (Р-Э)/Р, %	Ячейка 656 (Р-Э)/Р, %	Ячейка 672 (Р-Э)/Р, %
Pa ²³³	+1	+5	+22	+41
U ²³³	0	+3	+22	+40
U ²³²	+63	+41	+65	+89
U ²³⁴	-23	-23	-25	-36

Примечание: Р- результаты расчета, Э- эксперимента

Таблица 2

Характеристика облучения образцов в графитовом реакторе

№ образца п/п	Время облучения,эфф. сут., τ	Расстояние образца от центральной плоскости АЗ отн. ед.
1	152	0.91
2	230	0.39
3	75	0.055
4	152	0.36
5	230	0.39

Были исследованы три партии образцов, облучавшихся в течение 75, 152 и 230 эфф. сут. в различных местах реактора, характеристика которых представлена в табл.2.

Технология исследований аналогична вышеописанной и состояла из следующих операций:

- снятие алюминиевой оболочки растворением в натриевой щелочи с добавлением нитрата натрия до 0.8М/л;

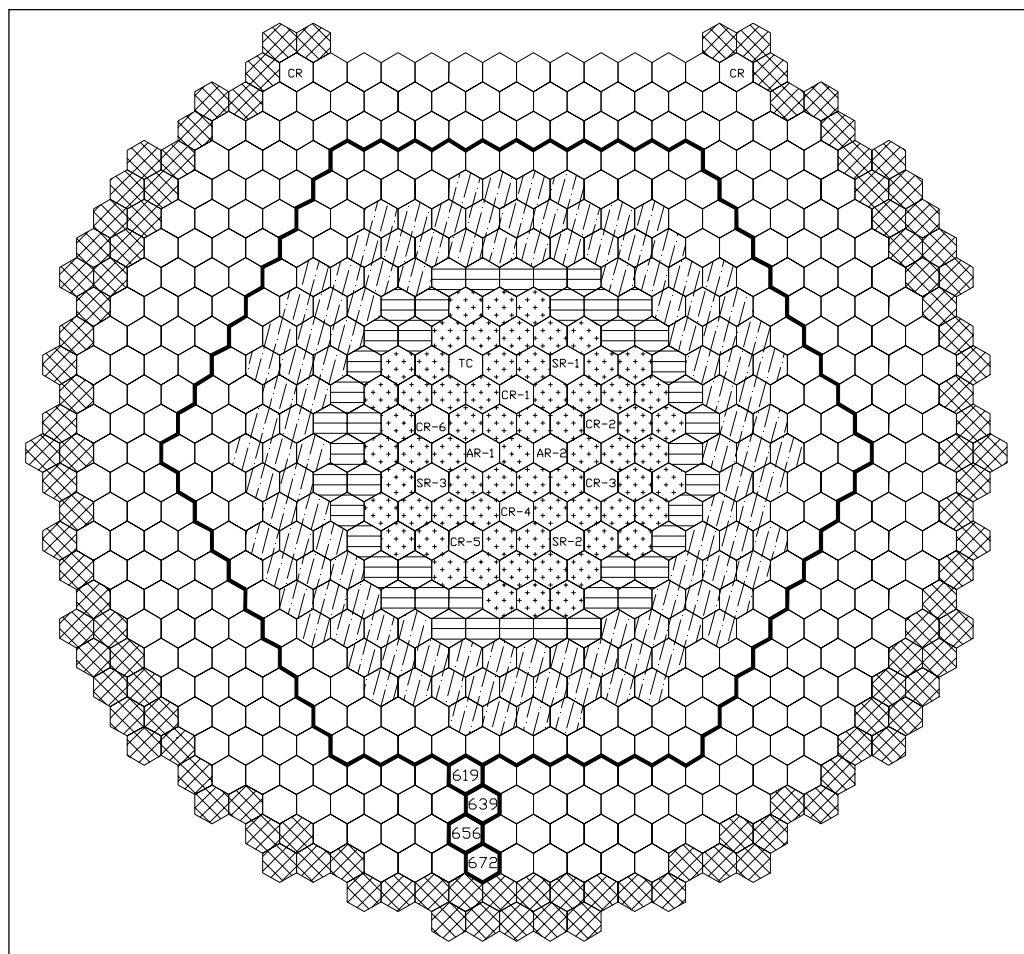


Рис. 2. Картограмма реактора БН-350

- растворение Th в 8М азотной кислоты с добавлением до 0.1М плавиковой кислоты при кипении и при постоянной кислотности раствора не выше 8М;
- проведение анализа на содержание тория (комплексометрически), урана (комплексометрически), церия-144 и цезия-137 (гамма-радиометрическим методом);
- экстракционное выделение фракции урана 5% ТБФ в толуоле;
- сорбционная доочистка урана с целью проведения альфа- и масс-спектрометрического анализов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По итогам проведенных исследований были сделаны следующие основные выводы:

1. Накопление урана-233 и содержание в нем урана-232 существенно зависит от места и продолжительности облучения ториевых образцов.

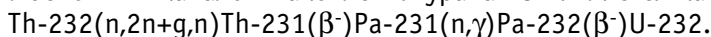
1.1. В реакторе БН-350 за один интервал между перегрузками накопление основного изотопа - урана-233 составляет величину от ≈ 4 мг/г - для первого ряда до ≈ 0.5 мг/г - для четвертого ряда бокового экрана. При этом уран-233 содержит от ≈ 11 ppm урана-232 (первый ряд БЭ) до ≈ 2 ppm урана-232 (третий и четвертый ряды).

1.2. При облучении тория в экране реактора БН-350 в течение трех микрокампаний содержание урана-232 увеличивается до величины от ≈ 40 ppm - в первом ряду НЭ до ≈ 6 ppm - в третьем и четвертом рядах. При этом накопление основного изотопа-урана-233 составляет от ≈ 15 мг/г (первый ряд БЭ) до ≈ 3 мг/г (четвертый ряд НЭ).

1.3. В тепловом графитовом реакторе получены следующие данные по накоплению урана и его чистоте: для образцов 1 и 2 - 0.5 и 1.7г U на кг Th, при чистоте 2.3 и 10.2ppm по U-232; для образцов 3÷5 - от 0.63 до 1.97г U на кг Th при чистоте от 1.7 до 10.3ppm по U-232. Содержание U-234 во фракции U составляло от 0.43 до 1.26% масс.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при облучении металлического тория в графитовом реакторе можно нарабатывать U-233 с чистотой по U-232 лучше 10ppm при накоплении 1.5÷1.7г U на кг Th.

2. Основным каналом накопления урана-232 является канал:



3. Сравнение результатов измерения количества образовавшегося топлива с расчетом показали хорошее согласие данных для внутренних ячеек бокового экрана. Различие с расчетом для ячеек, непосредственно граничащих с внутриреакторным хранилищем, объясняется неадекватностью расчетной модели по действительной загрузке хранилища.

4. Сравнение результатов измерений содержания урана-232 в накопившемся топливе с расчетом показали существенное завышение в расчете. Указанное расхождение связывается с неопределенностью сечения реакции захвата на протактинии-231. Данный эксперимент указывает на необходимость снижения сечения на примерно 50%.

5. Аналогичное расхождение по содержанию урана-234 связывается с сечением реакции захвата на протактинии-233. Данный эксперимент указывает на необходимость снижения данного сечения на примерно 20%.

6. Вывод по сечению захвата на протактинии-231 подтверждается результатами прямых измерений отношения среднего сечения данной реакции к сечению деления урана-235, выполненных на малой мощности реактора БН-350.

В заключение можно отметить, что имеется еще одна партия образцов тория-232, а также образцов урана-233 и урана-234, облученных в активной зоне реактора БН-350 в течение 5 микрокампаний. Образцы доставлены в ФЭИ и подготовлены для радиохимических исследований.

Список литературы

1. Казанцев. Г.Н., Мурогов В.М., Раскач Ф.П. и др. Ядерный топливный цикл на основе тория и урана-233: Препринт ФЭИ-2183. - Обнинск, 1991.
2. Мурогов В.М., Дубинин А.А., Зяблицев Д.Н. и др. Уран-ториевый топливный цикл - его преимущества и перспектива развития ядерной энергетики на его основе: Препринт ФЭИ-2448. - Обнинск, 1995.
3. Матвеев Л.В., Цендер Э.М. Уран-232 и его влияние на радиационную обстановку в ядерном топливном цикле. - М., 1985.

Поступила в редакцию 27.12.98.



ПЕРЕСЕКАЯ ПУСТЫНЮ

А. Ю. Гагаринский

Директор по внешней деятельности РНЦ-Курчатовский институт, г. Москва

Крупнейший Международный ядерный конгресс ENC-98 (25 – 28 октября, Ницца), проводимый раз в четыре года Европейским ядерным обществом, оказался последним перед новым тысячелетием и, очевидно, был обязан стать трибуной для обмена мнениями не только о состоянии и ближайшем будущем ядерной энергетики, но и о стратегии и долговременных перспективах. Надо заметить, что любой ядерный митинг, собирающий сегодня авторитетных специалистов, неизбежно, в силу чисто временных причин, приобретает стратегический характер. Таким стал и традиционный ежегодный симпозиум Уранового института (9 – 11 сентября, Лондон). Как стратегическая была задумана приуроченная к ENC-98 конференция неправительственной организации «Global Foundation» и Французского ядерного общества с демонстративным названием «Подготовка почвы для возрождения ядерной энергетики» (22 – 23 октября, Париж).

Если добавить, что по времени ядерные конференции практически совпали с 17-м Мировым энергетическим конгрессом в Хьюстоне (13 – 18 сентября) и очередной Всемирной климатической конференцией (COP-4) в Буэнос-Айресе (2 – 13 ноября), причем результаты первого и ожидания от второй многократно дебатировались в ядерном контексте, становится очевидным, что материалы «ядерных дискуссий конца века» заслуживают детального анализа.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА СЕГОДНЯ

Прежде всего следует сказать о явно прослеживаемой, причем не только «в кулуарах», но и выступлениях с трибуны, непривычно минорной для подобных форумов последних лет тональности обсуждения ядерных проблем, отражающей растущее политическое давление на эту отрасль энергопроизводства. Наиболее обсуждаемым фактом был, конечно, приход к власти в Германии коалиции партий, ставящей целью отказ страны от ядерной энергетики. В этой связи едкое замечание секретаря по промышленности Франции А. Пьерре на Парижской конференции, что Швеция провозгласила аналогичную политику 20 лет назад с известными результатами, и немецкий путь вряд ли будет короче, дает лишь оценку возможных темпов реализации антиядерной политики. Тем более, что программа немецких СДП и «зеленых» – отнюдь не единственный, хотя и наиболее значительный пример антиядерных политических решений. В их числе продолжающиеся усилия шведского правительства по закрытию АЭС Barseback, французское решение об остановке «Суперфеникса», недавно опубликованные намерения правительства Швейцарии ограничить срок службы АЭС и ввести налог на «невозобновляемые» источники энергии. Добавив к этому болгарские решения о закрытии ряда блоков и массивное давление Европейской комиссии на Украину и Литву по закрытию АЭС с реакторами РБМК, можно смело говорить о «цепной антиядерной реакции», возникшей в Европе. Состояние ее «критичности» отражает позиция Европейского парламента, с которой начал свой доклад на ENC-98 Х. Бликс. Обсуждая дальнейшие меры, которые должны быть приняты странами, подписавшими Конвенцию по климату, Европарламент лишь незначительным большинством (225 против 218) отклонил пред-



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

ложение, состоявшее в том, что ядерную энергетику нельзя считать безопасным и устойчивым методом производства энергии и, следовательно, она не может являться частью политики борьбы с изменением климата.

Возможно, принимаемые политиками решения, не вполне учитывают общественное мнение относительно ядерной энергетики. Согласно Х. Бликсу, «представляется вероятным, что в некоторых странах правительства и политические партии недооценивают объем молчаливой поддержки ядерной энергии... Опрос общественного мнения в Швеции показал, что почти 80% избирателей, включая большинство во всех шведских политических партиях, не согласны с политическим решением о закрытии АЭС Barseback. И хотя 74% считают самой важной экологической проблемой снижение эмиссии парниковых газов, только 10% ставят отказ от ядерной энергетики в список приоритетных экологических проблем».

Вместе с тем, политика, безусловно, отражает изменяющиеся экономические реалии, в том числе динамику энергетического рынка и сегодняшнего положения в нем ядерной энергетики. Именно этой теме было посвящено большинство ключевых докладов конференций. Образная оценка нынешнего трудного этапа развития ядерной энергетики, сделанная главой одного из ядерных «грандов» Франции – компании Cogema – Жаном Сиротой, вынесена в заголовок настоящей статьи. Еще более категоричен был генеральный секретарь Мирового энергетического совета Дж. Дуке, оценивший последние несколько лет как «потерянное для ядерного мира время».

Разумеется, не были обойдены стороной объективные достижения ядерно-энергетического сектора. Тот же Ж. Сирота подчеркнул, что капитальные инвестиции в ядерную энергетику в мире, которые можно примерно оценить в 1 трлн. долл. США (в ценах 1998 г.), доказали свою экономическую состоятельность и «окупались» экономией нефти и угля, которые многим странам приходится импортировать. По нефти эта экономия может быть оценена в 1,5 трлн. долл. США, на основе средней цены на нефть за последние 30 лет.

Достижения в улучшении эксплуатационных характеристик ядерной энергетики последнего десятилетия, представленные WANO в «натуральных» показателях, демонстрируют вполне очевидные положительные тенденции: с 1990 по 1997 гг. в мировой энергетике среднее значение коэффициента эксплуатационной готовности блоков выросло с 77,2 до 82%, непланового срабатывания аварийной защиты на 7000 ч критичности упало с 1,8 до 0,9 на блок, коллективной дозы – с 1,73 до 1,09 человеко-зиверта на блок, количество твердых радиоактивных отходов – со 108 до 35 м³.

Естественно, что эти тенденции положительно влияют на экономические показатели, что, например, было отражено в докладе, представленном на Парижскую конференцию Washington International Energy Group, где рассматривается снижение стоимости производства энергии на АЭС США, причем их лучшая десятка за 10 лет сумела снизить стоимость энергии с 2,05 до 1,3 цента за кВт.ч. Следует заметить при этом, что стоимость электроэнергии на шинах электростанций США составляет: на АЭС – 2,16 цента за кВт.ч, на угольных ТЭС – 1,98, на газовых ТЭС – 3,51. В список 25 наиболее экономичных электростанций США входят 5 АЭС, хотя впереди их – 20 угольных ТЭС.

БЛИЖАЙШЕЕ БУДУЩЕЕ

Хорошо известные оценки конкурентоспособности ядерной энергетики, представленные на ряде ядерных форумов последнего времени энергетическими агентствами ОЭСР (Международное энергетическое агентство (МЭА) и Агентство по ядерной энергии),



подтверждают ее в ряде стран при «спокойном» варианте развития экономики с коэффициентом дисконтирования 5% (однако отдают предпочтение углю и, особенно, газу, при десятипроцентном дисконтировании). Тема конкурентоспособности весьма детально и критически проанализирована в докладе на ENC-98 ведущих специалистов по «корпоративной стратегии» EDF, главного энергопроизводителя Франции.

На протяжении последних двадцати лет сравнение конкурентоспособности различных способов производства электроэнергии во Франции всегда демонстрировало существенное преимущество ядерной энергетики. Сегодня впервые наблюдается значительное сокращение запаса ее конкурентоспособности, если вообще не его исчезновение. Указываются три основных фактора, определяющие эту переменную:

- продолжительная стабильность цен на органическое топливо; после двукратного снижения в 80-е гг. цены на газ остаются относительно стабильными и, как ожидается, продемонстрируют тенденцию к еще большему снижению в последующие годы;
- «зрелость» энергетических технологий – снижение цен на оборудование и повышение его эффективности; в течение последних лет наблюдается спад цен на газовые турбины; сегодня производители предлагают установки комбинированного цикла с к.п.д. более 55%;
- постепенное исчезновение улучшения удельных экономических показателей с ростом мощности энергоблоков; сегодня мегаваттные газовые турбины стоят в расчете на установленный киловатт не больше, чем 600-мегаваттные установки комбинированного цикла.

Сочетание этих факторов привело как к развитию высокомощных энергетических станций комбинированного цикла, так и к появлению маломощного децентрализованного и близкого к потребителю энергопроизводства, в основном, в форме когенерации.

К тому же проводимая государственными властями, по меньшей мере, 100 странами или наднациональными организациями (в европейском случае) политика либерализации рынка, поощрение конкуренции в энергетическом секторе диктуют инвесторам выбор генерирующих систем с меньшим временем окупаемости инвестиций, что заведомо ставит ядерную энергетику в невыгодное положение. Этот вывод применительно к условиям США практически повторяет ABB Combustion Engineering Nuclear Power. Условие конкурентоспособности АЭС на дерегулированном американском энергетическом рынке, помимо стоимости кВт.ч ниже 3 центов, что реализуется (см. выше), – снижение капитальной составляющей для новых АЭС не менее, чем на 35%, что требует фундаментальных инноваций в ближайшей перспективе. По оценкам, дерегулирование энергетики даст американским потребителям за десять лет экономию в размере 60-80 млрд. долл.

Ожидается, что в предстоящие 20 лет роль газа в европейских поставках электроэнергии будет расти. Основным активом ядерных энергокомпаний в эти годы перед лицом конкуренции со стороны новых газовых станций являются существующие АЭС, инвестиции в которые в большой мере уже окупились, а затраты на эксплуатацию и топливо существенно ниже, чем у других энергоисточников. К тому же АЭС смогут работать больше запланированного срока (составляющего, как правило, 40 лет), существенно увеличивая свои преимущества в конкурентоспособности.

Ведущие специалисты ядерной индустрии согласованно оценивают период «пересечения пустыни», когда в США и Западной Европе, за исключением, может быть, Финляндии и Франции, новые АЭС строиться не будут, по меньшей мере, в 10 лет. Разумеется, это не относится к Восточной Азии, где подтвержденные на ENC-98 планы «только» Китая



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

составляют 40 ГВт установленной мощности к 2020 г. Однако амбициозные ядерно-энергетические планы восточно-азиатских стран, экономика которых вошла в «зону турбулентности», также могут испытать, как отмечено на симпозиуме Уранового института, существенную временную задержку.

ДАЛЬНЯЯ ПЕРСПЕКТИВА

Ожидание возрождения ядерной энергетики в долгосрочной перспективе – основной тезис большинства «стратегических» докладов. В его подтверждение приводятся не только чисто экономические (ожидаемый рост цен на органическое топливо – их скачок, по прогнозу МЭА ОЭСР, придется на 2010 – 2015 гг.), но и политические аргументы:

- геополитические последствия растущей зависимости Европы от импорта органического топлива из нестабильных регионов, особенно, когда большинство европейских АЭС выработают свой ресурс (2010 – 2020 гг.);
- растущее значение проблем, связанных с глобальным потеплением в результате эмиссии парниковых газов, в связи с обязательствами, принятыми правительствами в рамках Киотского протокола к Конвенции ООН по климатическим изменениям.

Однако это изменение конкурентоспособности ядерной энергетики произойдет тогда, когда (и, если) ожидаемые внешние экологические затраты на энергопроизводство будут оценены и твердо определены для производителей энергии, т.е. войдут в стоимость электроэнергии. С разной степенью уверенности, но большинство ядерных специалистов предполагают такое развитие событий, хотя политики как в Киото, так и в Буэнос-Айресе пока не спешат включать ядерную энергию в число перспективных безэмиссионных технологий. С другой стороны, рост озабоченности в связи, например, с потенциальным влиянием радиации на здоровье людей (прежде всего, на конечной стадии топливного цикла) может повредить конкурентоспособности ядерной энергетики или (как в странах, где ядерная энергетика запрещена) ее практической реализуемости.

Общий вывод: технологии, цены, общественное восприятие будут претерпевать существенные изменения, и ядерной энергетике придется принять этот вызов, чтобы вновь завоевать конкурентоспособность, ослабленную в последние годы. Неопределенности, связанные с возможными сценариями развития ядерной энергетики, наглядно отражаются в количественных показателях. Так, прогнозы Уранового института при некотором росте мировых мощностей в «референтном» сценарии с 343 ГВт(э) на конец 1997 г. до 376 ГВт(э) и 405 ГВт(э) в 2010 и 2020 гг., соответственно, имеют огромный разброс (на 2020 г.) от 293 до 483 ГВт в минимальном и максимальном вариантах.

Качественно подобную картину рисуют энергетические агентства ОЭСР, рассматривающие три (как подчеркивается, технически и экономически возможных) сценария изменения ядерно-энергетических мощностей мира до середины следующего века. В варианте «продолжающегося роста» установленные мощности АЭС мира достигнут к 2020 г. уровня в 570 ГВт(э), а к 2050 г. – 1100 ГВт(э). Заметим, что этот «максимальный» вариант предполагает вполне умеренный рост ядерных мощностей мира – на ≈ 35 ГВт(э) в год (что сравнимо с ситуацией середины 80-х гг.), т.е. менее 1000 МВт(э) в год на одну страну, предполагая, что к середине века около 50 стран мира будут эксплуатировать АЭС. Вариант быстрого «вывода» ядерных мощностей после 2010 г. приводит их к нулю в середине века. Наконец, в варианте «стагнации с последующим возрождением» политические и (или) экономические причины сводят мощности АЭС до ми-



нимума в 50 ГВт к 2020 г. с последующим быстрым ростом и выходом на первый сценарий к 2050 г. При этом отмечается, что уменьшение выброса парниковых газов (выраженное в CO₂-эквиваленте) составит для максимального варианта роста 6,3 Гт в 2050 г., т.е. около трети прогнозируемой мировой эмиссии от энергетического сектора (19 Гт в год).

При этом эксперты Уранового института подчеркивают, что ресурсы урана более чем достаточны, чтобы удовлетворить требованиям даже верхнего сценария развития ядерной энергетики до 2020 г. и далее. Исходя из потребности в 60 – 80 тыс.т урана в год в ближайшие 20 лет, мировые ресурсы порядка 3 млн. т урана с ценой извлечения ниже 80 долл. США за килограмм урана могут покрыть 30 – 40 лет потребления, а потенциальные ресурсы с ценой извлечения до 130 долл. за килограмм (согласно МЭА – более 15 млн.т) заведомо превышают кумулятивные потребности в уране до середины века при самом быстром варианте роста ядерных мощностей.

Сегодняшнее мировое производство урана (около 36 тыс.т) лишь на 60% покрывает потребности рынка. Кроме прогнозируемого развития производства (~20 тыс.т), баланс достигается за счет вторичных источников урана: запасы в хранилищах, оцениваемые в 215 тыс.т, военный уран (от 7 до 10 тыс.т урана в год в разных сценариях), обедненный и регенерированный уран. Значительная доля этих «вторичных запасов» относится к России, возможности экспорта которой из этого источника оцениваются в 14 – 17 тыс.т урана в год.

Следует отметить, что ни в сценарии Уранового института до 2020 г., ни даже в прогнозы МЭА до середины века не включены реакторы-размножители в качестве источников топлива, а рассматривается лишь MOX-топливо из легководных реакторов, кумулятивный вклад которого до 2050 г. соответствует 600 тыс. т урана. Сегодняшняя база для такого прогноза – промышленное производство около 200 т MOX-топлива (по тяжелому металлу) в год, загружаемого более чем в 30 реакторов пяти стран.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Поскольку проблемы замыкания топливного цикла и обращения с радиоактивными отходами были вынесены в отдельную конференцию RECOD-98, проходившую параллельно с ENC-98, технологические аспекты, собственно, на Конгрессе концентрировались вокруг опыта эксплуатации АЭС и философии их жизненного цикла, а также перспектив и роли новых реакторов в ядерной энергетике будущего и их топливообеспечения. При этом пленарные доклады на ENC-98 были посвящены исключительно перспективным легководным реакторам, как уже реализованным на практике, так и «существующим» в разных стадиях проектирования.

К числу первых относится французский реактор №4 мощностью 1500 МВт(э), представленный как базовый для разработки Европейского реактора с водой под давлением (EPR). Два реактора №4 уже эксплуатируются около двух лет на АЭС CHOOZ, еще два находятся на разных стадиях ввода в эксплуатацию на АЭС CIVAUX.

В качестве перспективы «ядерной энергетики для нового тысячелетия» были представлены реакторы ABWR мощностью 1400 МВт(э) фирмы General Electric. Первые два усовершенствованных кипящих реактора эксплуатируются в Японии (с 1996 и 1997 гг.). Еще два строятся на Тайване. Следует заметить, что одним из главных и подтвержденных достоинств своего проекта GE видит в сравнительно низкой капитальной составляющей стоимости – 1600 долл. за кВт установленной мощности.

Набор «будущих» реакторов, естественно, включал упоминавшийся франко-герман-



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

ский проект EPR, который в случае его реализации станет самым мощным энергетическим реактором в мире (1750 МВт(э)). Другие – европейский вариант SPWR фирмы Westinghouse – EP-1000, SWR-1000 фирмы Siemens и следующее поколение шведских кипящих реакторов BWR90+ мощностью 1500 МВт(э), заявленное ABB Atom (Швеция) и TWO (Финляндия), с подчеркиваемыми достоинствами: сроком сооружения менее 1500 дней и эксплуатационной готовностью выше 90%.

Двум реакторным направлениям, хотя и не попавшим в пленарные заседания, в силу инициативы из ряда стран были посвящены специальные рабочие группы.

Одно из них – высокотемпературная реакторная технология – было представлено сообщениями из Японии, Китая, Германии, Южной Африки, Франции, США и Нидерландов. Перечень характеризует сохраняющуюся и возникающую приверженность ряда стран к этому, включающему довольно продвинутые проекты модульных реакторов (например, GT-MHR) направлению, основанную на его ключевых свойствах: внутренне присущей безопасности, высоком к.п.д., низком уровне воздействия на окружающую среду, высоком потенциале выжигания плутония.

Единственным реакторным направлением, где обсуждение на ENC-98 углублялось в исследования и разработки, были реакторы на быстрых нейтронах. Причина этого сформулирована уже в названии доклада Б. Баррэ, директора Департамента ядерных реакторов Комиссариата по ядерной энергии Франции: «Быстрые реакторы: назад к будущему». Направление, приведшее к эксплуатации и остановке 1200-мегаваттного реактора Superphenix, разработке проекта Европейского быстрого реактора мощностью 1500 МВт(э) и последовавшему прекращению работ, снова возвращается в стадию выбора пути, исследований и разработок.

Разумеется, одно решение уже известно. Отработанность натриевой технологии подтверждена, что, естественно, подчеркивалось и во французских докладах, и в представленном опыте эксплуатации российского БН-600. Однако сегодняшний взгляд в мире на ядерно-энергетические перспективы относит коммерческую потребность в бридерах на 2030 – 2040 гг., что объективно дает время для просмотра альтернативных концепций. На ENC-98 их представляли основанный на достижениях AGR газоохлаждаемый бридер GCFR (Великобритания) и уже хорошо известный в России проект свинцового бридера BREST-1200.



СОВЕЩАНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ

«КОРРОЗИЯ И ЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС»

12 – 17 сентября 1999 г., Владимир, Россия

Организаторы

Международное агентство по атомной энергии, международная рабочая группа по управлению сроком эксплуатации АЭС, Ядерное общество России, Российский научный центр «Курчатовский институт».

Тема

Процессы, механизмы коррозии и эрозионного износа, результаты экспериментальных исследований и эксплуатационного опыта по смягчению коррозии и эрозионного износа оборудования и трубопроводов АЭС.

Обсуждаемые вопросы

- Достижения теории и практики для смягчения факторов влияния при коррозионном и эрозионном повреждениях компонентов и трубопроводов АЭС.
- Современные представления о процессах коррозионного и эрозионного повреждения компонентов АЭС.
- Особенности и практика обнаружения коррозионных и эрозионных повреждений компонентов АЭС методами неразрушающих испытаний.
- Моделирование коррозионных повреждений и учет их влияния при расчетных оценках срока безопасной службы и промышленного риска при эксплуатации компонентов АЭС.
- Материаловедческие аспекты защиты от коррозионных повреждений компонентов АЭС. Защитные и изоляционные материалы. Современные технологии нанесения защитных покрытий.
- Оптимизация параметров водно-химических режимов для снижения скорости коррозионных повреждений компонентов и трубопроводов АЭС.
- Теплогидравлические процессы и эрозионный износ элементов трубопроводов и компонентов АЭС.
- Теория и практика технического обслуживания для предупреждения стресс-коррозионных, коррозионных и эрозионных повреждений компонентов АЭС, обеспечения безопасности и продления срока службы атомных станций.
- Нормативное регулирование в области обнаружения и учета влияния стресс-коррозионных, коррозионных и эрозионных повреждений на безопасность и срок службы компонентов АЭС.

Место и время проведения

Совещание планируется провести в Учебном центре города Владимира с 12 по 17 сентября 1999 г.

Иностранные участники будут встречены представителями оргкомитета в аэропорту Шереметьево-2 (г. Москва), российские участники – в Москве (РНЦ «Курчатовский институт»).



ЯДЕРНОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ

Организационные взносы

Организационный взнос, включающий в себя проживание в одноместных номерах, питание, участие в банкетах, экскурсиях и культурной программе, обеспечение Трудами, будет сообщен дополнительно.

Для участия в совещании необходимо направить свою заявку по адресу:

123182, Москва, пл. Курчатова, РНЦ «Курчатовский институт», С. Геращенко.

Факс: (095) 196-45-88.

E-mail: nik@nw.oirtorm.net.kiae.su

Тел.: (095) 196-70-84, (095) 196-94-20.

10-Я ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯОР

«ОТ ПЕРВОЙ В МИРЕ АЭС К ЭНЕРГЕТИКЕ XXI ВЕКА»

28 июня – 2 июля 1999 г., Обнинск, Россия

Председатель Организационного комитета А.В. Зродников (ФЗИ).

Председатель Программного комитета – Л.А. Кочетков (ФЗИ).

Тематика конференции:

- Накопленный опыт; достижения и проблемы.
- Аварии на АЭС; опыт их преодоления и предупреждения.
- Требования к энергоблокам нового поколения, состояние разработок новых блоков; концепции перспективных АЭС.
- Проблемы топливного цикла; стимулы и условия перехода к замкнутому топливному циклу.
- Методы оценки безопасности и пути ее обеспечения.
- Условия конкурентности АС; пути улучшения их экономики. Проблемы методологии оценки экономической эффективности энергоблоков; учет экологического воздействия, снятия с эксплуатации.
- Экологическое воздействие атомной энергетики за 45 лет ее существования на окружающую среду. Обращение с радиоактивными отходами.

Тематика «круглых столов»:

- Радиационные технологии; производство изотопов.
- Международная гармонизация требований к энергоблокам АЭС, персоналу, эксплуатационной и нормативной документации.
- Малая атомная энергетика; надежды и реальность.
- Наукोगрады – сохранение научно-технического потенциала для будущего.

Контакты:

Обнинск (ФЗИ),

Москва (секретариат ЯОР).

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГООБЛОКОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.В. Антонов

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Рассмотрена задача анализа неопределенностей, вызванных существенной неадекватностью концептуальных и математических моделей, численной аппроксимацией, ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. В качестве методологии анализа предложены методы статистической теории подобия. Рассмотрен критерий Фишера, который является частным случаем моделей, полученных в рамках теории подобия. Приведен числовой пример, иллюстрирующий применение предложенной методики.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам обеспечения безопасной эксплуатации энергоблоков с ядерными реакторами уделяется большое внимание во всех развитых странах. Существуют требования Международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ), а также требования национальных надзорных органов, согласно которым для всех действующих, строящихся и проектируемых атомных станций, необходимо проводить вероятностный анализ безопасности (ВАБ). Для решения данной задачи существуют методические рекомендации, например, "PROCEDURES FOR CONDUCTING PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS (LEVEL 1 & 2)", в которых расписаны основные процедуры выполнения анализа. Большинство вопросов, решаемых в ходе выполнения ВАБ, имеют достаточно хорошо разработанное методическое обеспечение. При решении же ряда вопросов возникают трудности. К одному из таких проблемных вопросов относится анализ неопределенностей.

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Целью этого раздела вероятностного анализа безопасности является определение количественных характеристик неопределенностей результатов ВАБ, а, именно, неопределенностей при оценке частоты повреждения активной зоны, частоты появления аварийных последовательностей и доминирующих аварийных последовательностей. Анализ неопределенностей является важной задачей ВАБ. Одно из преимуществ ВАБ состоит в том, что он может выявить ряд источников неопределенностей и помочь количественно оценить и наглядно представить значительную их часть. Поскольку модель

© А.В. Антонов, 1999

ВАБ только стремится отобразить реальность, то неизбежно существование упрощений, допущений и идеализаций сложных процессов и явлений. Результатом этих упрощений и идеализаций будут неопределенности в результатах. Можно выделить три основные категории источников неопределенностей в соответствующих моделях. А именно, следующие:

- **Полнота.** Главным назначением модели ВАБ является оценка возможных сценариев (последовательностей событий), которые могут привести к нежелательным последствиям – повреждению активной зоны. Однако нет гарантии, что этот процесс всегда будет полным и что все возможные сценарии выявлены и верно оценены. Этот недостаток полноты приводит к неопределенности в результатах и в выводах анализа, которые трудно проанализировать или определить количественно.

- **Адекватность моделирования.** Даже для тех сценариев, которые были определены, последовательность событий и логические модели систем не точно отражают реальность. Существуют неопределенности, вызванные существенной неадекватностью концептуальных и математических моделей, численной аппроксимацией, ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. Эти неопределенности рассматриваются как часть анализа неопределенностей ВАБ, причем для оценки их относительной значимости обычно проводятся исследования чувствительности результатов. Часть этих неопределенностей также можно рассчитать с использованием формального анализа неопределенности.

- **Неопределенность исходных параметров.** Параметры различных моделей, используемых в ВАБ, точно неизвестны вследствие недостаточности данных, изменчивости характеристик персонала и элементов станций, а также допущений, сделанных экспертами. Эта третья категория неопределенностей при современном состоянии методологии может быть наиболее успешно охарактеризована численно.

Неопределенность исходных параметров определяют следующим образом. Пусть $F_c(P_i, t)$ – оцениваемый показатель системы. Неопределенность в оценке показателя будет выражаться через дисперсию $D\{F_c(P_i, t)\}$, которая определяется в виде:

$$D\{F_c(P_i, t)\} = \sum \left(\frac{dF_c(P_i, t)}{dP_i} \right)^2 DP_i.$$

В данной формуле предполагается, что показатели $P_i(t)$ и $P_j(t)$ независимы по всем i и j , при $i \neq j$.

Что касается неопределенностей, связанных с полнотой анализа, то эта составляющая неопределенности обусловлена субъективными факторами. Уменьшение влияния полноты анализа достигается путем углубления исследования аварийных процессов и сценариев, приводящих к повреждению активной зоны. Анализ неопределенности, связанной с адекватностью моделирования, относится к категории формализуемых задач, решение которых, однако, имеет сложности. Остановимся на этом вопросе более подробно.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ходе проведения ВАБ исследователи решают большое количество задач, связанных с расчетами характеристик надежности элементов, каналов, систем энергоблоков; вычислением частот внутренних и внешних исходных событий аварий; расчетами деревьев событий. Все перечисленные расчетные процедуры базируются на вероятностных моделях, описывающих явления, события и процессы, происходящие в реакторных установках. Объективных статистических данных для построения таких моделей, как правило, недостаточно, а зачастую они вообще отсутствуют. Поэтому для построения моделей используют теоретические разработки конкретной области приложения. Зада-

ча заключается в обосновании справедливости применения теоретических моделей для описания явлений, событий и процессов, происходящих в реакторной установке. Иными словами, задача состоит в доказательстве адекватности модели реально происходящим процессам.

Как известно, практика - критерий истины. Поэтому для решения задачи проверки адекватности модели необходима хотя бы минимальная статистическая информация об описываемых процессах, полученная на этапе эксплуатации. Пусть на основании выборки ограниченного объема данных о поведении описываемого процесса построена эмпирическая функция $F_3(t)$, по теоретическим данным построена функция $F_t(\beta, t)$, где β – вектор параметров модели, t – время. Необходимо проверить гипотезу: удовлетворяет ли модель $F_t(\beta, t)$ статистическим данным, полученным в ходе эксплуатации объекта?

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи будем использовать результаты статистической теории подобия. Введем вектор $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k]$, где

$$\rho_i = \frac{a_{3i}}{a_{Ti}}, \quad (1)$$

a_{3i} , a_{Ti} – однотипные параметры, рассчитанные по эмпирическим данным и на основании модели соответственно. Модель будет адекватно описывать эксплуатационные данные, если по каждому критерию ρ_i будет выполняться условие подобия, которое означает равенство единице отношения (1) для всех ρ_i . Поскольку параметры, входящие в выражение (1), в общем случае являются случайными величинами, то сам критерий (1) является функцией от случайных величин. В стохастической постановке принято считать, что условие подобия выполняется, когда критерий ρ_i находится в пределах верхней и нижней границ доверительного интервала

$$\rho_i \in [\rho_i^H, \rho_i^B]. \quad (2)$$

Таким образом, задача сводится к определению доверительного интервала (2) по каждому критерию ρ_i с одной и той же доверительной вероятностью. Если такие интервалы найдены и выражение (2) выполняется для всех i , то модель будет адекватна эмпирическим данным. Если хотя бы по одному критерию условие (2) не выполняется, то считать модель адекватной эмпирическим данным оснований нет. Методика определения доверительного интервала основана на определении плотности распределения критерия ρ_i . Пусть $F_\rho(k)$ – функция распределения случайной величины ρ , так что

$$F_\rho(k) = P(\rho < k) = P\left(\frac{a_{3i}}{a_{Ti}} < k\right).$$

Величины a_{3i} и a_{Ti} независимы, следовательно, их совместная плотность распределения есть произведение плотностей a_{3i} и a_{Ti} . Согласно [3], вероятность соотношения $a_{3i}/a_{Ti} < k$ выражается интегралом от совместной плотности распределения по области, определенной неравенствами $a_{Ti} > 0$, $a_{3i} < a_{Ti} k$:

$$F_\rho(k) = \int_{a_{Ti} > 0} \int_{a_{3i} < a_{Ti} k} f_{aT}(y) f_{a3}(z) dy dz.$$

Будем считать, что функция распределения $F_\rho(k)$ дифференцируема, т.е. существует плотность $f_\rho(k)$. Тогда определив вид плотности распределения статистики критерия ρ , можно определить доверительные границы из соотношений:

$$\int_0^p f_p(k) dk = \alpha,$$

$$\int_p^\infty f_p(k) dk = \alpha.$$

Более детально методика определения доверительных границ рассмотрена в [4,5].

Частным случаем статистической теории подобия является критерий Фишера. Рассмотрим данный критерий применительно к задаче проверки адекватности модели. Введем показатель – дисперсия воспроизводимости $S_{\text{вос}}^2$, который будет характеризовать точность оценивания показателя a_{ji} , полученного на основании эмпирических данных. Далее определим дисперсию адекватности $S_{\text{ад}}^2$, которая будет характеризовать отклонение эмпирических показателей от показателей, полученных на основании расчетов с использованием теоретической модели. Тогда, статистика критерия Фишера будет иметь вид:

$$\bar{F} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{вос}}^2}.$$

Рассчитанное значение статистики критерия Фишера необходимо сравнить с табличным значением $F(q, \alpha)$, где q – количество степеней свободы, равное объему данных, на основании которых построена эмпирическая функция распределения, минус число наложенных связей, α – уровень значимости, с которым принимается гипотеза об адекватности модели.

Если $\bar{F} < F(q, \alpha)$, гипотеза об адекватности принимается, если $\bar{F} > F(q, \alpha)$ – гипотеза отвергается.

Пример.

Рассмотрим применение критерия Фишера проверки гипотезы адекватности модели к задаче расчета надежности канала аварийной защиты по скорости нарастания мощности в рабочем диапазоне системы аварийной защиты АЗ-5 энергоблоков 1-4 Курской АЭС. Следует отметить, что каналы, работающие на каждом блоке, идентичны. Функциональная схема канала приведена на рис.1. Логическая функция работоспособности канала имеет вид:

$$P_1 = P_{\text{БП-39}} \cdot P_{\text{КНК-53}} \cdot P_{\text{УЗС-13}}$$

$$P_2 = P_1 + P_{\text{сх.УЗС}} + P_{\text{сх.500}} - P_1 \cdot P_{\text{сх.УЗС}} - P_1 \cdot P_{\text{сх.500}} - P_{\text{сх.УЗС}} \cdot P_{\text{сх.500}} + P_1 \cdot P_{\text{сх.УЗС}} \cdot P_{\text{сх.500}}$$

$$P_k = P_2 \cdot P_{\text{З-или}}$$

$$K_T = P_2 \text{ из 3} \cdot (3 \cdot P_k^2 - 2 \cdot P_k^3),$$

где $P_{\text{БП-39}}$, $P_{\text{КНК-53}}$, $P_{\text{УЗС-13}}$ и т.д. – вероятности безотказной работы соответствующих элементов. Характеристики надежности указанных элементов известны. Для проведения расчетов надежности данного канала построена имитационная модель, учитывающая наличие запасных элементов, наличие контроля за исправностью функционирования и профилактическое восстановление работоспособности канала. Из опыта длительной эксплуатации за период с момента пуска каждого блока до 1998 г. известно, что опасных отказов типа несрабатывание канала на требование ни на одном блоке зафиксировано не было, однако было зафиксировано два ложных срабатывания каналов, которые привели к останову блока. Отказы были зафиксированы в моменты $T_1 = 6816$ ч и $T_2 = 7483$ ч работы канала после соответствующего профилактического восстановления. Рассчитаем характеристики надежности канала. Расчетное время будем брать равным 8000 ч, т. к. через это время энергоблоки останавливают на профилактику, во время которой работоспособность элементов восстанавливается до первоначального уровня.

Таблица 1

Функция распределения

№ п/п	Интервал времени, ч.	Эмпирическое значение ВБР	Значение ВБР, рассчитанное по модели
1.	6816(-)	1	1
2.	6816(+)	0,9891	0.999828
3.	7483(+)	0,9782	0.999812
4.	8000	0,9782	0,9998

ня. Оценки ВБР, полученные на основании эмпирических данных, рассчитаны по результатам наблюдений за четырьмя идентичными комплектами оборудования в течение 24-26 лет в зависимости от пуска энергоблока. Общее количество наблюдений, таким образом, равно 92 ед. При этом случайная величина, характеризующая факт безотказного функционирования относительно аварийно-опасных отказов во всех случаях равна 1, а относительно ложных срабатываний в двух случаях равна 0, и в 90 случаях равна 1. Оценка вероятности безотказной работы (ВБР) канала относительно аварийно-опасных отказов, полученная на основании эмпирических данных равна $P_3(T)=1$, где $T=8000$ ч. На основании модельных расчетов для этой же характеристики получен результат $P_T(T) = 0,9998$. По отношению к ложным срабатываниям статистические данные позволяют построить эмпирическую функцию распределения. Информация по ложным отказам может быть

представлена в виде схемы с цензурированными наработками. Все остальные периоды функционирования имеют усеченную справа наработку, равную 8000 ч. Таким образом, при построении эмпирической функции распределения будем использовать методику ее оценивания по цензурированным наработкам. В табл.1 представлены значения эмпирической функции распределения (графа3) и значения, рассчитанные по модели (графа4). Определим для этих значений дисперсии воспроизводимости и адекватности. Основываясь на эмпирических данных, получаем, что дисперсия воспроизводимости равна $S^2_{\text{вос}}=0.033036$,

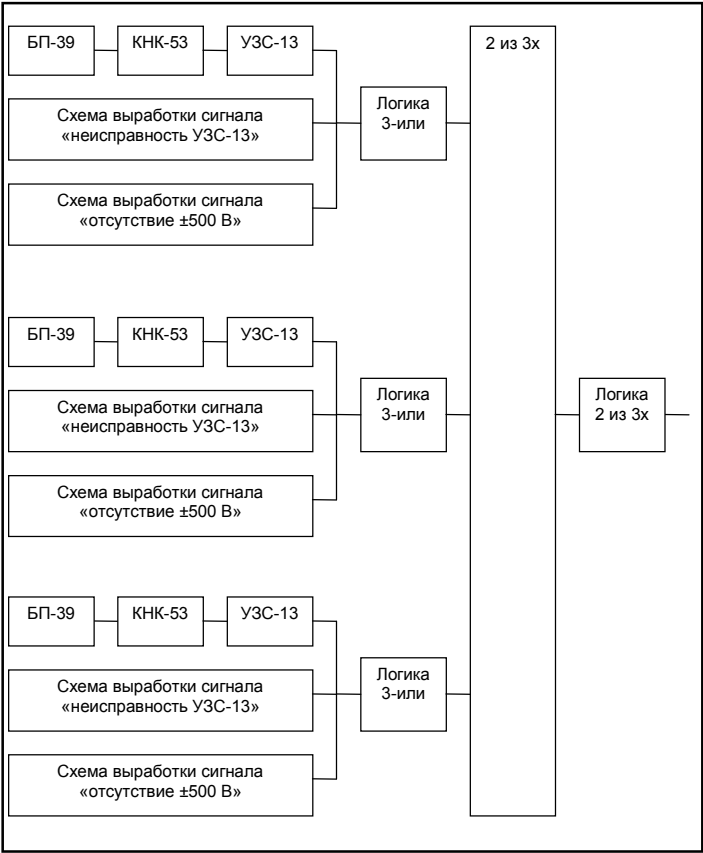


Рис. 1. Функциональная схема канала аварийной защиты по скорости нарастания мощности реактора в рабочем диапазоне (АЗСр)

дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2 = 0.00108$. Рассчитывая значение статистики Фишера, получаем

$$\bar{F} = \frac{0.00108}{0.033036} = 0.0327,$$

что значительно меньше табличного значения критерия Фишера и, следовательно, гипотезу об адекватности модели эмпирическим данным принять можно. Рассмотренный пример иллюстрирует возможность применения предлагаемого методического подхода к задачам анализа неопределенностей, вызванных существенной неадекватностью концептуальных и математических моделей, численной аппроксимацией, ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. К достоинствам метода следует отнести его способность давать оценку степени адекватности в условиях ограниченных статистических выборок.

Список литературы

1. PROCEDURES FOR CONDUCTING PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS (LEVEL 1), IAEA, VIENNA, 1990.
2. PROCEDURES FOR CONDUCTING PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS (LEVEL 2), IAEA, VIENNA, 1995.
3. Крамер Г. Математические методы статистики. - М.: Мир, 1975.
4. Антонов А.В., Острейковский В.А. Оценивание характеристик надежности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами. - М.: Энергоатомиздат, 1993.
5. Антонов А.В. Об одном методе проверки однородности информации в случае параметрического оценивания характеристик надежности // Надежность и контроль качества. - 1993. - №10. - С.20-32.
6. Скрипник В.М., Назин А.Е., Приходько Ю.Г. и др. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам. - М.: Радио и связь, 1988.

Поступила в редакцию 21.12.98.

КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

А.О.Скоморохов*, М.Т.Слепов**

** Обнинский институт атомной энергетики, г.Обнинск*

*** Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж*



В статье рассматривается автоматизация процедуры отбраковки спектров системы вибрационного мониторинга, установленной на 3 и 4 блоках Нововоронежской АЭС. Описаны признаки, позволяющие разделить исходное множество спектров на классы "норма" и "не норма" и выбрать наиболее информативные признаки спектров. Произведено диагностирование конкретных видов неисправностей на основе разработанных авторами критериев.

ВВЕДЕНИЕ

Система вибрационного мониторинга Нововоронежской АЭС разработана фирмой Сименс (Германия) и введена в эксплуатацию в 1992 г. Предоставляя развитые средства измерения и предварительной обработки вибросигналов, система не имеет функций поддержки принятия решений при диагностировании, за исключением простейших, типа вывода графиков тренда отдельных спектральных составляющих. В этой связи актуальной представляется задача разработки методического, алгоритмического и программного обеспечения для автоматизации интеллектуальной обработки информации и поддержки процесса диагностирования при использовании системы вибромониторинга.

Первичной информацией для системы диагностирования являются спектры сигналов вибраций, получаемых с датчиков системы, установленных на различных элементах оборудования. В процессе эксплуатации системы на НВАЭС, особенно в начальный период, неоднократно регистрировались аномальные спектры. Под термином "аномальный спектр" следует понимать спектр, изменения которого вызваны не нарушениями в работе контролируемого оборудования, а различного рода неисправностями измерительных каналов. Среди таких неисправностей можно назвать, например, обрыв измерительных линий, замыкание на землю одной из обкладок пьезокристалла, неверная настройка канала, нарушение положения сейсмической массы и др.

Вероятность возникновения неполадок, приводящих в аномальному виду спектров, достаточно высока. Так, среди 2304 спектров, анализируемых в настоящей статье, экспертами были признаны аномальными 25% и еще 10% классифицированы как «подозрительные». Важность задачи контроля достоверности информации в рассматриваемой системе определяется тем, что

- наличие аномальных спектров в выборке данных приведет к искажению результатов работы всех алгоритмов анализа и диагностирования;

© **А.О.Скоморохов, М.Т.Слепов, 1999**

- наличие аномальных спектров среди результатов измерения свидетельствует о наличии в измерительных каналах неисправностей, подлежащих скорейшему устранению.

В настоящей статье рассматриваются методы, позволяющие автоматизировать решение двух следующих задач:

- контроль достоверности измерительной информации (спектров вибраций) с отбраковкой аномальных результатов;
- диагностирование вида неисправности измерительного канала, послужившей причиной появления аномального спектра.

СИСТЕМА ВИБРОДИАГНОСТИКИ НВАЭС

Для выполнения своих функций система имеет первичные преобразователи различного типа, аппаратуру обработки сигналов и средства для представления полученной информации пользователю. Вся вторичная аппаратура размещена в двух стойках, находящихся в "чистой зоне" (помещение Лаборатории технической диагностики). В зоне "строгого режима" находятся датчики и станция предварительного усиления. На рис.1 представлена схема установки датчиков на 4 блоке НВАЭС. Другая информация об используемых датчиках приведена в табл.1.

Сигналы ДАП и ДОП попадают на усилитель несущей частоты, где происходит их демодуляция и преобразование в стандартный диапазон напряжения ($\pm 10\text{В}$). Сигнал ДАП после усиления несущей частоты подается на корректирующий усилитель, который компенсирует нелинейность характеристики датчика в низкочастотной области (до 5 Гц).

Фильтрация сигналов, аналого-цифровое преобразование (АЦП) и быстрое преобразование Фурье (БПФ) производится в специальном сигнальном процессоре MOSIP. Аналоговая фильтрация осуществляется фильтром Баттерворта с частотой среза 200 Гц, частота дискретизации 1024 Гц. При проведении БПФ применяется окно Ханнинга и производится усреднение до 100 выборок.

Авто- и кросспектры рассчитываются в диапазонах 0 – 50 Гц, 0 – 200 Гц и записываются на жесткий диск персонального компьютера системы (IBM PC AT 386), где ведется дальнейшая обработка данных.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для отработки алгоритмов автоматического разделения спектров на классы "норма" и "аномалия", а также для определения причин, вызывающих аномальные отклонения, была сформирована обучающая выборка, в которую вошли все спектры, полученные во время измерений с 1993 по 1997 гг. Типичные спектры для исправного состояния измерительных каналов по каждому типу датчиков и их краткие характеристики представлены в табл.2. В табл.3 приведены примеры спектров с различного вида нарушениями.

Деление спектров обучающей выборки на классы проводилось экспертами, имеющими длительный опыт работы с системой. Спектры, отнесенные к классу аномальных спек-

Таблица 1

Датчики системы вибродиагностики

Тип датчика	Сокращение	Обозначение на схеме	Число датчиков	Места установки
Абсолютных перемещений	ДАП	A1-A4	4	Корпус реактора
Относительных перемещений	ДОП	RA-RX	24	ПГ, ГЦН
Пульсаций давления	ДПД	P1-P4	4	Реактор, трубопроводы

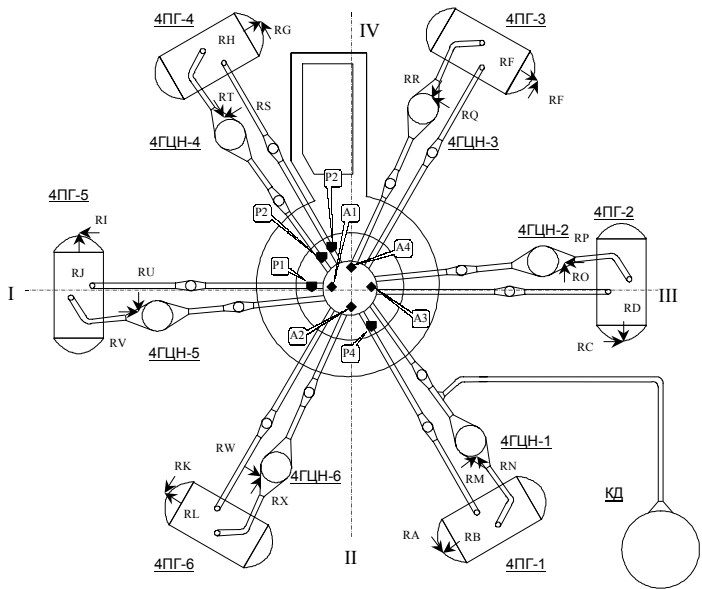


Рис.1. Размещение датчиков системы вибрационного мониторинга на 4 блоке НВАЭС

тров, были тщательно проанализированы, с целью определения причин аномалии. Для точного выяснения природы возникающих неисправностей проводились специальные измерения с имитацией различных нарушений в работе измерительных каналов. Так, например, обрыв измерительных линий имитировался отключением датчика от системы.

ПРОГРАММНЫЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА

Анализ данных и разработка алгоритмов проводились в среде Dyalog APL для операционных систем Windows 95/98/NT [1]. APL, как язык программирования специально ориентированный на обработку массивов информации, представляет собой чрезвычайно эффективное средство для быстрой разработки сложных алгоритмов и программ анализа больших наборов данных, в том числе в области диагностирования АЭС [2].

С точки зрения анализа наборов спектров, мощным и удобным типом данных являются, так называемые обобщенные массивы [3], т.е. массивы, элементами которых, в свою очередь, являются другие массивы (векторы, матрицы, многомерные массивы) данных. Представление набора спектров как вектора векторов позволяет легко и не меняя имеющихся программ получать как индивидуальные характеристики каждого спектра, так и сводные статистики по всему массиву.

Важным преимуществом работы в среде Dyalog APL являются развитые возможности создания полнофункциональных приложений для Windows, включая интерфейс к базам данных, использование механизмов DDE, OLE и OCX. При этом базой для построения такого приложения является набор программ, созданный на стадии исследований, что сокращает переход от анализа данных и разработки алгоритмов к полноценным системам диагностирования, ориентированным на пользователя.

При разработке методов и алгоритмов, представленных в данной статье использовался аппарат распознавания образов, эффективность которого для решения задач шумовой диагностики обсуждалась, например, в [4]. В качестве основных программных средств применялся разработанный авторами пакет прикладных программ по распознаванию образов [5], включающий процедуры поиска информативных признаков и сокращения размерности, кластерного анализа и построения решающих правил.

Таблица 2

Спектры датчиков при отсутствии неисправностей

№	Тип датчика и характеризующие признаки спектра	Типичный вид спектра
1.	<u>Спектр ДАП.</u> Наличие пика оборотной частоты (24.625 Гц) и низкочастотной составляющей (1 Гц). В диапазоне 25÷50 Гц нет ярко выраженных пиков, за исключением 2-ой гармоники оборотной частоты (49.375 Гц).	
2.	<u>Спектр ДОП - ГЦН.</u> Наличие пика оборотной частоты (24.625 Гц) и низкочастотной составляющей (1 Гц). В диапазоне 25÷50 Гц в отличие от ДАП, кроме 2-ой гармоники оборотной частоты (49.375 Гц) присутствуют другие пики.	
3.	<u>Спектр ДОП - ПГ.</u> Наличие пика оборотной частоты (24.625 Гц) и низкочастотной составляющей (1 Гц). В диапазоне 25÷50 Гц в отличие от ДАП, кроме 2 гармоники оборотной частоты (49.375 Гц) присутствуют другие пики.	
4.	<u>Спектр ДПД.</u> Наличие пика оборотной частоты (24.625 Гц) и низкочастотной составляющей (1 Гц). Два характерных только для ДПД пика (~6 Гц и ~8 Гц), образуемых двумя стоячими акустическими волнами.	

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ДАННЫХ

В задачи экспресс-анализа данных входила проверка принципиальной возможности автоматического выделения спектров, отнесенных экспертами к классу «аномалия» и предварительное определение набора классификационных признаков. Каждый спектр представлялся точкой в 400-мерном пространстве признаков:

$$\vec{X}' = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $\vec{X}'$ - транспонированный вектор $\vec{X}$ с координатами x_i , $i=1,2,\dots,n$ - значениями спектральной плотности мощности (СПМ) на частотах f_i . $n=400$ - число дискретных точек оценки СПМ в диапазоне частот 1÷50 Гц.

Для устранения влияния фактора масштаба (например, различия коэффициентов усиления при проведении измерений) все спектры нормировались на длину, т.ч. после нормировки выполнялось:

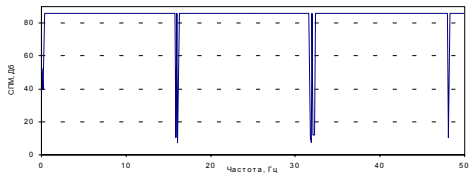
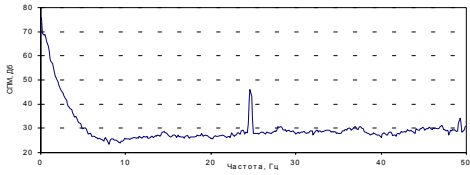
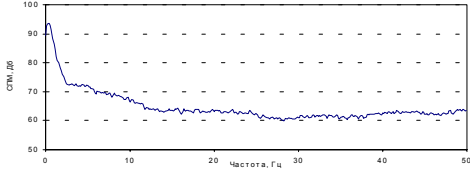
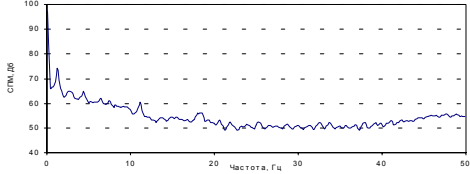
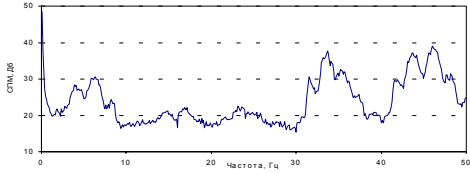
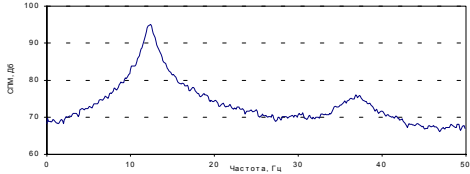
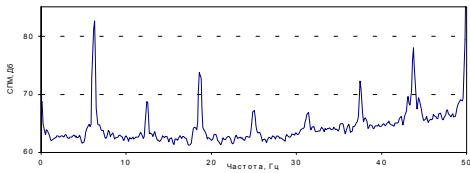
$$\sum_{i=1}^{400} x_i^2 = 1.$$

Класс нормальных спектров был описан как куб (параллелепипед) в 400-мерном пространстве признаков. В качестве границ выбирались максимальные и минимальные значения спектров нормальной выборки по каждой частоте. Такие границы, а также средний по классу «норма» спектр, приведены на рис.2.

Далее, каждый классифицируемый спектр относился к классу «аномалия», если значение СПМ, хотя бы на одной частоте, выходило за определенные для нормаль-

Таблица 3

Спектры датчиков при наличии дефектов

№	Тип дефекта и характеризующие признаки	Типичный вид спектра
1.	<u>Обрыв измерительных линий.</u> Характерен для ДАП, ДОП и ДПД. В спектре постоянный участок с резкими провалами.	
2.	<u>Нарушение положения сейсмической массы.</u> Характерен только для ДАП. Отсутствие в спектре пиков, за исключением низкочастотной составляющей вибрации (~ 1 Гц) и пика обратной частоты (~24.625 Гц).	
3.	<u>Повреждение подвески сейсмической массы.</u> Характерен только для ДАП. Полное отсутствие пиков в спектре.	
4.	<u>Неверная настройка канала ДОП.</u> Характерен только для ДОП. Отсутствие ярко выраженных пиков в спектре.	
5.	<u>Емкостное рассогласование плеч измерительного моста.</u> Характерен только для ДОП. Отсутствие основных пиков и наличие протяженных областей с максимальной амплитудой в диапазоне от 30÷50 Гц.	
6.	<u>Замыкание на землю одной из обкладок пьезокристалла.</u> Характерен только для ДПД. Наличие одного мощного пика (~ 14 Гц) и отсутствие других.	
7.	<u>Замыкание на землю одной из обкладок пьезокристалла.</u> Характерен только для ДПД. Отсутствие плавного спада фоновое уровня в низкочастотной области и наличие острых пиков, не типичных для спектров ДПД.	

ных спектров границы. Таким образом удалось правильно распознать все спектры класса «аномалия».

Для минимизации числа используемых признаков применялась следующая процедура:

- среди исходных $n=400$ признаков определялась частота, по которой отбраковывается максимальное число спектров класса «аномалия»;
- спектры, отнесенные к классу «аномалия» по выделенной частоте, удалялись из выборки;
- шаги 1-2 повторялись для $n=399, n=398, \dots$ до тех пор, пока в выборке оставались неклассифицированные спектры.

Оказалось, что исходных для правильной классификации всех аномальных спектров достаточно использовать всего 6 признаков из исходных 400. На рис.3 представлено распределение точек обоих классов на плоскости двух наилучших из 6 признаков. Как и следовало ожидать, классы на этой плоскости пересекаются.

Выберем для рассмотрения один из спектров класса «аномалия», попадающий в область пересечения. Этот спектр, вместе с границами класса «норма», приведен на рис.4. Видно, что на частотах 8.6 и 24.7 Гц данный спектр, действительно, лежит в границах класса «норма». Его правильная классификация по всем 6 признакам оказалась возможна только из-за небольшого выхода за границы в области 45-50 Гц. Приведенный пример показывает, что классификация на основе уставок не представляется достаточно надежной.

Для надежной классификации необходима максимизация расстояния между классами. Поиск соответствующих признаков проведен в следующем разделе.

ВЫБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

Случайный поиск с адаптацией

Случайный поиск с адаптацией (СПА) [6-7] решает задачу выбора из исходного множества n признаков наилучшей, в смысле заданного критерия подсистемы из $m < n$ признаков. Алгоритм может быть описан следующим образом:

- задать равномерное распределение случайного выбора каждого из n исходных признаков в группу из m наиболее информативных признаков;
- в соответствии с текущим распределением вероятности выбрать случайно группу из m признаков и вычислить значение критерия информативности. Повторить шаг 2 r раз, где r - параметр алгоритма, например $r=20$;
- выбрать среди r вариантов, оцененных на шаге 2, лучший и худший по значению критерия. Увеличить вероятности выбора признаков («поощрение»), которые вошли в лучший по значению критерия вариант, добавляя dP , где $0 < dP < 1$ - параметр алгоритма.

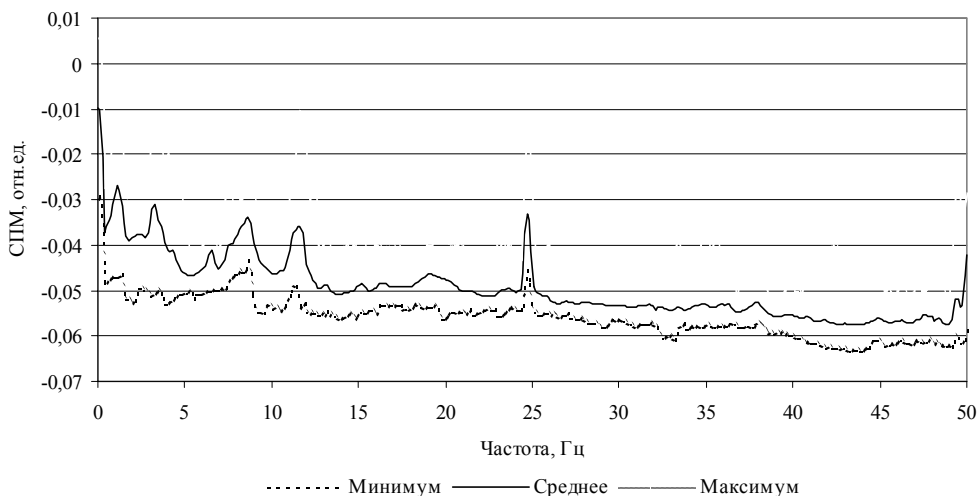


Рис.2. Средний спектр и границы класса «норма»

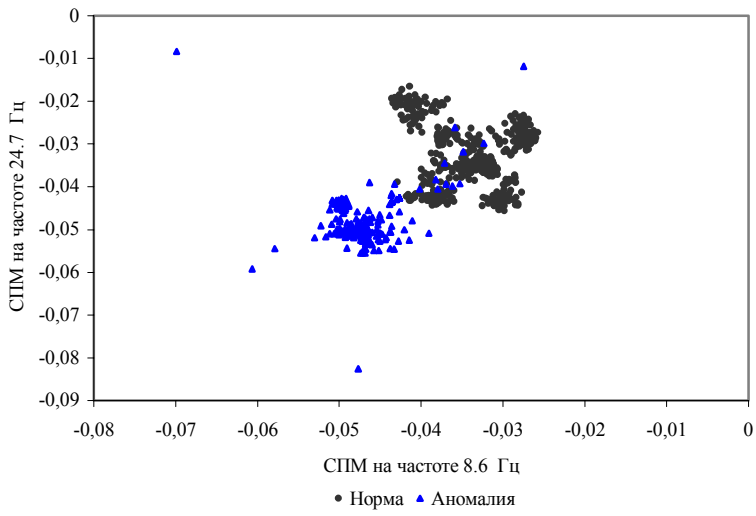


Рис.3. Представление классов на плоскости двух наилучших признаков в качестве оптимальной подсистемы признаков, для которой достигнуто наилучшее по всем $R \times r$ испытаниям, значение критерия информативности.

Каждый повтор шага 2 выполняется с модифицированным распределением вероятностей выбора признаков. Именно в этом и заключается механизм адаптации поиска. Скорость адаптации зависит от параметра dP . При $dP = 0$ адаптация отсутствует и алгоритм работает как метод Монте-Карло. Максимальное значение для dP равно стартовому значению вероятности P_0 . При этом значении на шаге 3 вероятности признаков, попавших в наихудший вариант, сразу зануляются и не участвуют в дальнейшем переборе. Значение параметра r влияет на статистическую значимость выбора лучшего и худшего испытаний на шаге 2. Наконец, значение параметра R определяет число шагов процесса адаптации. С увеличением R качество решения приближается к точному решению, получаемому полным перебором.

Алгоритм допускает использование разнообразных критериев качества подсистемы признаков, например, числа ошибок классификации с использованием данной подсистемы признаков. Нами использовалось расстояние между проекциями классов на дискриминант Фишера.

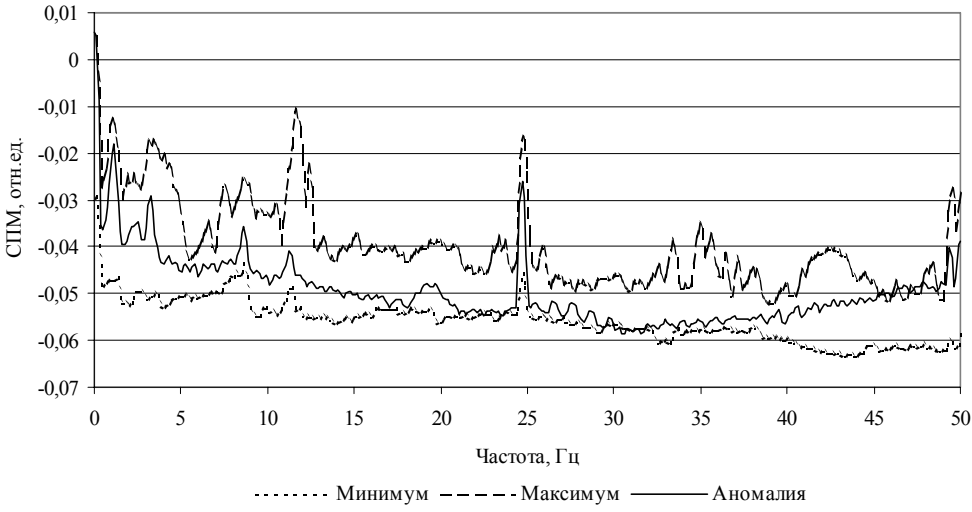


Рис.4. Пример аномального спектра относительно границ класса «норма»

Уменьшить вероятности выбора признаков («наказание»), которые вошли в худший по значению критерия вариант, используя то же самое значение dP . Сумма вероятностей после этих изменений останется равна 1.

- повторить шаги 2 и 3 R раз, где R - параметр алгоритма, например, $R = 30$;
- выбрать в качестве

ДИСКРИМИНАНТ ФИШЕРА

Рассмотрим два набора точек $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N$ и $\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_M$ в n -мерном пространстве признаков. Дискриминант Фишера [8] определяет такое направление $\vec{w}$ в исходном пространстве, проектирование на которое точек ($\vec{w}^T \vec{x}$ и $\vec{w}^T \vec{y}$) максимизирует расстояние между классами в виде:

$$\frac{(m_x - m_y)^2}{s_x^2 + s_y^2},$$

где m и s - средние значения и вариации для каждого класса.

Искомое направление определяется как

$$\vec{w} = S^{-1}(\vec{m}_1 - \vec{m}_2),$$

где S - суммарная матрица внутриклассовых разбросов, а $\vec{m}_1, \vec{m}_2$ - средние векторы каждого класса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Алгоритм СПА с критерием оптимизации в виде расстояния между проекциями классов на дискриминант Фишера применялся для поиска оптимальной подсистемы из $m=20$ признаков со следующими параметрами: $R=10000$, $r=20$, $dP=2.5E-7$. Таким образом, всего было проведено 200 тыс. испытаний, что значительно меньше полного перебора возможностей $C_{400}^{20} \approx 1.61E27$. В результате получена система информативных признаков, позволяющая безошибочно классифицировать все спектры классов «норма» и «аномалия». Распределение проекций Фишера для найденной системы информативных признаков приведено на рис.5. Эти проекции (взвешенные линейные комбинации 20 наиболее информативных признаков) представляют, по сути, единый обобщенный признак, позволяющий решать поставленную задачу. Близкое к гауссовскому распределение внутри каждого класса позволяет представить каждый класс эталоном (средним значением) и приписать наблюдаемый разброс влиянию случайных факторов

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВИДА НЕИСПРАВНОСТИ

В заключение остановимся кратко на диагностировании вида неисправностей, приводящих к получению аномальных спектров. Для решения этой задачи использовался следующий эвристический подход:

• эксперты перечисляли все возможные виды неисправностей измерительных каналов, как наблюдавшиеся в процессе эксплуатации, так и промоделированные при проведении данного исследования;

• экспертами отбирались спектры, характерные для каждого вида неисправностей, и проводилось словесное

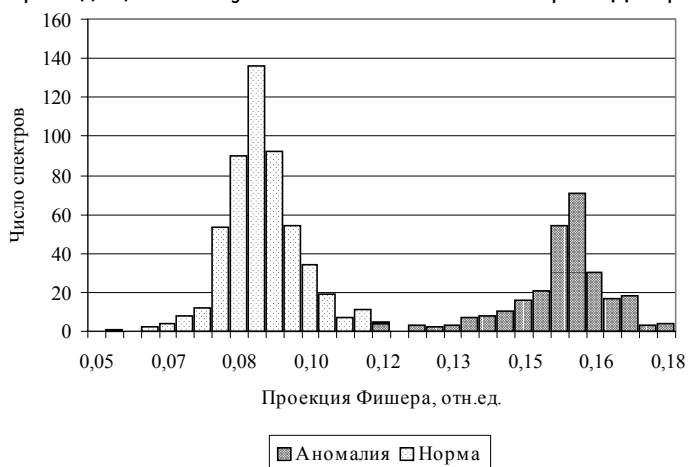


Рис.5. Разделение классов на оси дискриминанта Фишера

описание признаков, присущих этим спектрам, например, отсутствие выраженных пиков, наличие протяженной постоянной составляющей и др.; примеры приведены в табл.3;

- разработчики алгоритма предлагали математическую формулировку соответствующих признаков (критериев) в виде функции $s = f(X)$, позволяющей для заданного спектра X вычислить скалярное значение s критерия; каждый критерий реализовывался в виде отдельной вычислительной программы;
- на материале обучающей выборки проводилась оптимизация параметров алгоритма и пороговых значений критерия.

В результате был разработан ряд критериев, а именно:

- количество уникальных значений спектра;
- размах второй производной спектра;
- положение центра тяжести спектра;
- мощность спектра за вычетом фона;
- ранг пика обратной частоты ГЦН в выборке амплитуд спектра;
- положение максимального значения спектра на частотной оси;
- количество пиков в спектре.

Совместное применение указанных критериев может быть представлено в виде дерева решений, приведенного на рис.6 (на рисунке ветви, соответствующие выполнению критерия аномальности, обозначены как 1). Применение указанного алгоритма позволило точно провести диагностирование всех видов неисправностей. Отметим, что при появлении новых типов неисправностей измерительных каналов и разработке критериев их выявления, представленный алгоритм может быть легко модифицирован.

ВЫВОДЫ

Предлагаемые в настоящей работе методики анализа спектров вибраций использованы при разработке программного обеспечения контроля достоверности информации и диагностирования отказов датчиков, используемого на НВАЭС.

Алгоритм случайного поиска с адаптацией, совместно с критерием Фишера, показали высокую эффективность для выявления системы наиболее информативных признаков. Разработанный алгоритм позволил безошибочно распознать все спектры класса «аномалия».

Использование языка сверхвысокого уровня APL позволило легко реализовать и оптимизировать широкий набор критериев, позволяющих проводить диагностирование вида неисправности измерительного канала.

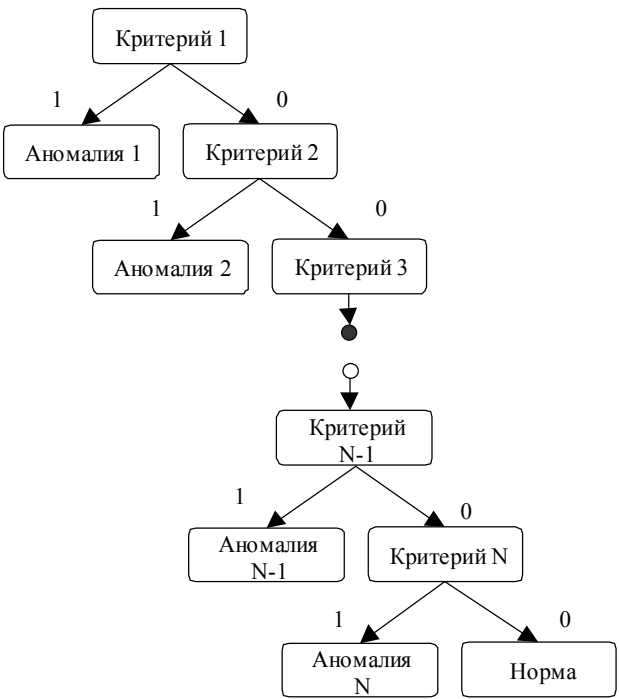


Рис.6. Дерево решений для диагностирования вида неисправностей

Список литературы

1. Dyalog APL for Windows. User's Guide. Dyadic Systems, 1998.
2. Skomorokhov A.O. Nuclear Power Plant Diagnostics in APL, APL Quote Quad, (pp.289-300), ACM Press. - August 1991. - Vol.21. - №.4 .5. Skomorokhov A. and Slepov M. Pattern Recognition in APL with Application to Reactor Diagnostics.
3. А.О.СкомороховА.О. Язык программирования APL2 (Ч. I)// Мир ПК. - 1993.- №3.
4. Mogilner A.I., Skomorokhov A.O., Shvetsov D.M. On the Problem of Noise Spectra Classification in Nuclear Power Plant Operation Diagnostics// Nuclear Technology. - 1981. - Apr. - Vol.53.
5. Skomorokhov A. and Slepov M. Pattern Recognition in APL with Application to Reactor Diagnostics.
6. Slagle J.R. Artificial Intelligence: The Heuristic Programming Approach. - McGraw-Hill Book Company. - N.Y., 1971.
7. Lbov G.S. Selection of an effectiveness system of dependent attributes. - US Government Res. and Develop. Rep. - 1969. - Feb.25, AD-679657. - V.69. - P.78.
8. Duda R. and Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis, John Wiley and Sons. - NY. - 1973.

Поступила в редакцию 5.03.99.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Т.В. Мельникова, Л.П. Полякова, Г.В. Козьмин

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



В статье рассматривается проблема вторичного загрязнения пищевой продукции, подвергшейся радиационной обработке, остатками разложившихся под действием ионизирующих излучений хлорорганических пестицидов (ХОП). Показано отсутствие в ранее опубликованных материалах системности в решении вопросов, касающихся данной тематики. По результатам проведенного мониторинга ХОП определены диапазоны колебания их концентраций в тех продуктах питания, которые могут подвергаться радиационной обработке. Проведено облучение и дана оценка степени разложения ХОП в модельных объектах. Предложены походы к изучению новых химических соединений, возникающих после облучения объектов, содержащих хлорорганические пестициды.

ВВЕДЕНИЕ

В результате техногенного загрязнения окружающей среды и при использовании средств химизации в сельском хозяйстве продукция агропромышленного производства и пищевой промышленности неизбежно содержит подлежащие контролю загрязняющие вещества, в том числе остаточные количества ХОП. В мировой практике получили распространение радиационные технологии, обеспечивающие существенное увеличение сроков хранения сельскохозяйственного сырья и продуктов питания. При этом облучению подвергается продукция, содержащая в своем составе различные химические загрязнители. Дозовые нагрузки, рекомендуемые для обработки пищевой продукции, способны вызывать радиационно-химические превращения с участием первичных загрязнителей, приводящие к образованию новых вторичных химических соединений. В связи с этим возникает проблема идентификации образовавшихся химических соединений и определения их токсичности.

Целью настоящей работы являлась оценка состояния научных исследований по проблеме вторичного загрязнения сельскохозяйственной и пищевой продукции после ее облучения и разработке методических подходов к решению этой проблемы на примере анализа последствий радиационного разложения ХОП.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Анализ отечественной и зарубежной информации показывает, что ионизирующие излучения (гамма, электронное) используются для обработки пищевых продуктов [1]. Применение радиационных технологий основано на полезном действии ионизирующих излучений при сохранении качества сельскохозяйственной продукции: замедляется прорастание картофеля и лука, увеличиваются сроки хранения мяса и рыбы в замороженном состоянии в связи с подавлением развития микроорганизмов, уничтожаются вредители в зерне и фруктах. В табл.1 представлены дозы ионизирующего излучения, применяющиеся при радиационной обработке пищевых продуктов [1, 2, 3].

Таблица 1

Дозы ионизирующего излучения, применяемые при радиационной обработке пищевых продуктов

Ἰ δῖαοέο	Äìçà íáëó-áíèÿ, ēāð	Ōāëü íáëó-áíèÿ
Êāððíð āëü, ēóē	0.05 - 0.15	Äëÿ èíāëāëðíāāíèÿ ïðíðāñòāíèÿ
Çāðíí, ò ðóëü	0.15 - 0.50	Äëÿ āāçēíñāëòëë
Ō ðóëü, íāíü è	0.5 - 1.0	Äëÿ çàíāāëāíèÿ ñíçāāāíèÿ
Êëóáíēēā, íāíü è	1.5 - 3.0	Äëÿ óāëēíāíèÿ ñðíēā òðāíāíèÿ
Ñāāæāā è çàííðíæāííā éððēíā ìÿñí, èðāāāðēë, ēÿāð ā-üē èāíēë	2.0 - 5.0	Äëÿ óíē-ðíæāíèÿ íāðíāíüð íāðāçēóíā è íēðíðāíēçí íā
İ èü āāüā íðíāóëü	2.0 - 10	Äëÿ óëó-ð áíèÿ òāðííēíāë-āñēëð ñāíēñā ðÿāā íèü āāüð íðíāóëíā
İ èü āāüā āíāāāë è èíāðāāēāíüð, íāíðēíāð, ñíāðēë	10 - 50	Äëÿ íāāççāðāæēāíèÿ
İ ÿñí, ìÿñíüā íðíāóëü, āēāðē-āñēēā íðíāóëü āëÿ áíèüíüð	30 - 50	Äëÿ ñòāðēēēçāðēë

Сравнение доз облучения, использующихся при радиационной обработке пищевых продуктов (0,05 - 50кГр) [4-6] и диапазона доз, в котором исследовалось разложение хлорорганических пестицидов в растворах (0,15 - 50кГр), показывает, что они сопоставимы [1-3].

Публикации последних лет, посвященные вопросам радиохимической стабильности некоторых представителей группы ХОП, содержат в основном сведения о результатах разложения этих соединений в среде различных органических растворителей после их гамма-облучения. К настоящему времени проведены исследования по изучению действия гамма-излучения на такие классы пестицидов как хлорорганические (ДДТ и его метаболиты, изомеры ГХЦГ, альдрин и т.д.) и фосфорорганические (форате, атразин и т.д.) [4]. Наиболее полно изучены процессы разложения ДДТ и его метаболитов (ДДД и ДДЕ). В эксперименте на модельных растворах было показано, что основными путями радиолиза п,п'-ДДТ и его аналогов являются процессы дегидрохлорирования в алифатической цепи и ароматических циклах. С помощью методов ЯМР и хромато-масс-спектрометрии было идентифицировано 10 дегидрохлорированных продуктов, хлорорганических веществ с разным количеством атомов Cl и наличием π-связей в структуре молекулы. Были также выделены и идентифицированы комплексы присоединения между промежуточными хлорсодержащими продуктами и растворителями. Обнаружены в реакционной смеси и продукты окисления хлорорганических соединений. На рис.1 представлена схема разложения п,п'-ДДТ и его метаболитов п,п'-ДДД и п,п'-ДДЕ в циклогексане. По результатам исследования [5] было показано, что в любом растворителе ДДТ интенсивнее

разлагается, чем его метаболиты. Кроме того, была оценена степень разложения п,п'-ДДТ и его метаболитов в различных по полярности растворителях (табл.2). Также было установлено [4], что степень разложения исходного пестицида существенно зависит от состава его водного раствора смеси (табл.3).

Таблица 2

Степень разложения ДДТ, ДДД и ДДЕ после облучения дозой 10кГр в различных растворителях [5]

	Исходное вещество	Степень разложения, %		
		Вода	Этанол	Бензол
Вода	Исходное вещество	99,2	24,5	47,5
Этанол	Исходное вещество	71,8	60,4	53,9
Бензол	Исходное вещество	47,8	42,0	25,0

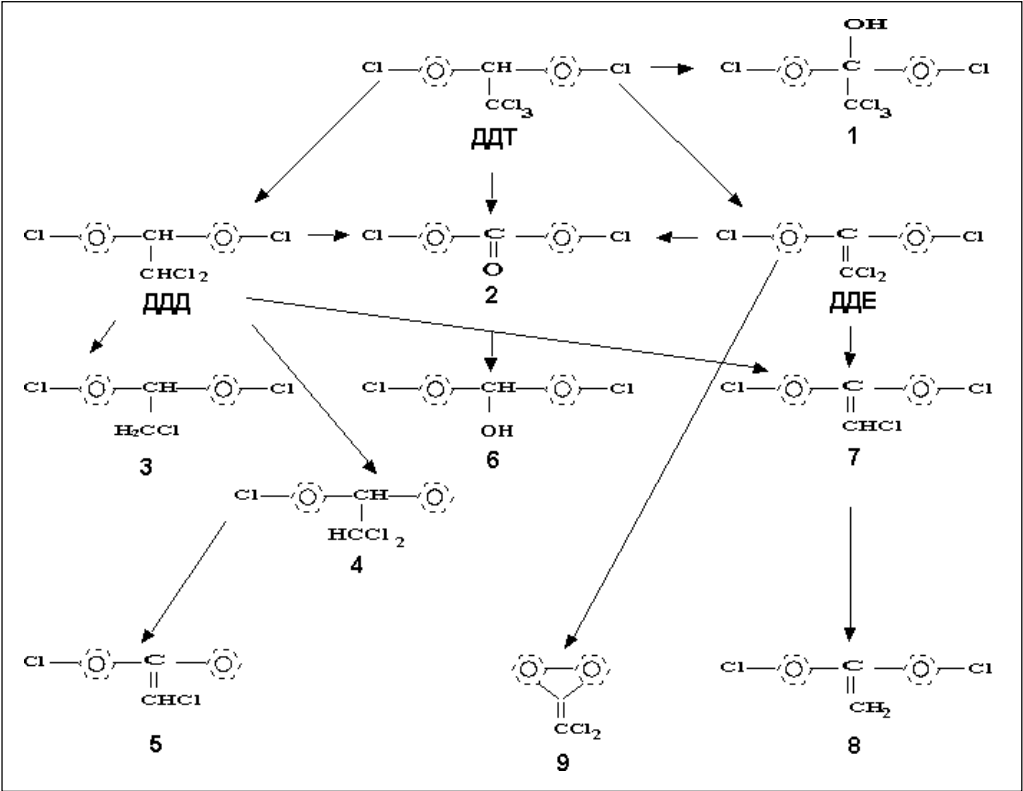


Рис.1. Продукты разложения п,п'-ДДТ, п,п'-ДДЕ и п,п'-ДДД после облучения (доза 10 кГр) в циклогексане:
п,п'-ДДТ- 2,2 - бис (4-хлорфенил)-2,2,2-трихлорэтан;
п,п'-ДДЕ - 2,2 - бис (4-хлорфенил)-1,1-дихлорэтилен;
п,п'-ДДД - 2,2 - бис (4-хлорфенил)-1,1-дихлорэтан;
1 - 1,1-бис(4-хлорфенил)-2,2,2-трихлорэтанол; 2 - DСВР - 4,4'-дихлорбензофенон;
3 - 1,1-бис(4-хлорфенил)-2-хлорэтан; 4 - 1-хлорфенил-1-фенил-2,2-хлорэтан;
5 - 1-хлорфенил-1-фенил-2-хлорэтилен; 6 - 1- бис(4-хлорфенил)этанол;
7 - DDMU - 2,2-бис(4-хлорфенил)-1-хлорэтилен;
8 - 1,1-бис(4-хлорфенил)этилен; 9 - 9-(дихлорметил)флорин

Таблица 3

Степень разложения линдана в технических смесях при облучении дозой

Īāñðēōēā	Īāçāāīēā āīāīūō ðāñōāīōīā ōāōīē-āñēēō ñīāñāé	Ēīīōāīōðāōēŷ, ppm	Ñōāīāīū ðāçēīāāīēŷ, %
Ēēīāāī	Neocid	10	11,4
Ēēīāāī	Sana Flor	10	31,4
Ēēīāāī	Tinor	10	40,7
Ēēīāāī	ðāō. ēēīāāī	10	64,5

Как следует из представленного анализа опубликованных материалов, имеющиеся на сегодняшний день сведения о радиационном разложении ХОП недостаточны для токсикологической оценки последствий облучения. Остается неопределенной зависимость степени разложения ХОП от свойств растворителя (табл.2-3). До конца не идентифицированы продукты разложения ХОП после радиационной обработки растворов пестицидов в чистых растворителях [4, 5, 6]. Не исследован вопрос качественного состава облученного раствора, содержащего несколько различных ХОП. В связи с этим попытки экстраполировать данные модельных экспериментов на сложные пищевые продукты с целью прогнозирования возможных изменений в них, вызванных облучением, связаны с рядом неопределенностей. Главные из них - влияние природной матрицы на процесс радиоллиза пестицидов и достоверность оценки супернизких концентраций, как индивидуальных объектов исследований, так и их смесей.

Установлено [4, 5, 6, 7], что продуктами разложения загрязнителей при радиационной обработке являются различные по токсичности вещества, суммарная же токсичность, этих химических соединений, образующихся в самых различных сочетаниях в настоящее время практически не изучена. В связи с этим вопрос токсичности продуктов питания, подвергнувшихся облучению, нуждается в проведении комплексных научных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование проводилось в два этапа: с природным биообъектом и в модельных условиях. Натурные эксперименты были связаны с анализом пищевых продуктов (зерно, молоко, сливочное масло, рыба и мясо) по оценке содержания реальных концентраций в них пестицидов (альфа-ГХЦГ, гамма-ГХЦГ, ДДТ, ДДЕ). В модельных условиях изучался процесс гамма-облучения растворов отдельных ХОП (альфа-ГХЦГ, ДДТ, ДДЕ).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ РЕАКТИВЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В работе были использованы стандартные образцы растворов пестицидов: альфа-ГХЦГ, гамма-ГХЦГ, п,п'-ДДТ с концентрациями 100мкг/мл и п,п'-ДДЕ - 1000мкг/мл (Научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, экспериментальная лаборатория Р/К ХИИУ КАЛУР); гексан, ч. ("Реахим", Черкасский завод химреактивов); диэтиловый эфир, медицинский; оксид алюминия, нейтральный, для хроматографии (Lachema, Chemapol); силикагель, L 100/160 для хроматографии (Lachema, Chemapol); сульфат натрия, безводный, х.ч. Все реактивы были подготовлены в соответствии с требованиями к чистоте веществ для хроматографических исследований ХОП, по методикам [8, 9, 10].

Для инструментального анализа применялись:

- газовый хроматограф "Модель 3700" - насадочная колонка (l=2м), фаза SE-52, детектор электронного захвата, газ-носитель - азот, осч. Температура колонки - 210°C, испарителя - 220°C, детектора - 250°C. Объем вводимой пробы - 4мкл;

- газовый хроматограф “Цвет 500М” - насадочная колонка ($l=2\text{м}$), фаза ХЕ-52, детектор электронного захвата, газ-носитель - азот, о.с.ч. Температура колонки - 210°C , испарителя - 230°C , детектора - 280°C . Объем вводимой пробы - 4мкл ;
- адсорбционная колонка - $200\text{мм} \times 5\text{мм}$, работающая под давлением.

Вся стеклянная посуда непосредственно перед экспериментом была очищена и проверена на присутствие остаточных количеств ХОП.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ ПЕСТИЦИДОВ (АЛЬФА-ГХЦГ, ГАММА-ГХЦГ, П,П'-ДДТ, П,П'-ДДЕ) В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ

Пробоподготовка образцов продуктов осуществлялась по специально разработанной методике, которая включает в себя следующие основные стадии: экстрагирование ХОП из объекта и осушка, предварительное концентрирование экстракта, очистка и разделение экстракта на адсорбционной колонке, завершающее концентрирование отдельных хроматографических фракций с последующим вводом их проб в газовый хроматограф. Операции осушки и концентрирования были одинаковы для всех видов продуктов, очистка экстракта специфична для каждой органической матрицы [8,9,10]. Методика подготовки образцов, таким образом, позволяет с помощью одной адсорбционной колонки (сорбент: силикагель и оксид алюминия) провести одновременно: 1) очистку экстракта от соизвлеченных органических соединений биообъекта; 2) групповое фракционирование индивидуальных полихлорбифенилов (ПХБ) и 19 хлорорганических пестицидов для последующего инструментального разделения их с целью идентификации и оценки количественного содержания. Газохроматографический анализ подготовленных фракций выполнялся по методике [9]. Расчет содержания ХОП в пробе выполнялся по площади пика методом соотношения со стандартом по формуле:

$$X = \frac{C \cdot S_x \cdot v \cdot K}{S_{\text{ст}} \cdot P}, \quad (1)$$

где X – содержание пестицида, мг/кг ; C – концентрация рабочего стандартного или калибровочного раствора, мкг/мл ; $S_{\text{ст}}$ и S_x – площадь пика пестицида на хроматограммах стандартного раствора и экстракта пробы соответственно; v – объем экстракта, мл ; P – масса пробы, г ; K – коэффициент, учитывающий систематические потери при выполнении пробоподготовки и полноту извлечения пестицидов [9].

Коэффициент K определялся по методу “внесено – обнаружено” [9]. В табл.4 представлены результаты определения K для различных пестицидов в диапазоне концентраций $9,6 \cdot 10^{-2} - 4,0 \text{ мг/кг}$.

ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ОТДЕЛЬНЫХ ПЕСТИЦИДОВ

Ампулы стандартных образцов пестицидов альфа-ГХЦГ, гамма-ГХЦГ, п,п'-ДДТ объемом $2-3\text{мл}$ с концентрациями 100мкг/мл и п,п'-ДДЕ объемом 2мл с концентрацией 1000мкг/мл в гексане были облучены на установке КСВ-500 (^{60}Co) с дозой 16кГр при мощности дозы $0,11\text{кГр/мин}$.

Степень разложения хлорорганических пестицидов определялась по концентрации пестицида путем сравнения площадей пиков на хроматограммах стандартных растворов пестицидов, до и после их радиационной обработки [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа хлорорганических пестицидов (альфа-ГХЦГ, гамма-ГХЦГ, п,п'-ДДТ и п,п'-ДДЕ) в отдельных продуктах питания (зерно, сливочное масло, молоко) за период 1996-1998 гг. представлены в табл.5. Выбор анализируемых продуктов питания был обусловлен следующими обстоятельствами:

Таблица 4

Результаты определения K для методики адсорбционной очистки экстрактов биологических объектов

Исходный объект	$\bar{E}, \%$	S	S_x	$v, \%$	Δx	$x_{\text{сист.}}$	$\varepsilon, \%$	$\langle \bar{E} \rangle \pm \Delta x$
Алиментарно-экологический	51,1	3,40	1,52	2,67	4,10	43,2	7,22	$56,8 \pm 4,10$
	57,3							
	57							
	60							
	58,6							
Алиментарно-экологический	75	6,04	2,47	3,03	6,42	18,58	7,88	$81,42 \pm 6,42$
	84							
	86,5							
	85,5							
	72,5							
	85							
Алиментарно-экологический	120	5,72	2,55	2,28	7,15	12,04	6,38	$112,04 \pm 7,15$
	110							
	109							
	115,6							
	105,6							
Алиментарно-экологический	102,5	1,51	0,61	0,60	1,72	2,17	1,68	$102,17 \pm 1,72$
	101							
	101,5							
	101							
	102							
	105							

S – среднее квадратическое отклонение; S_x – среднее квадратическое отклонение среднего; v – воспроизводимость; Δx – доверительный интервал; $x_{\text{сист.}}$ – систематическая погрешность; ε – относительная погрешность; $\langle K \rangle$ – среднее значение

- видами биологических объектов, в которых происходит максимальное накопление хлорорганических пестицидов по трофической цепочке;
- частотой потребления человеком пищевых продуктов, потенциально загрязненных ХОП;
- перечнем продуктов, которые могут проходить радиационную обработку [1, 2, 3].

Как видно из табл.5 концентрации альфа- и гамма-ГХЦГ, п,п'- ДДТ и п,п'- ДДЕ лежат в пределах: сливочное масло ($5.1 \cdot 10^{-2}$ – $6.5 \cdot 10^{-2}$ мг/кг), молоко ($4.7 \cdot 10^{-2}$ – $6.8 \cdot 10^{-2}$ мг/кг) и зерно ($4.3 \cdot 10^{-4}$ – $9.4 \cdot 10^{-3}$ мг/кг). Содержание хлорорганических пестицидов не превышает МДУ [11].

Результаты исследования процесса облучения стандартных растворов пестицидов п,п-ДДТ, п,п-ДДЕ, альфа-ГХЦГ в гексане показали, что облучение дозами (доза 16 кГр и мощность дозы 0,11 кГр/мин), применяющимися при обработке пищевых продуктов приводит к частичному разрушению пестицидов. Были получены предварительные данные по кинетике разложения пестицидов в растворе. Стандартные растворы каждого в отдельности пестицида исследовались методом газожидкостной хроматографии через неделю и через 2 мес. после облучения (табл.6).

Как следует из табл.6 степень разложения пестицидов для альфа-ГХЦГ составила 63,6%, для ДДТ - 61,8% и для ДДЕ - 55,6%. Анализ полученных хроматограмм показал, что концентрация остатков неразложившихся пестицидов в указанный период времени не изменилась. Как было показано выше незарегистрированная часть пестицидов представляет собой токсичные продукты, свойства которых детально не исследовались.

Полученные результаты показывают, что разложение первичных токсикантов после радиационной обработки может создавать иллюзию отсутствия токсичных веществ в контролируемом объекте, если контроль осуществляется только на наличие первичного токсиканта. Данное обстоятельство требует дальнейшего развития аппаратурно-методической базы контроля сельскохозяйственной и пищевой продукции, прошедшей радиационную обработку.

Представленные результаты позволяют предложить общую методологию оценки качества радиационно-обработанных продуктов питания с учетом возможности образования вторичных токсикантов. Для этого предлагается следующая последовательность этапов исследования:

- Установление реальных уровней содержания хлорорганических пестицидов в отдельных продуктах растительного и животного происхождения.

Таблица 5
Содержание хлорорганических пестицидов в отдельных продуктах питания

Ää	İ öiaöø	Ää	Ñiaäðæaieä, iäëä				Σ ñiaäðæaieä, iäëä
			æüô à- ÄÖÖÄ	äiia- ÄÖÖÄ	i,i'-ÄÄ	i,i'-ÄÄÄ	
1996	io äieöä	Êðæñëiä	1.97*10 ⁻³	2.24*10 ⁻⁴		1.63*10 ⁻³	3.83*10 ⁻³
1996	ÿ-iäü	Êðæñëiä	2.51*10 ⁻³	6.09*10 ⁻⁴	6.77*10 ⁻⁴	1.91*10 ⁻³	5.78*10 ⁻³
1996	öæü	Êðæñëiä	2.01*10 ⁻³	1.24*10 ⁻³	3.47*10 ⁻³	2.67*10 ⁻³	9.39*10 ⁻³
1997	iääñ	Ï èøeieä	2.30*10 ⁻³	1.40*10 ⁻³			3.70*10 ⁻³
1997	ÿ-iäü	Ñöäëëiäëä		4.30*10 ⁻⁴			4.30*10 ⁻⁴
1997	öæü	Êðæñëiä	2.07*10 ⁻³	4.5*10 ⁻⁴	5.84*10 ⁻⁴	2.17*10 ⁻³	5.27*10 ⁻³
1997	io äieöä	Ø äiyëei	3.13*10 ⁻³	2.03*10 ⁻³		3.20*10 ⁻³	8.36*10 ⁻³
1997	ÿ-iäü	Öäöäâi	1.84*10 ⁻³	1.74*10 ⁻³	7.07*10 ⁻⁴	2.84*10 ⁻³	7.13*10 ⁻³
1998	ñëä. iañei*	Î äieinëë iäñëiçaiä N2				6.50*10 ⁻²	6.50*10 ⁻²
1998	iieiei*	Î äieinë	7.18*10 ⁻³			3.96*10 ⁻²	4.68*10 ⁻²
1998	iieiei*	Öäðöøei	2.80*10 ⁻²			4.03*10 ⁻²	6.83*10 ⁻²
1998	öü ää	Î äieinë				8.20*10 ⁻²	8.20*10 ⁻²
1998	iÿñi	Î äieinë				7.62*10 ⁻²	7.62*10 ⁻²

* в пересчете на жир

Таблица 6
Площади пиков хлорорганических пестицидов до и после облучения

İ äñöøä	İ eiü ääü ieä äi iäëö-äieÿ, ñi ²	İ eiü ääü ieä ÷äðäç iäâäþ iñëä iäëö-äieÿ, ñi ²	İ eiü ääü ieä ÷äðäç 2iäñ. iñëä iäëö-äieÿ, ñi ²
æüô à-ÄÖÖÄ	204,00	74,25	73,67
i,i'-ÄÄ	430,75	164,5	166,00
i,i'-ÄÄÄ	120,50	53,45	52,60

На данном этапе определяются, какие именно хлорорганические пестициды и в каких соотношениях присутствуют в естественных матрицах. Особое внимание следует обратить на продукцию, ввозимую из-за рубежа, из тех стран, где продолжается использование ХОП (например, страны Южной Америки и Африки).

- Проведение серии экспериментов с растворами пестицидов с вариацией следующих параметров: полярность растворителя, концентрация пестицида, мощность дозы и доза.

- Расчет степени разложения пестицидов, установление корреляций между степенью разложения, свойствами облучаемого объекта и параметрами облучения.

На сегодняшний день нет четкого представления о существовании такой зависимости: для отдельных пестицидов (ДДЕ, ДДТ, ДДД) эта зависимость установлена, для других (гамма-ГХЦГ) - такое взаимоотношение неопределенно, а для альфа-ГХЦГ характер влияния растворителя на степень разложения вообще не определялся [4].

- Установление характера разложения пестицидов на примере облучения искусственных смесей пестицидов.

На этом этапе выясняется степень разложения пестицидов при их одновременном присутствии в растворах, а также исследуется взаимовлияние осколков разложившихся пестицидов (альфа-, гамма-ГХЦГ, ДДТ и ДДЕ) при их совместном присутствии на образование конечных продуктов превращения ХОП.

- Изучение кинетики разложения хлорорганических пестицидов после их облучения.

Изучение кинетики разложения может выявить, какие изменения происходят с хлорорганическими пестицидами после облучения: продолжается ли их разложение, насколько стабильны их продукты разложения и какое время требуется, чтобы в облученном растворе или продуктах питания прекратились любые изменения, связанные с исследуемыми пестицидами.

- Проведение экспериментов с облучением загрязненных ХОП искусственных матриц, имитирующих природную органическую матрицу. Оценка степени разложения загрязнителя в зависимости от природы матрицы.

- Идентификация продуктов разложения пестицидов: в растворах; в искусственных матрицах и пищевых продуктах.

- Выявление потенциально опасных продуктов разложения пестицидов для последующей токсикологической оценки.

ВЫВОДЫ

- В результате техногенного загрязнения окружающей среды и использования средств химизации в сельском хозяйстве продукция агропромышленного производства и пищевой промышленности неизбежно содержат подлежащие контролю загрязняющие вещества, в том числе остаточные количества ХОП. В частности, на территории Калужского региона концентрации альфа- и гамма-ГХЦГ, п,п'- ДДТ и п,п'- ДДЕ лежат в пределах: сливочное масло ($5.1 \cdot 10^{-2}$ – $6.5 \cdot 10^{-2}$ мг/кг), молоко ($4.7 \cdot 10^{-2}$ – $6.8 \cdot 10^{-2}$ мг/кг) и зерно ($4.3 \cdot 10^{-4}$ – $9.4 \cdot 10^{-3}$ мг/кг).

- В мировой практике получили распространение радиационные технологии, обеспечивающие существенное увеличение сроков хранения сельскохозяйственного сырья и продуктов питания. При этом облучению подвергается продукция, содержащая в своем составе различные химические загрязнители. Дозовые нагрузки (до 10кГр), рекомендуемые для обработки пищевой продукции, способны вызывать радиационно-химические превращения с участием первичных загрязнителей, приводящие к образованию новых вторичных химических соединений.

- Продуктами разложения загрязнителей при радиационной обработке являются различные по токсичности вещества, суммарная токсичность, которых в настоящее время практически не изучена.
- Облучение с дозой 16 кГр при мощности дозы 0,11 кГр/мин приводит к частичному разрушению пестицидов. Степень разложения пестицидов для альфа-ГХЦГ составила 63,6%, для ДДТ - 61,8% и для ДДЕ - 55,6%. Концентрация остатков неразложившихся пестицидов за два месяца после облучения не изменилась.
- Разложение первичных токсикантов после радиационной обработки может создавать иллюзию отсутствия вредных веществ в контролируемом объекте, если контроль осуществляется только на наличие первичного токсиканта. Данное обстоятельство требует дальнейшего развития аппаратурно-методической базы контроля сельскохозяйственной и пищевой продукции, прошедшей радиационную обработку.
- Предложена общая методология оценки качества радиационно-обработанных продуктов питания с учетом возможности образования вторичных токсикантов.

Список литературы

1. *Francois L. Lepine* Effects of ionizing radiation on pesticides in a food irradiation perspective: A bibliographic review. J. Agric. Food Chem. - 1991. - № 39. - P. 2112-2118.
2. *Francois L. Lepine, Francois Brochu, Sylvain Milot, Orval A. Mamer and Yvon Pepin* Gamma-Irradiation-induced degradation of DDT and its metabolites in organic solvents. J. Agric. Food Chem. - 1994. - № 42. - P. 2012-2016.
3. *Francois L. Lepine, Francois Brochu, Sylvain Milot, Orval A. Mamer and Yvon Pepin* Gamma-Irradiation-induced degradation of organochlorinated pollutants in fatty acid esters and in cod. J. Agric. Food Chem. - 1993. - № 43. - P. 491-494.
4. *Лукаев А.К.* Современное состояние радиационной технологии. Успехи химии. - 1995. - № 64(6). - С. 609-640.
5. *Woods, Pikaev A.K.* Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing. Wiley, New York, 1994
6. Радиационная химия основных компонентов пищевых продуктов/Под ред. П.С. Элиаса, А.Дж. Кохена. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983.
7. *Francois L. Lepine, Sylvain Milot, and Nathalie Gagne* Gamma irradiation induced formation of PCB-solvent adducts in aliphatic solvents. J. Agric. Food Chem. - 1990. - № 38. - P. 1873-1876.
8. Методические указания по определению микроколичеств пестицидов в продуктах питания и объектах окружающей среды. - М., 1989.
9. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли галоидорганических пестицидов ДДТ, ДДЕ, альфа-ГХЦГ, гамма-ГХЦГ, трифлуарина в пробах почвы методом ГЖХ. РД 52.18.180-89. - М., 1989.
10. *Voogt P. de, Klammer and J.C., Govers H.* Simultaneous clean up and fractionation of organochlorine compounds by adsorption chromatography. J. of Chromatography. - 1986. - № 363. - P. 407-411.
11. Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды (перечень). 1.1. Гигиена, токсикология, санитария. ГН 1.1.546-96 (Официальное издание). - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1997.

Поступила в редакцию 24.12.98.

УДК 621.039.6

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫМ ШНУРОМ ТОКАМАКА ЧЕРЕЗ ГАЗОНАПУСК

О.Н.Александрова, Н.В.Пашацкий*Озерский технологический институт МИФИ, г. Озерск Челябинской обл.*

Изучены процессы взаимодействия молекулярного водорода, напускаемого через клапан в камеру токамака, с плазмой на стадии подъема тока. На основе энергетического подхода рассчитан критерий оптимального газонапуска.

ВВЕДЕНИЕ

Успехи, достигнутые в термоядерных исследованиях, поставили вопрос о разработке проектов энергетических термоядерных реакторов. Сейчас в США, на базе лабораторий сторон – участниц осуществляется разработка первой фазы реактора ИТЭР (BPP: Basic Performance Phase), целями которой являются демонстрация и исследование физики длительного горения плазмы.

Одной из инженерно-физических проблем эксплуатации ИТЭР является проблема автоматического регулирования и управления профилем тока плазменного шнура. Решение этой задачи может быть осуществлено напуском холодного рабочего газа через клапан. Одновременно это способствует подпитыванию плазмы дейтерий-тритиевым топливом. Попытки управления плазменным шнуром проводились на отечественных токамаках [1-4] путем эмпирического подбора начального давления в газоразрядной камере и расхода рабочего газа, напускаемого через клапан в процессе разряда.

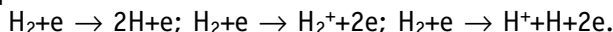
При подъеме тока в плазменном шнуре по мере разогрева плазмы развивается скин-эффект, препятствующий «проталкиванию» тока в центральные области плазменного шнура. Скинированный профиль тока неустойчив по отношению к винтовым возмущениям. Напуск холодного водорода через клапан охлаждает поверхностный слой плазменного шнура. Это приводит к сглаживанию скин-эффекта. Однако чрезмерный расход напускаемого газа способствует сильному сужению токового канала и развитию широкого спектра МГД-неустойчивостей, вызывающих срыв плазменного шнура.

Решение задачи идентификации плазменного шнура как объекта регулирования при газонапуске требует рассмотрения молекулярных процессов при взаимодействии нейтрального водорода и расчета энергобаланса поверхностного слоя плазменного шнура, задаваемого глубиной проникновения тока.

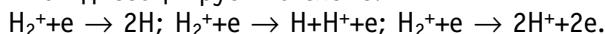
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА И ПЛАЗМЫ

Исследование процессов взаимодействия напускаемого молекулярного водорода с плазмой проводилось в рамках разработанной модели газонапуска [5]. Модель газонапуска включает в уравнения баланса энергии и частиц в токамаке [6, 7] процессы ионизации, диссоциации и возбуждения молекулярного водорода, взаимодействующего с плазмой.

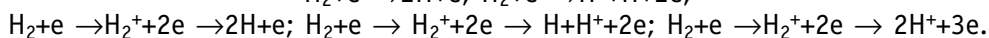
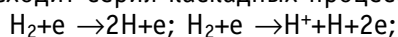
В результате электронного удара молекула водорода либо диссоциирует с образованием двух атомов водорода, либо ионизируется с образованием молекулярного иона [8, 9]:



Молекулярный ион диссоциирует по схеме:



Таким образом, происходит серия каскадных процессов:



Скорость ионизации S_0 в расчетах аппроксимировалась формулой [10, 11]:

$$S_0 = \frac{9.7 \cdot 10^{-14}}{x + 0.73} \cdot \left(\frac{x}{1+x} \right)^{0.5} \cdot \exp(x), \quad x = 13.6 \text{ эВ}/T_e, \quad (1)$$

где T_e - электронная температура.

Для скорости диссоциации S_d использовалась формула [10]:

$$S_d = \begin{cases} 1.4 \cdot 10^{-14} \sqrt{T_e} \exp(-x), & x > 1 \\ 5.2 \cdot 10^{-14} \sqrt{\frac{x}{1+x}} \exp(-x), & x < 1, \end{cases} \quad x = 15.6 \text{ эВ}/T_e. \quad (2)$$

В столкновениях электронов плазмы с молекулами водорода возбуждаются атомные уровни. В работе рассматривался процесс перехода в возбужденное состояние с $\epsilon = 10.2$ эВ. Для скорости указанного процесса взята формула [11]:

$$S_1 = \frac{5.2 \cdot 10^{-14}}{x_1 + 0.28} \cdot \sqrt{x_1(1+x_1)} \cdot \exp(-x_1), \quad x_1 = 10.2 \text{ эВ}/T_e. \quad (3)$$

Диффузия молекулярного водорода в плазму осуществлялась преимущественно в процессе резонансной перезарядки: $\text{H} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}$. Коэффициент диффузии D_m рассчитывался согласно [10]:

$$D_m = \frac{T_i}{v_m m_m}, \quad v_m \approx 1.7 \cdot 10^{-8} \sqrt{T_i} n, \quad (4)$$

где m_m - масса молекулы водорода, n - плотность частиц плазмы, v_m - частота процесса резонансной перезарядки, T_i - ионная температура.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАПУСКАЕМОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА С ПЛАЗМОЙ

В уравнения баланса энергии в токамаке в модели газонапуска [5] были включены энергетические потери в процессах ионизации, диссоциации и возбуждения молекулярного водорода, потери на тормозное и циклотронное излучения. В модели исключены процессы перемешивания.

Энергетические потери в элементарных процессах ΔW описывались согласно [11]:

$$\Delta W = \Delta W_{\text{ion}} + \Delta W_{\text{dis}} + \Delta W_1 = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (13.6 \cdot S_0 + 15.6 \cdot S_d + 10.2 \cdot S_1) n n_m, \quad (5)$$

где ΔW_{ion} - энергетические потери при ионизации молекулярного водорода, ΔW_{dis} - при диссоциации молекулярного водорода, ΔW_1 - энергетические потери в процессе возбуждения атомного уровня с $\varepsilon = 10.2$ эВ.

Энергетические потери на тормозное излучение ΔW_{BR} рассчитывались согласно [6]:

$$\Delta W_{\text{BR}} = 2.2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1} \text{ эВ}^{1/2} n^2 T^{1/2}. \quad (6)$$

Энергетические потери на циклотронное излучение ΔW_{C} рассчитывались согласно [12]:

$$\Delta W_{\text{C}} = 0.417 \cdot \frac{n^{1/2} T_e^{5/2} B^{5/2}}{a^{1/2}} \sqrt{1 + \frac{a}{R} \frac{18.9}{T_e^{1/2}}}, \quad (7)$$

где B - индукция тороидального магнитного поля, a - малый радиус плазменного шнура, R - большой радиус плазменного шнура.

Напуск холодного водорода влияет на транспортные процессы по всему плазменному объему. Однако используя энергетический подход, на стадии подъема тока удастся выделить область, в которой система уравнений энергетического баланса решается аналитически.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовалась начальная стадия разогрева плазменного шнура, имеющего размеры: $R=1.06$ м и $a=0.32$ м. Рассматривались следующие начальные параметры плазмы: $T_e (0 \leq r \leq a) = 10$ эВ, плотность частиц плазмы $n (0 \leq r \leq a) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, плотность молекулярного водорода $n_m (0 \leq r \leq a) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, где r - радиус магнитной поверхности. При подъеме тока $dI/dt = 4 \cdot 10^6 \text{ А/с}$ в установку напускался газ, вызывающий на границе плазменного шнура подъем плотности молекулярного водорода: $dn_m(r=a)/dt = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Согласно расчетам по модели [5], для $t = 0.01$ с электронная температура T_e в периферийной области плазменного шнура достигает 144 эВ. Глубина проникновения тока, соответствующая указанной температуре, уменьшается до $h=0.03$ м. Это приводит к мощному нагреву поверхностного h -слоя и развитию скин-эффекта. Мощность энерговклада омического нагрева в h -слой достигает $\Delta W_{\text{OH}} \approx 161 \text{ кВт/м}^3$. Однако потери на тормозное и циклотронное излучения в h -слое в этот момент невелики и составляют $\Delta W_{\text{BR}} + \Delta W_{\text{C}} \approx 0.4 \text{ Вт/м}^3$. Значительные энергетические потери по электронному каналу в h -слое осуществляются вследствие элементарных взаимодействий молекулярного водорода с плазмой. Мощность ионизационных потерь составит $\Delta W_{\text{ion}} \approx 68 \text{ кВт/м}^3$, мощность энергетических потерь в процессах диссоциации - $\Delta W_{\text{dis}} \approx 37.4 \text{ кВт/м}^3$, мощность энергетических потерь в процессах возбуждения атомного уровня с $\varepsilon = 10.2$ эВ в h -слое - $\Delta W_1 \approx 62 \text{ кВт/м}^3$. Из рассмотренных элементарных процессов с наибольшей частотой проходит процесс ионизации: $\nu_{\text{ion}} = 6.8 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Очевидно, что в первую очередь, сглаживанию профиля тока в h -слое и, соответственно, подавлению низких мод винтовых неустойчивостей, определяемых значением плотности тока на границе плазменного шнура и его радиальным градиентом, способствуют процессы ионизации, диссоциации и возбуждения атомных уровней.

Однако чрезмерный расход напускаемого газа будет не компенсировать, а подавлять омический нагрев в h -слое и вызывать сужение токового канала. На основе энергетического подхода была составлена оценка максимальной скорости ро-

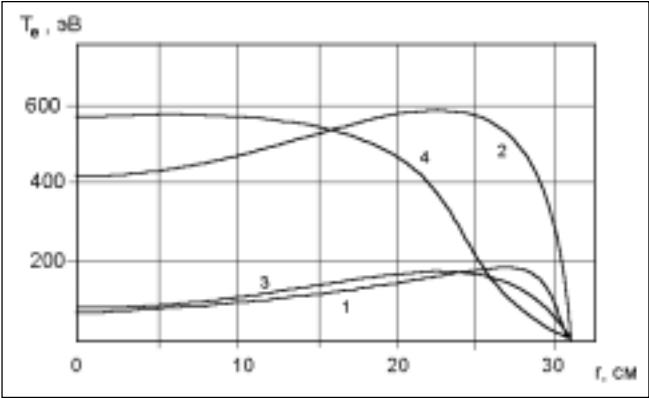


Рис. 1. Радиальное распределение электронной температуры $T_e(r)$ для двух режимов:
1, 2 - без газонапуска при $t=0.01$ и $t=0.1$ с;
3, 4 - с газонапуском при $t=0.01$ и $t=0.1$ с, $a = 32$ см

при отсутствии газонапуска и с газонапуском. На рис.1 показаны профили электронной температуры $T_e(r)$ для $t_1=0.01$ с и $t_2=0.1$ с без газонапуска и с газонапуском. В случае с газонапуском $T_e(r)$ в пределах h-слоя не поднимается выше 200 эВ в отличие от режима без газонапуска, где температура электронов достигает в пределах h-слоя 400 эВ. Из рис.2 видно, что в случае газонапуска на стадии подъема тока степень скинирования профиля тока $\gamma = \max(j_{r>0})/j(0)$ снижается и происходит сдвиг максимума плотности тока $\max(j_{r>0})$ вглубь плазменного шнура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты энергетических и молекулярных процессов в поверхностном слое плазменного шнура токамака по модели газонапуска и с использованием энергетического подхода позволяют сделать следующие выводы:

- процессы ионизации, диссоциации и возбуждения атомных уровней молекулярного водорода являются ответственными за значительное охлаждение электронной компоненты плазмы поверхностного слоя плазменного шнура в режиме газонапуска;

- рассчитан оптимальный критерий сглаживания скин-эффекта в поверхностном слое плазменного шнура: напуск газа через клапан не должен вызывать для $t>0.01$ с превышение значения скорости роста граничной плотности молекулярного водорода $P_{ист} = 2.17 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и для $t>0.1$ с - $P_{ист} = 2.17 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ при $dI/dt = 4 \cdot 10^6 \text{ А/с}$.

ста граничной плотности молекул водорода $P_{ист} = d(n_m(r=a))/dt$, определяемой напуском газа, при заданном подъеме тока dI/dt . По мере прогрева h-слоя $P_{ист}$ не должно превышать $2.17 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для $t > 0.01$ и $2.17 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для $t > 0.1$ с.

На рис.1, 2 представлены результаты численного расчета профилей плотности тока и электронной температуры согласно модели [5] в двух режимах:

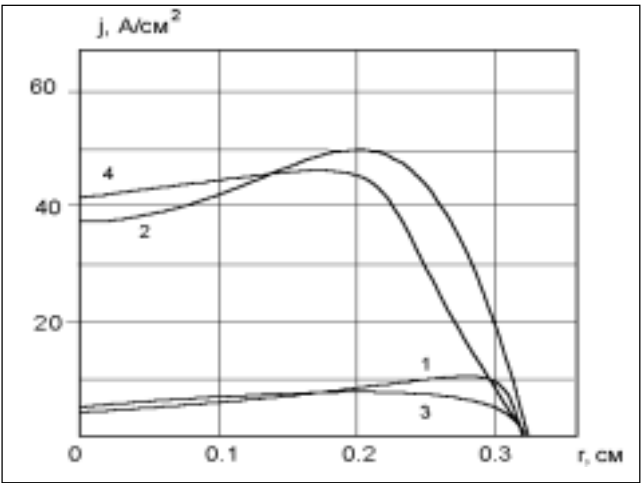


Рис. 2. Радиальное распределение плотности тока $j(r)$ для двух режимов:
1, 2 - без газонапуска при $t=0.01$ и $t=0.1$ с;
3, 4 - с газонапуском при $t=0.01$ и $t=0.1$ с

Список литературы

1. Ноткин Г.Е. О формировании профиля тока на установках токамак Т-10 // Физика плазмы. – 1985. – Т.11. – Вып.1.
2. Гуляев В.А., Коваленко В.Г., Левков Б.С., Ноткин Г.Е. Комплексная система автоматического регулирования параметрами плазмы с помощью газонапуска для установок токамак // Сб. науч. тр. ИАЭ им.И.В.Курчатова. – 1989. – Т.2.
3. Бендер С.Е., Косцов Ю.А., Литуновский Р.Н., Миняев О.А., Шаховец К.Г., Колчин А.Г., Носов С.Л., Овсянников Д.А. Исследование режимов управления газонапуском в токамаке «Туман-3» / Всесоюзная конференция по инженерным проблемам УТС: Тез. докл. – Ленинград, 1984.
4. Беляков В.А., Васильев В.И., Ивкин В.Г., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Литуновский Р.Н., Миняев О.А., Мозин И.В., Теплов П.П. Система управления параметрами плазмы в токамаке-реакторе / Всесоюзная конференция по инженерным проблемам УТС. Тез. докл. – Ленинград, 1984.
5. Aleksandrova O.N., Pashatsky N.V. The transmutation function formation at automatic control systems of plasma density shaping at discharge with gas puffing / The third international conference on new energy systems and conversions. – Kazan, 1997.
6. Днестровский Ю.Д., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. – М.: Наука, 1993.
7. Пистуневич В.И., Шаталов Г.Е. Термоядерный реактор на основе токамака // Итоги науки и техники. Физика плазмы. – 1981. – Т.2.
8. Крашенников С.И., Пожаров В.А. Гидродинамика нейтральной компоненты в диверторной плазме. – М.: ИАЭ им.И.В.Курчатова, 1985.
9. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Элементарные процессы в плазме. // Основы физики плазмы. – М.: Энергоиздат, 1983. – Т.1.
10. Вихрев В.В., Погуце О.П., Чудин Н.В., Юрченко Э.И. Процессы переноса в токамаке с адиабатическим сжатием. – М.: ИАЭ им.И.В.Курчатова, 1980.
11. Вайнштейн П.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. – М.: Наука, 1979.
12. Захаров Л.Е., Путвинский С.В. Основы оптимизации токамаков // Итоги науки и техники. Физика плазмы. – 1985. – Т.7. – С.4-79.

Поступила в редакцию 13.01.99.

СВИНЦОВЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ ДЛЯ БЫСТРОГО РЕАКТОРА-ВЫЖИГАТЕЛЯ С ЖЕСТКИМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ

Г.Л. Хорасанов, А.П. Иванов, В.В. Коробейников,

А.И. Блохин, А.Л. Шимкевич

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского, г. Обнинск



Рассмотрена возможность повышения эффективности выжигания младших актинидов за счет их деления в быстром реакторе при использовании в качестве теплоносителя изотопа Pb-208. Приведены расчетные относительные значения скоростей реакций деления и захвата нейтронов ядрами Np-237, Am-241 и Am-243 в бланкете быстрого реактора БОР-60 для различных теплоносителей: натрия, свинца естественного состава и свинца со стопроцентным содержанием Pb-208. Для свинцового теплоносителя разного изотопного состава рассчитана наведенная за 1 год работы реактора радиоактивность и ее распад за время до 1000 лет.

Уничтожение долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики является одной из основных задач для развития энергетики будущего. Проблема обращения с младшими актинидами (МА) уже давно и систематически рассматривается специалистами различных стран. Этой проблеме посвящены многие доклады на различных международных конференциях, наиболее обширный материал представлен на конференциях GLOBAL-93, 95, 97. Стратегия реакторной трансмутации определилась в настоящее время достаточно четко. Нептуний предлагается включать в состав смеси урана и плутония и трансмутировать в активных зонах реакторов. Трансмутацию америция предлагается осуществлять в специальных мишенях, располагаемых, например, в боковых экранах (БЭ) реакторов на быстрых нейтронах (РБН) или подкритических реакторов с ускорителями. В быстрых системах в боковых экранах может быть использован замедляющий материал для создания мягкого спектра нейтронов, при этом поток нейтронов в нем может иметь значительно большее значение, чем в тепловых реакторах. Возможность создания заданного спектра нейтронов в экране быстрого реактора имеется, однако все дело в определении целесообразности того или иного спектра и величины нейтронного потока. В табл.1 приведены значения нейтронных сечений основных изотопов тяжелых нуклидов, участвующих в изотопных цепочках при трансмутации МА.

Рассматривая цепочки превращения изотопов в реакторе при облучении нептуния и америция и учитывая значения нейтронных сечений, приведенные в табл.1, можно сделать следующий вывод: скорость превращений нуклидов МА в тепловом спектре нейтронов значительно выше, чем в быстром, но при этом образование более высоких изотопов (высокорadioтоксичных изотопов плутония,

© Г.Л. Хорасанов, А.П. Иванов, В.В. Коробейников, А.И. Блохин, А.Л. Шимкевич, 1999

Таблица 1

Нейтронные сечения для традиционных тепловых и быстрых реакторов, барн

Изотоп	Тепловые реакторы		Быстрые реакторы	
	Захват	Деление	Захват	Деление
Np-237	114	11.4	0.7	0.16
Pu-238	280	10.6	0.4	1.0
Pu-239	145	389.0	0.4	1.5
Am-241	375	2.3	1.0	0.13
Am-243	130	0.1	0.6	0.07
Cm-244	40.1	1.15	0.5	0.35
Cm-245	189	1111	0.3	2.0

амерция, кюрия) в тепловом спектре заметно превышает их образование в быстром спектре. Размещение МА в экранах быстрых систем позволяет облучать их там произвольное время (ограничение времени облучения сборок с МА обусловлено только стойкостью стали под облучением), поэтому более жесткий спектр может быть для целей выжигания МА более приемлемым.

Одним из путей получения более жесткого спектра нейтронов в быстром реакторе может быть использование теплоносителя с более слабыми замедляющими свойствами. В качестве такого теплоносителя рассмотрен свинец, состоящий из изотопа Pb-208, в естественной смеси его содержание составляет 52.3%. Этот изотоп свинца обладает сечением неупругого рассеяния нейтронов в 3 - 3.5 раза меньшим, чем другие его изотопы. Эти данные взяты из библиотеки ядерных данных JENDL-3.2.[1] и приведены в табл.2.

Для сравнения зависимости скоростей ядерных преобразований МА от использования различных теплоносителей в реакторе на быстрых нейтронах, были проведены расчеты бокового экрана методом Монте Карло по программе ММКФК [2]. Расчетная

Таблица 2

Сечения неупругого рассеяния нейтронов, усредненные по спектру деления для различных изотопов свинца и свинца естественного состава, барн

Нуклид	Pb-204	Pb-206	Pb-207	Pb-208	Pb-nat
Сечение, σ_{in}	1.325	1.316	1.265	0.361	0.804

Таблица 3

Концентрации ядер МА и теплоносителей в расчетных моделях бокового экрана быстрого реактора, ядер $10^{-24}/\text{см}^3$

Нуклид	Вариант 1 (Np+Na)	Вариант 2 (Np+Pb-nat)	Вариант 3 (Np+Pb-208)	Вариант 4 (Am+Na)	Вариант 5 (Am+Pb-nat)	Вариант 6 (Am+Pb-208)
Np-237	0.00126	0.00126	0.00126	0.0	0.0	0.0
Am-241	0.0	0.0	0.0	0.00114	0.00114	0.00114
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.00040	0.00040	0.00040
O	0.00252	0.00252	0.00252	0.00236	0.00236	0.00236
Na	0.01030	0.0	0.0	0.01030	0.0	0.0
Pb-natl	0.0	0.01430	0.0	0.0	0.01430	0.0
Pb-208	0.0	0.0	0.01430	0.0	0.0	0.01430

Таблица 4

Ядерные концентрации конструкционных материалов в гомогенизированной модели бокового экрана, ядер $10^{-24}/\text{см}^3$

Нуклид	Варианты 1-6
Fe	0.014
Cr	0.00308
Ni	0.00168
Mo	0.000242
Mn	0.000164
Zr	0.00216
C	0.00216

Таблица 5

Расчетные величины отношения средних сечений деления, σ_{fis} , и захвата нейтронов, $\sigma_{\text{fis}} + \sigma_{\text{cap}}$, для Np и Am в боковом экране с разными теплоносителями, $\sigma_{\text{fis}} / (\sigma_{\text{fis}} + \sigma_{\text{cap}})$

МА	БЭ с Na	БЭ с Pb-nat.	БЭ с Pb-208
Np-237	0.2000	0.2100	0.2650
Am-241	0.1770	0.1750	0.2150
Am-243	0.2170	0.2260	0.2800

гомогенизированная модель бокового экрана толщиной 50 см содержала 6 различных вариантов, отличающихся друг от друга ядерными концентрациями делящегося вещества, Np и Am, и теплоносителя, Na, Pb-nat и Pb-208. В табл.3 приводятся концентрации МА и теплоносителя.

Состав конструкционных материалов для всех вариантов одинаковый. Значения ядерных концентраций конструкционных материалов в гомогенизированной модели бокового экрана приведены в табл.4. Полученные результаты приведены в табл.5, из которой видно, что быстрый реактор-выжигатель со свинцовым теплоносителем естественного состава практически не отличается от натриевого. Использование же в качестве теплоносителя изотопа свинца Pb-208 приводит к увеличению выжигательной способности реактора на 20 – 30% по сравнению с традиционным быстрым реактором. На этот факт следует обратить внимание при экономическом обосновании использования свинцового теплоносителя.

Теплоноситель на основе изотопа свинца Pb-208 может иметь также преимущество перед другими теплоносителями как менее активируемый материал. Для иллюстрации этого были проведены расчеты

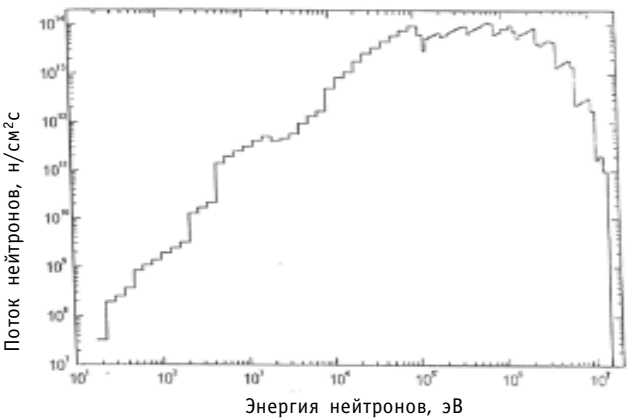


Рис.1. Спектр нейтронов в быстром реакторе BOR-60

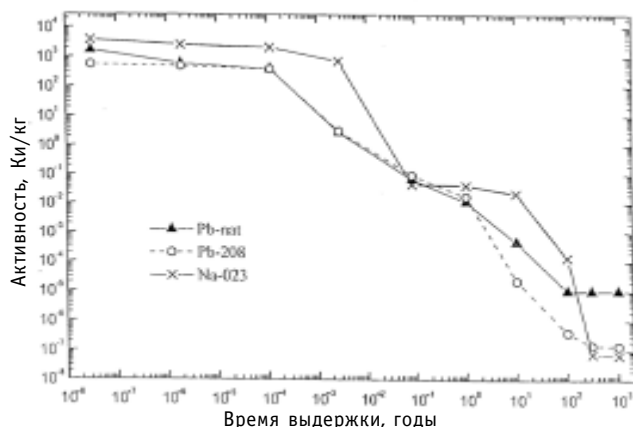


Рис.2. Спад активности свинца естественного состава, изотопа свинца Pb-208 и натрия после облучения в течение 1 года в спектре реактора BOR-60

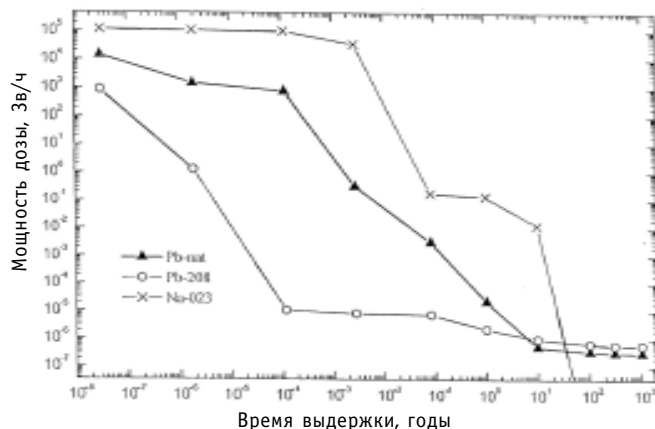


Рис.3. Мощность дозы свинца естественного состава, изотопа свинца Pb-208 и натрия после облучения в течение 1 года в спектре реактора BOR-60

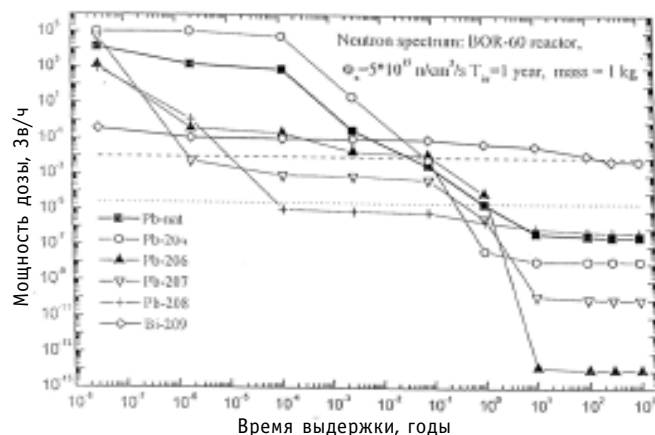


Рис.4. Мощность дозы свинца естественного состава, изотопов свинца Pb-204, 206, 207, 208 и Bi-209 после облучения в течение 1 года в спектре реактора BOR-60

наведенной активности различных материалов теплоносителя в спектре нейтронов деления быстрого реактора BOR-60 (рис.1). Расчеты выполнялись с использованием кода FISPACT-3 [3], библиотеки сечений активации FENDL-2/A и библиотеки распадных ядерных данных FENDL-2/D [4]. На рис.2 приведена активность природного свинца, изотопа свинца Pb-208 и натрия после их облучения в течение 1 года в потоке быстрых нейтронов $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$ н/см²с. На рис.3 показана зависимость контактной мощности дозы 1 кг материала, облученного флюенсом $1.6 \cdot 10^{23}$ н/см² от времени выдержки величиной до 1000 лет. На рис.4 приведены аналогичные результаты для всех стабильных изотопов свинца и висмута Bi-209. Из этих зависимостей видно, что активность свинца Pb-208 после его облучения в реакторе спадает существенно быстрее свинца естественного состава и натрия, что очень важно для проблемы снятия реакторов с такими теплоносителями с эксплуатации, а также при различных аварийных ситуациях, связанных с потерей теплоносителя.

ВЫВОДЫ

- С целью повышения эффективности выжигания в РБН пороговых актинидов (Np-237, Pu-240, Pu-242, Am-243) рассмотре-

на возможность использования слабозамедляющего свинцового теплоносителя с высоким обогащением по изотопу Pb-208.

- Методом Монте Карло рассчитан боковой экран РБН, включающий в себя делящееся вещество, теплоноситель и конструкционные материалы. Показано, что для Np-237 , Am-241 и Am-243 отношение $\sigma_{\text{fis}} / (\sigma_{\text{fis}} + \sigma_{\text{cap}})$ увеличивается на 20-30%, если в качестве теплоносителя использовать Pb-208 вместо Na или Pb-nat.

- С помощью кода FISPAST-3 показано, что изотоп свинца Pb-208, наряду со слабым замедлением, обладает и малой активируемостью в спектре нейтронов деления, что позволяет рассматривать его как перспективный материал для теплоносителя РБН.

Авторы выражают благодарность В.В. Синице за предоставленные нейтронные сечения изотопа свинца Pb-208.

Список литературы

1. JEF Report 14. Table of Simple Integral Cross Section Data from JEF-2.2, ENDF/B-VI, JENDL3.2, BROND-2 and CENDL-2, Paris, NEA, 1994.
2. Казакова Л.Б., Камаева О.Б., Коробейникова Л.В., Коробейников В.В., Полевой В.Б. Развитие функциональных возможностей комплекса программ ММКФК для моделирования переноса нейтронов и гамма-квантов. В сб.: Труды 7-го Всесоюзного совещания "Методы Монте Карло в вычислительной математике и математической физике". - Новосибирск, 1985.
3. Forrest R.A., Sublet J.Ch. FISPCT-3 User Manuel. Report AEA/FUS/227 (1993).
4. Pashchenko A.B. Summary Report on the IAEA Advisory Group Meeting on Completion of FENDL-1 and Start FENDL-2. Report IAEA/INDC (NDS)-352, 1996.

Поступила в редакцию 11.12.98.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ЯЭУ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА

И.Р. Багдасарова, В.А. Галкин

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск.



Исследуется возможный механизм возникновения периодических структур в спектре дефектов, возникающих в конструкционных материалах ЯЭУ, обусловленный взаимными слияниями дефектов и действием стационарного пространственно однородного источника.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается возможный механизм образования пространственных периодических структур в распределении дефектов конструкционных материалов ЯЭУ, возникающих под действием стационарного внешнего источника (источником может служить, например, поток нейтронов или γ -квантов). В основу эволюции стационарных дефектов положим явление слияния пор в процессе их движения в кристаллической решетке. Предположим, что энергия связи пор при их слиянии достаточно высока, и явлением их распада можно пренебречь. Кроме того, предположим, что движение пор происходит вдоль оси X (одномерная модель), что естественно с физической точки зрения, поскольку локально поры движутся вдоль градиента температур.

Пусть $f^{(\omega)}(x, t)$ - функция распределения пор по размерам, где ω - объем поры, x - пространственная координата, t - время, $q^{(\omega)}$ - интенсивность образования пор под действием внешнего источника. Тогда кинетическое уравнение переноса имеет следующий вид:

$$\frac{\partial f^{(\omega)}(x, t)}{\partial t} + v^{(\omega)} \frac{\partial f^{(\omega)}(x, t)}{\partial x} = S^{(\omega)}(f^{(\cdot)}(x, t)) + q^{(\omega)},$$

где $v^{(\omega)}$ - скорость переноса пор, имеющих объем ω , $S^{(\omega)}(f^{(\cdot)}(x, t))$ - оператор столкновений. При сделанных предположениях относительно характера движения пор, оператор $S^{(\omega)}(f^{(\cdot)}(x, t))$ имеет вид оператора Смолуховского:

$$S^{(\omega)}(f^{(\cdot)}(x, t)) = \frac{1}{2} \int_0^{\omega} \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1) f^{(\omega - \omega_1)}(x, t) f^{(\omega_1)}(x, t) d\omega_1 - \\ - f^{(\omega)}(x, t) \int_0^{\infty} \Phi(\omega, \omega_1) f^{(\omega_1)}(x, t) d\omega_1,$$

где $\Phi(\omega, \omega_1)$ - известная функция, называемая ядром, которая имеет смысл интенсивности слияния пор.

Пусть процесс является стационарным и $v^{(\omega)} > 0$. Тогда, введя новую переменную $u^{(\omega)}(x) = v^{(\omega)} f^{(\omega)}(x)$, приходим к уравнению:

$$\frac{du^{(\omega)}(x)}{dx} = \bar{S}^{(\omega)}(u^{(\cdot)}(x)) + q^{(\omega)},$$

где $\bar{S}^{(\omega)}(u^{(\cdot)}(x))$ - оператор Смолуховского с ядром: $\bar{\Phi}(\omega, \omega_1) = \frac{\Phi(\omega, \omega_1)}{v(\omega)v(\omega_1)}$.

Обозначив в полученном уравнении переменную x через t , приходим к известному пространственно однородному уравнению Смолуховского:

$$\frac{du^{(\omega)}(t)}{dt} = \bar{S}^{(\omega)}(u^{(\cdot)}(t)) + q^{(\omega)}. \quad (1)$$

Следует отметить, что наличие или отсутствие классического решения уравнения (1) зависит от свойств ядра $\Phi(\omega, \omega_1)$.

В случае ограниченного ядра существование классического решения было доказано в [1], а при условии что функция $\Phi(\omega, \omega_1)$ возрастает не быстрее, чем линейно по своим аргументам – в [2,3]. При $\Phi(\omega, \omega_1) = \omega\omega_1$ существование классического решения было доказано в [4]. В случае, когда функция $\Phi(\omega, \omega_1)$ возрастает быстрее, чем линейно по своим аргументам, у уравнения Смолуховского нет классического решения, что было показано в [5].

Ряд работ [4, 6-12] посвящен поиску аналитических решений уравнения Смолуховского, а также их свойств для различных случаев.

В настоящей работе исследуется возможный механизм возникновения периодических структур в спектре дефектов, возникающих в конструкционных материалах ЯЭУ, обусловленный взаимными слияниями дефектов и действием стационарного пространственно однородного источника и доказывается периодичность по времени решения уравнения (1) при наличии источника частиц.

ПЕРИОДИЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ СМОЛУХОВСКОГО (1) ПРИ НАЛИЧИИ ИСТОЧНИКА ЧАСТИЦ

Рассмотрим случай, когда действует внешний источник, поставляющий частицы в систему. Функцию, определяющую действие источника частиц, обозначим $q^{(\omega)}$.

Рассмотрим задачу Коши:

$$\frac{du^{(\omega)}(t)}{dt} = S^{(\omega)}(u^{(\cdot)}(t)) + q^{(\omega)}, \quad \text{где } \omega \in R_1^+, \quad t \in R_1^+; \\ u^{(\omega)}|_{t=0} = u_0^{(\omega)}, \quad (2)$$

где S – оператор Смолуховского, а $q^{(\omega)}$ – источник частиц, $q^{(\omega)} \geq 0$, $q \in L_1(R_1^+)$. На функцию $\Phi(\omega, \omega_1)$, определенную на $\omega, \omega_1 \in R_1^+$, накладываем условия (А):

- 1) $\Phi(\omega, \omega_1) \geq 0$,
- 2) $\Phi(\omega, \omega_1) = \Phi(\omega_1, \omega)$,
- 3) $\Phi(\omega, \omega_1)$ непрерывна по своим аргументам.

Рассмотрим следующие три класса ядер:

- $\lim_{\omega, \omega_1 \rightarrow \infty} \Phi(\omega, \omega_1)(\omega^\alpha + \omega_1^\alpha)^{-1} > 0, \alpha > 2$,
- $\lim_{\omega, \omega_1 \rightarrow \infty} \Phi(\omega, \omega_1)\omega^{-\alpha}\omega_1^{-\alpha} > 0, \alpha > 2$,
- $\lim_{\omega, \omega_1 \rightarrow \infty} \Phi(\omega, \omega_1)(\omega + \omega_1)^{-\alpha} > 0, \alpha \geq 2$.

В настоящей работе через C будем обозначать постоянные величины.

Л е м м а 1. При $\omega > 1$, $\omega_1 > 1$ для каждого из этих трех классов ядер справедлива

$$\text{оценка: } \Phi(\omega, \omega_1) \geq C\omega^{\frac{\alpha}{2}}\omega_1^{\frac{\alpha}{2}}. \quad (3)$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Доказательство утверждения леммы, ввиду его простоты, приводить не будем.

Домножим обе части уравнения (2) на ω^α и проинтегрируем по пространству R_1^+ . Получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)}(t) d\omega &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \omega^\alpha \int_0^\omega \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) u^{(\omega - \omega_1)}(t) d\omega_1 d\omega - \\ &- \int_0^\infty u^{(\omega)}(t) \omega^\alpha \int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 d\omega + \int_0^\infty q^{(\omega)} \omega^\alpha d\omega. \end{aligned}$$

Произведя замену $\omega' = \omega - \omega_1$, $\omega_1' = \omega_1$ в первом слагаемом, стоящем в правой части, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)}(t) d\omega &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty (\omega + \omega_1)^\alpha \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) u^{(\omega)}(t) d\omega_1 d\omega - \\ &- \int_0^\infty u^{(\omega)}(t) \omega^\alpha \int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 d\omega + \int_0^\infty q^{(\omega)} \omega^\alpha d\omega. \end{aligned}$$

В силу свойства симметричности ядра $\Phi(\omega, \omega_1)$ верно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)}(t) d\omega &= \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty \{(\omega + \omega_1)^\alpha - \omega^\alpha - \omega_1^\alpha\} \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) u^{(\omega)}(t) d\omega_1 d\omega + \int_0^\infty q^{(\omega)} \omega^\alpha d\omega. \end{aligned}$$

Лемма 2. При $\alpha \geq 2$ верна оценка: $(x+y)^\alpha - x^\alpha - y^\alpha \geq Cx^{\frac{\alpha}{2}}y^{\frac{\alpha}{2}}$, где $C>0$. (4)

Доказательство. Доказательство утверждения леммы, ввиду его простоты, не приводится.

Используя полученные оценки (3) и (4), при $\alpha \geq 2$ имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)}(t) d\omega &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty \{(\omega + \omega_1)^\alpha - \omega^\alpha - \omega_1^\alpha\} \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)} u^{(\omega)} d\omega_1 d\omega + \\ &+ \int_0^\infty q^{(\omega)} \omega^\alpha d\omega \geq \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty C \omega^\alpha \omega_1^\alpha u^{(\omega)} u^{(\omega_1)} d\omega d\omega_1 + \int_0^\infty q^{(\omega)} \omega^\alpha d\omega. \end{aligned}$$

Тогда при $\alpha \geq 2$ для рассматриваемых классов ядер получаем неравенство:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)} d\omega \geq \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty C \omega^\alpha \omega_1^\alpha u^{(\omega)} u^{(\omega_1)} d\omega d\omega_1 + \int_0^\infty q^{(\omega)} \omega^\alpha d\omega.$$

Таким образом, мы пришли к дифференциальному неравенству относительно $\int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)} d\omega$.

Предполагая наличие момента порядка α у источника, введем обозначения:

$$z = \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)} d\omega, \quad Q = \int_0^\infty \omega^\alpha q^{(\omega)} d\omega.$$

Во введенных обозначениях полученное дифференциальное неравенство имеет вид:

$$\dot{z} \geq 0.5Cz^2 + Q. \quad (5)$$

Используя лемму о дифференциальных неравенствах (см. [13]), решаем (5):

$$p \leq 0.5Cp^2 + Q.$$

Вводя обозначение $C_1 = 0.5C$, имеем: $p \leq C_1 p^2 + Q$.

Интегрируя полученное уравнение, получаем:

$$p = \sqrt{\frac{Q}{C_1}} \operatorname{tg}\{\sqrt{QC_1}(t - C_2)\}.$$

По лемме о дифференциальных неравенствах: $z \geq p$, т.е. $z \geq C_7 \operatorname{tg}(C_3(t - t_k))$, где

$$C_3 = \sqrt{QC_1}, \quad C_7 = \sqrt{\frac{Q}{C_1}}, \quad t_k = C_2.$$

Вернемся к уравнению (2). Оценим $\int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)} d\omega_1$.

• Если $\Phi(\omega, \omega_1) (\omega^\alpha + \omega_1^\alpha)^{-1} > 0$ при $\alpha > 2$, то

$$\int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)} d\omega_1 \geq \int_0^\infty C(\omega^\alpha + \omega_1^\alpha) u^{(\omega_1)} d\omega_1 =$$

$$= C \left(\omega^\alpha \int_0^\infty u^{(\omega_1)} d\omega_1 + \int_0^\infty \omega_1^\alpha u^{(\omega_1)} d\omega_1 \right) \geq C \int_0^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)} d\omega = Cz.$$

• Пусть $\omega > 1$, $\omega_1 > 1$. Будем рассматривать интегралы на отрезке $[1, \infty]$. Это можно сделать, т. к. на сходимость интеграла влияет лишь его сходимость на указанном отрезке.

Если $\Phi(\omega, \omega_1) \omega^{-\alpha} \omega_1^{-\alpha} > 0$ при $\alpha > 1$, то

$$\int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)} d\omega_1 \geq C \int_0^\infty \omega^\alpha \omega_1^\alpha u^{(\omega_1)} d\omega_1 \geq C \int_1^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)} d\omega = Cz.$$

• В случае, когда $\Phi(\omega, \omega_1) (\omega + \omega_1)^{-\alpha} > 0$, $\alpha \geq 2$, получаем:

$$\int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)} d\omega_1 \geq C \int_0^\infty (\omega + \omega_1)^\alpha u^{(\omega_1)} d\omega_1 \geq \int_0^\infty C(\omega^\alpha + \omega_1^\alpha) u^{(\omega_1)} d\omega_1 \geq C \int_1^\infty \omega^\alpha u^{(\omega)} d\omega = Cz.$$

В силу оценки, полученной для z , во всех трех случаях имеем:

$$\int_0^\infty \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 \geq C \operatorname{tg}(C_3(t - t_k)). \quad (6)$$

Для дальнейших рассуждений нам нужно доказать изложенную ниже лемму.

Лемма 3. $\forall \omega: 0 \leq \omega \leq A, \forall t: 0 \leq t \leq T$, где A и T - любые неотрицательные постоянные, функция $u^{(\omega)}(t)$, являющаяся решением уравнения Смолуховского, ограничена.

Доказательство. Рассмотрим уравнение Смолуховского (2). Выбросив отрицательное слагаемое из правой части, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^{(\omega)}}{\partial t} &\leq \frac{1}{2} \int_0^\omega \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1) u^{(\omega - \omega_1)} u^{(\omega_1)} d\omega_1 + q^{(\omega)}, \\ \frac{\partial u^{(\omega)}}{\partial t} &\leq \frac{1}{2} \max_{0 \leq \omega, \omega_1 \leq A} \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1) \int_0^\omega u^{(\omega - \omega_1)} u^{(\omega_1)} d\omega_1 + \max_{0 \leq \omega \leq A} q^{(\omega)}. \end{aligned}$$

Введем обозначения $C(A) = \frac{1}{2} \max_{0 \leq \omega, \omega_1 \leq A} \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1)$, $Q_1(A) = \max_{0 \leq \omega \leq A} q^{(\omega)}$, где $C(A)$, $Q_1(A)$ - неотрицательные постоянные, зависящие от A . Тогда:

$$\frac{\partial u^{(\omega)}(t)}{\partial t} \leq C(A) \int_0^\omega u^{(\omega - \omega_1)}(t) u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 + Q_1(A).$$

Кроме того, обозначим $I(A, t) = \sup_{0 \leq \omega \leq A} u^{(\omega)}(t)$. Тогда:

$$\frac{\partial u^{(\omega)}(t)}{\partial t} \leq C(A) I(A, t) \int_0^\omega u^{(\omega - \omega_1)}(t) d\omega_1 + Q_1(A).$$

Заметим, что $\int_0^\omega u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 \leq \int_0^\infty u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1$, причем $\int_0^\infty u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 = N(t)$, где $N(t)$ - общее ко-

личество частиц в системе в момент времени t .

Предполагая суммируемость функции источника, проинтегрируем обе части уравнения (2) по переменной ω по всему пространству R_1^+ . Получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} u^{(\omega)}(t) d\omega = & \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \int_0^{\omega} \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) u^{(\omega - \omega_1)}(t) d\omega_1 d\omega - \\ & - \int_0^{\infty} u^{(\omega)}(t) \int_0^{\infty} \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) d\omega_1 d\omega + \int_0^{\infty} q^{(\omega)} d\omega, \end{aligned}$$

откуда, произведя замену $\omega' = \omega - \omega_1$, $\omega'_1 = \omega_1$ в первом слагаемом, стоящем в правой части, получаем:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} u^{(\omega)}(t) d\omega = -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) u^{(\omega)}(t) d\omega_1 d\omega + \int_0^{\infty} q^{(\omega)} d\omega.$$

Таким образом, общее число частиц, находящихся в системе, удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial t} N(t) = -\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \Phi(\omega, \omega_1) u^{(\omega_1)}(t) u^{(\omega)}(t) d\omega_1 d\omega + \int_0^{\infty} q^{(\omega)} d\omega.$$

Тогда, рассматривая ω : $0 \leq \omega \leq A$ и, выбросив отрицательный член из правой части равенства, получаем относительно $N(t)$ дифференциальное неравенство: $\frac{dN(t)}{dt} \leq Q_2$,

где $Q_2 = \int_0^{\infty} q^{(\omega)} d\omega$.

Применяя лемму о дифференциальных неравенствах [13], получаем: $N(t) \leq N(0) + Q_2 t$. Откуда, рассматривая t : $0 \leq t \leq T$, получаем: $N(t) \leq N(0) + Q_2 T$.

Обозначим $P(T) = N(0) + Q_2 T$. Тогда для функции $u^{(\omega)}(t)$ имеем неравенство:

$$\frac{\partial u^{(\omega)}(t)}{\partial t} \leq C(A) I(A, t) P(T) + Q_1(A).$$

Решим его, применив лемму о дифференциальных неравенствах:

$$u^{(\omega)}(t) \leq u^{(\omega)}(0) + C(A) P(T) \int_0^t I(A, s) ds + Q_1(A) t,$$

откуда, пользуясь определением $I(A, t)$, получаем:

$$I(A, t) \leq I(A, 0) + C(A) P(T) \int_0^t I(A, s) ds + Q_1(A) t.$$

Мы получили неравенство Гронуолла [14] относительно $I(A, t)$, решение которого ограничено на отрезке $[0, T]$. Тогда $\exists I_{\max}$: $\forall t \in [0, T]$ выполнено неравенство $I(A, t) \leq I_{\max}$.

Таким образом, для $u^{(\omega)}(t)$ получаем следующую оценку:

$$u^{(\omega)}(t) \leq \max_{0 \leq \omega \leq A} u^{(\omega)}(0) + C(A) P(T) I_{\max} T + Q_1(A) T.$$

Заметим, что выражение, стоящее в правой части, не зависит от t и ω т.е. мы оценили $u^{(\omega)}(t)$ постоянной величиной: $C = \max_{0 \leq \omega \leq A} u^{(\omega)}(0) + C(A) P(T) I_{\max} T + Q_1(A) T$. (7)

Лемма доказана.

Используя доказанную лемму 3, а также ограниченность функции $\Phi(\omega, \omega_1)$ и $q^{(\omega)}$ при $\omega \in [0, A]$, оценим два слагаемых из правой части (2) константой C :

$$\frac{1}{2} \int_0^{\omega} \Phi(\omega - \omega_1, \omega_1) u^{(\omega - \omega_1)} u^{(\omega)} d\omega_1 + q^{(\omega)} < C.$$

Тогда из (2), воспользовавшись оценками (6) и (7), получаем дифференциальное неравенство относительно $u^{(\omega)}(t)$:

$$\frac{\partial u^{(\omega)}(t)}{\partial t} \leq C - C_1 \operatorname{tg}(C_3(t - t_k)) u^{(\omega)}(t).$$

Это неравенство верно для любого ω , т.к. для любого фиксированного ω существует положительная постоянная A : $\omega \in [0, A]$, а на таком отрезке справедливость неравенства доказана выше. Кроме того, выведенное неравенство верно для любого $t \in [0, T]$, где T - любая положительная постоянная.

Докажем теперь, что $u^{(\omega)}(t)$ является периодической функцией по времени, то есть по переменной t .

Положим $C_3 = 1$ (иначе делаем замену переменных $t_1 = C_3 t$, которая не влияет на периодичность $u^{(\omega)}(t)$).

Применим лемму о дифференциальных неравенствах. Методом вариации произвольной постоянной получаем:

$$y + C_1 \operatorname{tg}(t - t_k) y = C, \quad |y| = C_5(t) \cos(t - t_k)^{C_1}.$$

Пусть $y \geq C_5(t) \cos^{C_1}(t - t_k)$, тогда $y = C_5(t) \cos^{C_1}(t - t_k)$, откуда:

$$C_5(t) = \int \frac{C}{\cos^{C_1}(t - t_k)} dt.$$

Заметим, что если $y < C_5(t) \cos^{C_1}(t - t_k)$, то $-y = C_5(t) \cos^{C_1}(t - t_k)$, и, положив $C_5(t) := -C_5(t)$, далее можно рассуждать аналогично.

Покажем, что $y = C_5(t) \cos^{C_1}(t - t_k)$ периодически обращается в ноль. Множитель $\cos^{C_1}(t - t_k)$ обращается в ноль при $t = \pi n / 2 + t_k$, где $n \in \mathbb{N}$. Но эти же самые точки являются особыми для $C_5(t)$, так как в этих точках обращается в бесконечность подынтегральное выражение.

Рассмотрим решение $y(t)$ при $t \in [0, t_{k1}]$, где t_{k1} - ближайшая к нулю особая точка. В δ_- - окрестности точки t_{k1} разложим $\cos(t - t_k)$ в ряд Тейлора. Кроме того, при t , принадлежащем δ_- - окрестности точки t_{k1} , $C_5(t)$ можно представить следующим образом:

$$C_5(t) \cong \int_0^{t_{k1} - \delta} \frac{C}{\cos^{C_1}(s - t_k)} ds + \int_{t_{k1} - \delta}^t \frac{ds}{(C(t_{k1} - s))^{C_1}}.$$

В δ_- - окрестности точки t_{k1} и первый и второй интеграл вычисляются явно. Тогда в

δ_- - окрестности точки t_{k1} получаем:

$$y \equiv \left\{ \int_0^{t_{k1}-\delta} \frac{C}{\cos^{C_1}(s-t_k)} ds + \int_{t_{k1}-\delta}^t \frac{ds}{(C(t_{k1}-s))^{C_1}} \right\} (t_{k1}-t)^{C_1} = \left(C + \int_{t_{k1}-\delta}^t \frac{ds}{(C(t_{k1}-s))^{C_1}} \right) (t_{k1}-t)^{C_1}.$$

Чтобы показать, что y обращается в ноль при $t=t_{k1}$, нужно взять предел вышестоящего выражения при $\delta \rightarrow 0$, т.е. при $t \rightarrow t_{k1}$.

$$\begin{aligned} & \lim_{t \rightarrow t_{k1}} \left(C + \int_{t_{k1}-\delta}^t \frac{ds}{(C(t_{k1}-s))^{C_1}} \right) (t_{k1}-t)^{C_1} = \\ & = \lim_{t \rightarrow t_{k1}} \begin{cases} \left(C \frac{1}{(t_{k1}-t)^{C_1-1}} - C \frac{1}{\delta^{C_1-1}} \right) (t_{k1}-t)^{C_1}, & C_1 \neq 1, \\ (C \ln |t_{k1}-t| - C \ln |\delta|) (t_{k1}-t)^{C_1}, & C_1 = 1 \end{cases} = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, мы доказали, что y в точке $t=t_{k1}$, обращается в ноль. По лемме о дифференциальных неравенствах $u^{(\omega)}(t) \leq y(t)$. С другой стороны, $u^{(\omega)}(t) \geq 0$, следовательно, $u^{(\omega)}(t)$ также обращается в ноль в точке $t=t_{k1}$.

Заметим, что в точке $t=t_{k1}$ функция $u^{(\omega)}(t)$ обращается в ноль независимо от начальных данных. Тогда, стартуя с точки $t=t_{k1}$, и повторяя предыдущие рассуждения, докажем, что y , а следовательно и $u^{(\omega)}(t)$, обращаются в ноль периодически, т.е. когда y обращается $\cos(t-t_k)$. Это происходит, когда $t = \pi n/2 + t_k$, где $n \in \mathbb{N}$.

Таким образом, мы доказали следующую теорему.

Т е о р е м а.

Для ядер вида:

- $\lim_{\omega, \omega_1 \rightarrow \infty} \Phi(\omega, \omega_1) (\omega^\alpha + \omega_1^\alpha)^{-1} > 0, \alpha > 2,$
- $\lim_{\omega, \omega_1 \rightarrow \infty} \Phi(\omega, \omega_1) \omega^{-\alpha} \omega_1^{-\alpha} > 0, \alpha > 2,$
- $\lim_{\omega, \omega_1 \rightarrow \infty} \Phi(\omega, \omega_1) (\omega + \omega_1)^{-\alpha} > 0, \alpha \geq 2$

при ограниченной положительной суммируемой функции источника $q^{(\omega)}$, обладающей моментом порядка α , функция $u^{(\omega)}(t)$, являющаяся решением уравнения Смолуховского (2) периодична (периодически обращается в ноль) по времени, то есть по переменной t .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Melzak Z.A. A scalar transport equation // Trans. Amer. Math. Soc., 1957. - V. 85. - P.547-566.
2. Галкин В.А. О существовании и единственности решения уравнения коагуляции // Дифференциальные уравнения, 1977. - Т.13. - №8. - С.1460-1470.
3. Галкин В.А. Об устойчивости и стабилизации решения уравнения коагуляции // Дифференциальные уравнения, 1978. - Т.14. - №10. - С.1863-1874.

4. Галкин В.А. О решении уравнения коагуляции с ядром $\Phi=xy$ // Метеорология и гидрология, 1984. - № 5. - С.33-39.
5. Галкин В.А. Об одном свойстве процесса коагуляции атмосферного аэрозоля // Метеорология и гидрология, 1983. - № 12. - С.11-19.
6. Туницкий Н.Н. О коагуляции полидисперсных систем // ЖЭТФ, 1938. - Т.8. - Вып.4. - С.418-424.
7. Головин А.М. К вопросу о решении уравнения коагуляции дождевых капель с учетом конденсации // ДАН СССР, 1963. - Т.148. - № 6. - С.1290-1293.
8. Головин А.М. Решение уравнения коагуляции облачных капель в восходящем потоке воздуха // Изв. АН СССР, Сер. геофизика, 1963. - № 5. - С.783-791.
9. Головин А.М. О спектре коагулирующих облачных капель // Изв. АН СССР, Сер. геофизика, 1963. - № 9. - С.1438-1447.
10. Головин А.М. О кинетическом уравнении коагулирующих облачных капель // Изв. АН СССР, Сер. геофизика, 1963. - № 10. - С.1571-1580.
11. Тупчиев В.А. Об асимптотических свойствах решения уравнения коагуляции // Труды ИЭМ, 1971. - Вып.23. - С.17-27
12. I.B. McLeod. On the scalar transport equation // Proc. London Math. Soc., 1964. - 14. - P.445-458.
13. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. - М.: Наука, 1975.
14. Хартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. - М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию 15.02.99.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ВЛАСОВСКОГО ТИПА С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЯЭУ

М.Г. Ткаченко, В.А. Галкин

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Рассматриваются проблемы, появляющиеся при численном решении уравнения Власова-Лиувилля в процессе моделирования массопереноса в ЯЭУ при наличии встречных потоков вещества (лазерный термоядерный синтез). Обсуждаются особенности применения разностных методов, приведены точные решения.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет ЯЭУ, основанный на применении лазерного термоядерного синтеза, связан с численным решением уравнения неразрывности (Власова-Лиувилля), содержащего разрывное поле скоростей переносимого в сталкивающихся потоках вещества. В процессе столкновения вещество приобретает значительные температуры (порядка $2 \cdot 10^7 \text{K}^0$), обеспечивающие возможность выхода нейтронов.

Простейшей моделью для такого процесса служит следующая задача Коши

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho(x, t)v(x)]}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\rho(x, t)|_{t=0} = \rho^0(x) = \begin{cases} 1, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$v(x) = -\operatorname{sgn} x, \quad (3)$$

в которой возникают принципиально новые классы решений (функциональные решения [4]) не являющиеся классическими и даже обобщенными решениями:

$$\rho(x, t) = \begin{cases} 1, & x \neq 0 \\ 2t\delta_0, & x = 0 \end{cases}$$

где $\rho(x, t)$ - плотность вещества, $v(x)$ - скорость вещества, δ_0 - дельта-функция Дирака. Причина такого явления - разрыв поля скоростей v в точке $x=0$.

Таким образом, актуальной является проблема численного моделирования для уравнения Лиувилля типа (1) при наличии разрывных коэффициентов, так как разностные схемы в этом случае не являются аппроксимирующими.

Аналогичная проблема связана с общим классом задач для уравнения Власова теории плазмы, в котором имеется разрывной потенциал (кулоновского типа).

© М.Г. Ткаченко, В.А. Галкин, 1999

Настоящая работа посвящена исследованию численных методов и их обоснованию для уравнений vlasовского типа, содержащих разрывные коэффициенты.

ПРОБЛЕМЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Кинетические уравнения для плазмы – это замкнутая система уравнений для одночастичных функций распределения частиц плазмы по координатам x и скоростям v совместно с уравнениями Максвелла для средних напряженностей электромагнитных полей, создаваемых частицами плазмы. Кинетический подход к описанию состояния плазмы часто играет важную роль в описании макроскопических свойств плазмы.

Наиболее простыми являются кинетические уравнения для полностью ионизированной электронно-ионной плазмы – уравнения для функций распределения $p(x, v, t)$ заряженных частиц и напряженностей электрического $E(x, t)$ и магнитного $M(x, t)$ полей. Точное уравнение для функции $p(x, v, t)$ имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \operatorname{grad}_x p + e \left(E + \frac{1}{c} [vB] \right) \operatorname{grad}_v p = I(x, v, t), \quad (4)$$

где $I(x, v, t)$ – интеграл столкновений.

Кинетические уравнения для плазмы существенно упрощаются в двух предельных случаях. В случае, когда длина свободного пробега и время свободного пробега малы по сравнению с характерными соответствующими параметрами задачи, то возможен переход от кинетических уравнений для плазмы к соответствующим газодинамическим уравнениям, учитывающим столкновения, например, к уравнению Больцмана. В случае, когда длина свободного пробега и время свободного пробега велики по сравнению с характерными соответствующими параметрами задачи, то столкновениями частиц можно пренебречь, учитывая только коллективное взаимодействие частиц через самосогласованные поля. Это бесстолкновительное приближение приводит к уравнению Власова – уравнению, в котором интеграл столкновения $I(x, v, t) = 0$.

Задачу Коши для уравнения Власова изучали Маслов [1], Браун, Хепп [2]. Были построены решения уравнения Власова для классических механических частиц, взаимодействующих посредством двухчастичного дифференцируемого потенциала, доказаны локальная теорема существования (Хепп) и единственности решения (Добрушин) для частиц, описанных выше. В [3] утверждается, что если $U \in C^2(R^3)$ и начальная функция $p^0(x, v)$ непрерывно дифференцируемая, то существует функция $p(x, v, t)$, удовлетворяющая уравнению Власова.

Рассмотрим задачу Коши для уравнения Власова без магнитного поля

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{grad}_x v p + \operatorname{grad}_v E p = 0 \\ p|_{t=0} = p^0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E = \operatorname{grad} U \\ \Delta U = -4\pi \rho e \\ U|_{\partial\Gamma} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где $\rho = \int_{R_3} p(x, v, t) dv$ - плотность заряда, U - парный потенциал взаимодействия.

Трудность построения глобального решения заключалась в том, что для реального взаимодействия частиц уравнение Власова содержит разрывные коэффициенты, например, кулоновский потенциал. Действительно, решением краевой задачи для уравнения Пуассона (6) является функция $U = \int_{R_3} G(x, y) \int_{R_3} p(y, v, t) dv dy$,

где $G(x, y) = \frac{1}{4\pi \|x - y\|}$ - функция Грина, $\|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (x_i - y_i)^2}$.

Уравнение Власова представляет собой некоторую модификацию уравнения Лиувилля для функции распределения частиц в фазовом пространстве - основного уравнения статистической физики

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}[vp] = 0.$$

Доказательство единственности локального решения уравнения Власова в [3] строится через доказательство того, что если функция v в уравнении характеристик

для уравнения Лиувилля $\frac{dx(t)}{dt} = v(t, x(t))$ имеет непрерывные вторые производные по x и начальная функция $p^0(x, v)$ непрерывно дифференцируемая, то существует функция $p(x, v, t)$, удовлетворяющая уравнению Лиувилля.

В случае, когда функция v разрывная, уравнение характеристик для уравнения Лиувилля представляет собой дифференциальное уравнение с разрывной правой частью.

В работе [6] дается определение решения дифференциальных уравнений с разрывной правой частью и изучаются свойства таких решений. В тех случаях, когда решение попав при некотором t_c на линию (поверхность разрыва) правой части дифференциального уравнения, уже не может с нее сойти, возникает вопрос о продолжении решения при $t > t_c$. Из определения решения, сформулированного в [6], вытекает, что такое решение вполне определенным образом продолжается вдоль линии (поверхности) разрыва. Этот способ продолжения допускает простое истолкование. Оказывается, что решение в смысле А.Ф.Филиппова, уравнения с разрывной правой частью можно рассматривать как хорошее приближение к решению уравнения с непрерывной правой частью, если правая часть сильно меняется в некоторой очень узкой полосе и сравнительно слабо меняется вне этой полосы.

В [4] приводится простой пример задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с разрывной правой частью

$$\frac{du}{dt} = f(u), \quad t > 0, \quad u(0) = u_0,$$

$$f(u) = \begin{cases} -1, & u \geq 0 \\ +1, & u < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Для решения этой задачи строится приближенный метод, основанный на решении разностной схемы Эйлера и определяемый посредством соотношений

$$\frac{u_h(t+h) - u_h(t)}{h} = f(u_h(t)), \quad t \geq 0,$$

$$u_h(t) = u_0, \quad 0 \leq t < h, \quad h > 0.$$

Несложно установить, что функция $u(t)=0$ является решением этого уравнения в смысле А.Ф.Филиппова [5] при начальном условии $u(0)=0$, но не относится к классическим и обобщенным решениям. Решение задачи Коши (7) в классическом смысле существует лишь до момента его попадания на точку разрыва функции f . Разностный метод Эйлера равномерно сходится к решению А.Ф.Филиппова по всей полуоси $t \geq 0$ при $h \rightarrow 0$, а, следовательно, является регулярным функциональным решением. Этот пример служит отражением глубокой связи решений А.Ф.Филиппова для обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями и регулярных функциональных решений.

Идеи, заложенные в [3], позволили построить в работе [5] приближенный метод решения задачи Коши для уравнения Власова, основанный на регуляризации кулоновского потенциала взаимодействия, а применение теории функциональных решений [4] дало возможность обосновать сходимость приближенного метода к глобальному функциональному решению задачи.

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ЛИУВИЛЛЯ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Рассмотрим одномерную задачу Коши для уравнения Лиувилля

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial [p(x,t)v(x)]}{\partial x} = 0, \\ p(x,t)|_{t=0} = p^0(x) \end{cases} \quad (8)$$

где $p(x,t)$ - функция распределения частиц, $v(x) = \begin{cases} v^-, & x < 0 \\ v^+, & x \geq 0 \end{cases}$ - разрывная

функция, где v^- , v^+ константы.

Рассмотрим три характерных случая для функции $v(x)$: $v^- > v^+ > 0$, $v^+ < 0 < v^-$, $v^- < 0 < v^+$ и некоторые частные случаи. Остальные возможные случаи аналогичны перечисленным.

Во всех случаях для построения решения используется метод регуляризации, основанный на сглаживании разрывной функции, методом характеристик строится решение задачи Коши для сглаженной задачи, а затем делается предельный переход.

1. $v^- > v^+ > 0$. Запишем $v(x) = \frac{v^- + v^+}{2} - \frac{v^- - v^+}{2} \operatorname{sgn} x$ и сгладим ее на интервале $|x| \leq \delta$, используя сглаживание Стеклова

$$v_\delta(x) = \frac{1}{2\delta} \int_{x-\delta}^{x+\delta} \left(\frac{v^- + v^+}{2} - \frac{v^- - v^+}{2} \operatorname{sgn} \xi \right) d\xi = \frac{v^- + v^+}{2} - \frac{v^- - v^+}{2\delta} x.$$

Тогда сглаженная задача примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_{\delta}(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial [p_{\delta}(x, t)v_{\delta}(x)]}{\partial x} = 0, \\ p_{\delta}(x, t)|_{t=0} = p^0_{\delta}(x) \end{cases} \quad (9)$$

$$v_{\delta}(x) = \begin{cases} \frac{v^{-} + v^{+}}{2} - \frac{v^{-} - v^{+}}{2\delta} x, & |x| \leq \delta \\ \frac{v^{-} + v^{+}}{2} - \frac{v^{-} - v^{+}}{2} \operatorname{sgn} x, & |x| > \delta. \end{cases} \quad (10)$$

Для применения метода характеристик перепишем уравнение

$$\frac{\partial p_{\delta}(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial [p_{\delta}(x, t)v_{\delta}(x)]}{\partial x} = 0$$

в виде:

$$\frac{\partial p_{\delta}(x, t)}{\partial t} + v_{\delta}(x) \frac{\partial p_{\delta}(x, t)}{\partial x} = -p_{\delta}(x, t) \frac{\partial v_{\delta}(x)}{\partial x}.$$

Тогда имеем:

$$\begin{cases} \frac{dx_{\delta}}{dt} = v_{\delta} \\ x_{\delta}(0) = \xi \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{dp_{\delta}}{dt} = -v'_{\delta} p_{\delta} \\ p^0_{\delta}(x) = p(\xi). \end{cases}$$

Уравнения характеристик для задачи (9) имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v^{-}, & x < -\delta \\ \frac{dx}{dt} = \frac{v^{-} + v^{+}}{2} - \frac{v^{-} - v^{+}}{2\delta} x, & |x| \leq \delta \\ \frac{dx}{dt} = v^{+}, & x > \delta. \end{cases} \quad (11)$$

Их решения:

$$x(t) = x(0) + v^{-}t, \quad x < -\delta, \quad t < t_{-\delta},$$

$$x(t) = \frac{v^{-} + v^{+}}{v^{-} - v^{+}} - \frac{2v^{-}\delta}{v^{-} - v^{+}} \exp\left(-\frac{v^{-} - v^{+}}{2\delta}(t - t_{-\delta})\right), \quad |x| < \delta, \quad t_{-\delta} \leq t \leq t_{\delta},$$

$$x(t) = x(t_{\delta}) + v^{+}t, \quad x > \delta, \quad t > t_{\delta}.$$

Вдоль характеристик имеем:

$$\frac{dp_{\delta}(x(t), t)}{dt} + p_{\delta}(x, t) \frac{\partial v_{\delta}(x)}{\partial x} = 0.$$

Решив уравнения (11) на соответствующих интервалах, получим решение на характеристиках:

$$p_{\delta}(x(t), t) = \begin{cases} p_{\delta}^0(x(0)), & x < -\delta, \quad t < t_{-\delta} \\ p_{\delta}(x(t_{-\delta}), t_{-\delta}) \exp\left(\frac{v^{-} - v^{+}}{2\delta}(t - t_{-\delta})\right), & |x| \leq \delta, \quad t_{-\delta} \leq t \leq t_{\delta} \\ p_{\delta}(x(t_{\delta}), t_{\delta}), & x > \delta, \quad t > t_{\delta}. \end{cases}$$

Для того, чтобы получить решение в произвольной точке, надо избавиться от моментов выхода на границу $x = \pm\delta$ t_{δ} и $t_{-\delta}$, соответственно, и начальных данных $x(0)$. Для этого в каждой области из произвольной точки (x, t) выпускаем назад характеристику и пересчитываем начальные данные через координаты этой произвольной точки.

Таким образом, решение сглаженной задачи (9) имеет вид:

$$p_{\delta}(x, t) = \begin{cases} p_{\delta}^0(x - v^{-}t), & x < -\delta \\ p_{\delta}^0\left(-\delta - v^{-}t + \frac{2v^{-}\delta}{v^{-} - v^{+}} \ln\left|\frac{2v^{-}\delta}{(v^{-} + v^{+})\delta - (v^{-} - v^{+})x}\right|\right) \times \\ \times \left|\frac{2v^{-}\delta}{(v^{-} + v^{+})\delta - (v^{-} - v^{+})x}\right|, & |x| \leq \delta \\ p_{\delta}^0\left(-\delta - v^{-}t + \frac{v^{-}}{v^{+}}(x - \delta) + \frac{2v^{-}\delta}{v^{-} - v^{+}} \ln\left|\frac{v^{-}}{v^{+}}\right|\right) \left|\frac{v^{-}}{v^{+}}\right|, & x > \delta. \end{cases} \quad (12)$$

Сделаем предельный переход при $\delta \rightarrow 0$. Умножим $p_{\delta}(x, t)$ на финитную функцию $\varphi(x, t)$ и проинтегрируем по x от $-\infty$ до ∞ и по t от 0 до ∞ .

$$I(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \varphi(x, t) p_{\delta}(x, t) dx dt = I_1 + I_2 + I_3 + I_4.$$

Сумма в правой части этого равенства состоит из интегралов по областям, связанным с начальными условиями для характеристик. Например, интеграл I_1 относится к частицам, начальные данные для которых находятся в области $x < -\delta$.

$$I_1 = \int_{0-\infty}^{\infty-\delta} \int_0^{\infty} \varphi(x, t) p_{\delta}(x, t) dx dt = \int_{0-\infty}^{\infty-\delta} \int_0^{\infty} \varphi(x, t) p_{\delta}^0(x - v^{-}t) dx dt \rightarrow \int_{0-\infty}^{\infty} \int_0^0 \varphi(x, t) p^0(x - v^{-}t) dx dt, \\ \delta \rightarrow 0.$$

I_2 - интеграл по области $|x| \leq \delta$ разбивается на два интеграла: I_2^1 и I_2^2 - по частицам, чьи начальные условия лежат в области $x < -\delta$ и $|x| \leq \delta$ соответственно. Разделяющая эти группы частиц характеристика имеет вид:

$$\bar{x}(t) = \frac{v^- + v^+}{v^- - v^+} \delta - \frac{2v^- \delta}{v^- - v^+} \exp\left(-\frac{v^- - v^+}{2\delta} t\right).$$

Надо показать, что $I_2^1 \rightarrow 0$ и $I_2^2 \rightarrow 0$ при $\delta \rightarrow 0$.

I_3 интеграл по области $x > \delta$ представляется в виде суммы трех интегралов: I_3^1 , I_3^2 и I_3^3 в зависимости от области нахождения начальных данных частиц $x < -\delta$, $|x| \leq \delta$ и $x > \delta$. Разделяющие эти три группы частиц характеристики имеют вид:

$$\bar{x}(t) = \delta + v^+(t - t_\delta) \quad \text{и} \quad \bar{x}(t) = \delta + v^+ t.$$

Надо показать, что

$$I_3^1 \rightarrow \frac{v^-}{v^+} \int_0^\infty \int_0^{v^+ t} \varphi(x, t) p^0\left(v^- \left(\frac{x}{v^+} - t\right)\right) dx dt, \quad I_3^2 \rightarrow 0, \quad I_3^3 \rightarrow \int_0^\infty \int_{v^+ t}^\infty \varphi(x, t) p^0(x - v^+ t) dx dt,$$

при $\delta \rightarrow 0$. В итоге получаем

$$I(\varphi) \rightarrow \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \varphi(x, t) \psi(x, t) dx dt, \quad (13)$$

$$\text{где } \psi(x, t) = p^0(x - v^- t) H(-x) + \frac{v^-}{v^+} p^0\left(v^- \left(\frac{x}{v^+} - t\right)\right) H(x) H(v^+ t - x) + p^0(x - v^+ t) H(x),$$

H - функция Хевисайда. Функция $\psi(x, t)$ является обобщенным решением задачи (8) в смысле Соболева для $v^- > v^+ > 0$.

Частный случай $v^+ = 0$. Для построения решения функция $v(x)$ регуляризируется в два этапа:

$$1) \bar{v}_\delta(x) = \begin{cases} v^-, & x < 0, \\ \delta, & x \geq 0 \end{cases} \quad \delta > 0;$$

$$2) v_\delta(x) = \begin{cases} \frac{v^- + \delta}{2} - \frac{v^- - \delta}{2\delta} x, & |x| \leq \delta \\ \frac{v^- + \delta}{2} - \frac{v^- - \delta}{2} \operatorname{sgn} x, & |x| > \delta \end{cases}.$$

В такой формулировке задача переходит в предыдущий случай, и аналогичные рассуждения приводят к решению задачи (8)

$$p_\delta(x, t) \rightarrow \left[p^0(x - v^- t) H(-x) + p^0(x) H(x) \right] + v^- \delta(0) \int_0^t p^0(v^-(z - t)) dz, \quad (14)$$

слабо при $\delta \rightarrow 0$.

Здесь $\delta(0)$ - обобщенная функция Дирака. Полученное решение относится к классу функциональных решений.

В частном случае $v^- = 0$ решением задачи (8) будет обобщенная функция в смысле Соболева

$$p_\delta(x, t) = p^0(x)H(-x) + p^0(x - v^+ t)H(x - v^+ t). \quad (15)$$

В случае $0 < v^- < v^+$ легко проверяется, что решение задачи (8) задается формулой (13).

Случаи 2 и 3, описываемые ниже, являются наиболее интересными.

2. $v^- < 0 < v^+$. Сглаженная функция $v(x)$ задается выражением (10) и сглаженная задача в общем виде имеет вид (9). Решением уравнений характеристик (11) для (9) являются функции

$$x^\mu(t) = x^\mu(0) + v^\mu t, \quad |x| > \delta, \quad t < t_{\mu\delta},$$

$$x^\mu(t) = \frac{v^- + v^+}{v^- - v^+} \delta - \frac{2v^- \delta}{v^- - v^+} \exp\left(-\frac{v^- - v^+}{2\delta}(t - t_{\mu\delta})\right), \quad |x| \leq \delta, \quad t \geq t_{\mu\delta}$$

В данном случае имеем поле “стягивающихся” к прямой $x = \frac{v^- + v^+}{v^- - v^+} \delta$ характеристик. Решение задачи (9) на характеристиках выглядит следующим образом

$$p_\delta(x(t), t) = \begin{cases} p_\delta^0(x^\mu(0)), & |x| > \delta, \quad t < t_{\mu\delta}, \\ p_\delta(x(t_{\mu\delta}), t_{\mu\delta}) \exp\left(\frac{v^- - v^+}{2\delta}(t - t_{\mu\delta})\right), & |x| \leq \delta, \quad t \geq t_{\mu\delta} \end{cases}$$

Решением задачи (9) в произвольной точке (x, t) будет функция

$$p_\delta(x, t) = \begin{cases} p_\delta^0(x - v^\mu t), & |x| > \delta, \\ p_\delta^0\left(-\delta - v^- t + \frac{2v^\mu \delta}{v^- - v^+} \ln \left| \frac{2v^\mu \delta}{(v^- + v^+) \delta - (v^- - v^+) x} \right| \right), & |x| \leq \delta. \end{cases}$$

Предельный переход при $\delta \rightarrow 0$ показывает, что

$$p_\delta(x, t) \rightarrow \left[p^0(x - v^- t)H(-x) + p^0(x - v^+ t)H(x) \right] + \delta(0) \int_0^t \left\{ v^- p^0(v^-(z - t)) - v^+ p^0(v^+(z - t)) \right\} dz \quad (16)$$

слабо. $\delta(0)$ - обобщенная функция Дирака. Предельная функция в (16) является функциональным решением задачи (8) в случае $v^- < 0 < v^+$.

3. $v^+ < 0 < v^-$. Сглаженная функция $v(x)$ задается выражением (10) и сглаженная задача в общем виде имеет вид (9). Решением уравнений характеристик (11) для (9) являются функции

$$x^\mu(t) = x^\mu(0) + v^\mu(t - t_{\mu\delta}), \quad |x| > \delta, \quad t > t_{\mu\delta},$$

$$x^\mu(t) = \frac{v^- + v^+}{v^- - v^+} \delta - \left(x^\mu(0) - \frac{(v^- + v^+) \delta}{v^- - v^+} \right) \exp \left(- \frac{v^- - v^+}{2\delta} (t - t_{\mu\delta}) \right), \quad |x| \leq \delta, \quad t \leq t_{\mu\delta}.$$

В данном случае имеем поле “разбегающихся” характеристик. Решение задачи (9) на характеристиках выглядит следующим образом:

$$p_\delta(x(t), t) = \begin{cases} p_\delta(x^\mu(t_{\mu\delta}), t_{\mu\delta}), & |x| > \delta \\ p_\delta^0(x^\mu(0)) \exp \left(\frac{v^- - v^+}{2\delta} t \right), & |x| \leq \delta \end{cases}.$$

Решение задачи (9) в произвольной точке (x, t) :

$$p_\delta(x(t), t) = \begin{cases} p_\delta^0(x - v^\mu t), & |x^\mu(0)| > \delta, \\ p_\delta^0(x^\mu(0)) \exp \left(\frac{v^- - v^+}{2\delta} t \right), & |x^\mu(0)| \leq \delta, \quad t < t_{\mu\delta} \\ p_\delta^0(x^\mu(0)) \ln \left| \frac{(v^- + v^+) \delta - (v^- - v^+) x^\mu(0)}{2v^\mu \delta} \right|, & |x^\mu(0)| \leq \delta, \quad t \geq t_{\mu\delta} \end{cases}$$

Выполнив предельный переход при $\delta \rightarrow 0$, получим

$$p_\delta(x, t) \rightarrow p^0(x - v^- t) H(v^- t - x) + p^0(x - v^+ t) H(x - v^+ t) \quad (17)$$

слабо к решению задачи (8) в случае $v^+ < 0 < v^-$. Полученное решение относится к классу функциональных решений и не является классическим и даже обобщенным в смысле Соболева.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ЛИУВИЛЛЯ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Построенные решения являлись тестом для проверки вычислительного метода, основанного на явной разностной схеме:

$$\frac{p(x, t + \tau) - p(x, t)}{\tau} + \operatorname{sgn} v \frac{[v(x)p(x, t) - v(x - h \operatorname{sgn} v)p(x - h \operatorname{sgn} v, t)]}{h} = 0,$$

$$\tau > 0, \quad h > 0$$

$$p(x, 0) = p^0(x)$$

Важным выводом вычислительного эксперимента является стабилизация численных решений при измельчении шагов сетки к построенным неклассическим решениям, полученных регуляризацией задачи (сглаживание по Стеклову).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов В.П. Уравнения самосогласованного поля // Кн. Современные проблемы математики. - М.: ВИНТИ. - 1978. - Т. 11. - С. 153-234.
2. Braun W., Hepp K. The Vlasov Dynamics and its Fluctuations in the $1/N$ Limit of Interacting Classical Particles, Comm. Math. Phys. 56, № 2 (1977), 101-113.
3. Добрушин Р.Л. Уравнения Власова // Функциональный анализ. - 1979. - Т.3. - Вып. 2. - С. 48-58.

4. Галкин В.А. Методы решения задач физической кинетики. - Обнинск: ИАТЭ, 1995. - 171 с.
5. Ткаченко М.Г., Галкин В.А. Регуляризация уравнений власовского типа и обоснование предельного перехода по сглаживанию Р.Л.Добрушина, Теория и приложения методов малого параметра. Тезисы докладов. - Обнинск: ИАТЭ, 1996. - 79 с.
6. Филиппов А.Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения с разрывными правыми частями // Математический сборник. - 1960. - Т.51. - № 4. - С. 101-128.

Поступила в редакцию 15.02.99.

ЯДЕРНЫЕ ВЕСТИ ИЗ ПАУТИНЫ

Сообщения агентства NucNet (январь-февраль 1999г.)

(<http://www.aey.ch/nucnet>)

Быть или не быть: версии Франции и Германии

- В Германии красно-зеленое правительство продолжает наступление на ядерную отрасль. Министр экологии Юрген Триттин объявил в канун рождества о роспуске национальных комиссий по безопасности реакторов и по радиационной защите. В дальнейшем эти комиссии должны быть воссозданы в новом составе. Г-н Триттин нашел старый состав "недостаточно антиядерным". В то же время сторонники ядерной энергетики считают, что закрытие всех АЭС страны приведет к потере 55 млрд. долл. и 150 тыс. рабочих мест.
- Премьер-министр Франции Лионел Жоспен в очередной раз публично высказал свою поддержку ядерной энергетике.
- Правительство Германии наносит новый удар по ядерной энергетике и по своим соседям. Разорван франко-британо-германский контракт на переработку выгоревшего ядерного топлива. Германия отказывается выплачивать компенсацию французской компании "Кожема" и британской BNFL, ссылаясь на форс-мажорные обстоятельства. Пострадавшие соседи устами французского премьер-министра Жоспена заявляют, что если результаты парламентских выборов можно будет рассматривать как форс-мажорные обстоятельства, то страны Европы будут испытывать в будущем серьезные трудности в дипломатических отношениях.
- Тем не менее, пока немецкие АЭС продолжают работать, хотя выработка электроэнергии на них снижается по политическим причинам.

Швеция и Швейцария: в дело вступают юристы и политики

- В Швеции Верховный суд отложил на несколько месяцев слушание дела по опротестованию решения правительства страны о закрытии первого блока АЭС "Барсебек". Юристы заявляют, что дело является одним из сложнейших в их практике.
- Правительство Швейцарии в официальном заявлении еще раз подтвердило, что не имеет планов по закрытию национальных АЭС, невзирая на многочисленные требования экологов. Заявление было сделано в ответ на парламентский запрос.

Все вверх и немного вниз

- Министерство энергетики США (DoE) подтвердило, что США продолжит наработку трития для военных нужд на двух энергетических реакторах.
- АЭС Испании поставили новый рекорд. В 1998 г. доля электроэнергии, произведенной на АЭС, составила в этой стране 37,1%.
- Индийский ядерный парк (10 АЭС) в 1998 г. увеличил производство электроэнергии. Его доля в производстве энергии в стране составляет 2%.
- После рестарта АЭС "Моховце-1" укрепился ядерный парк Словакии, достигнув уровня Индии (11,4 млрд. кВт·ч).
- Рекорд побит и в Финляндии: почти 21 млрд. кВт·ч.
- В России за 1998 г. АЭС произвели 103,5 млрд. кВт·ч электроэнергии. Это на 4,4% меньше, чем в 1997 г.

Новости от Курчатовского центра
(<http://www.kiae.ru/rus/nti/novosti.htm>)

Декабрь 1998 г.

- Правительство РФ постановлением № 1417 от 1 декабря 1998 г. утвердило Федеральную целевую научно-техническую программу "Международный термоядерный реактор ИТЭР и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в его поддержку на 1998—2001 гг.". Постановление принято с целью выполнения обязательств РФ по Соглашению между Европейским сообществом по атомной энергии, правительством РФ, правительством США и правительством Японии о сотрудничестве в разработке технического проекта Международного термоядерного реактора от 21 июля 1992 г. и поправке к нему от 22 сентября 1998 г.
- Китай выходит на рынки Африки. Сообщение о соглашении на строительство китайцами исследовательского реактора в Марокко.

Рекомендация номера

<http://www.ympr.gov/> - узел проекта «Yucca Mountain». Рекомендуем посетить этот уголок Интернета, хотя для того, чтобы посмотреть на то, как профессионально можно делать подобные узоры!

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРОВОГО ПОТОКА*

В.Т. Буглаев, А.С. Стребков

Брянский институт транспортного машиностроения, г. Брянск



Анализируются результаты моделирования процесса испарительного охлаждения парового потока диспергированной жидкостью в зависимости от начальных режимных параметров парокапельной смеси. Получены оценки протяженности участка испарения охладителя и глубины охлаждения пара при различных давлениях двухфазного потока. Приведены данные по динамике испаряющихся капель на примере одной из фракций полидисперсного распыла охладителя.

Изучение рабочего процесса испарительных устройств смесительного типа остается актуальной научной и инженерной задачей. Наряду с экспериментальными исследованиями в этой области представляет интерес численное моделирование процесса испарения ансамбля капель диспергированного охладителя в несущем потоке высокотемпературного пара или газа. При этом оказывается возможным избежать ряда методических и организационных проблем при проведении исследований, регистрации и интерпретации его результатов и, в частности, зависимости дисперсной структуры распыла от режима движения двухфазной смеси. Расчет позволяет отдельно отследить влияние таких важных режимных характеристик как температура, давление и скорость несущего потока, а также размеры капель и фракционный состав жидкого охладителя. Решение задачи испарения отдельной капли с учетом ее разгона (торможения) в несущем потоке требует совместного интегрирования уравнений теплового баланса и сопротивления [1]:

$$d\delta = -2Nu \frac{\lambda_r}{r_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \delta} (T_r - T_{\text{ж}}) d\tau, \quad (1)$$

$$dw = \frac{3}{4} k_c \frac{\rho_r}{\rho_{\text{ж}}} \frac{w^2}{\delta} d\tau, \quad (2)$$

© В.Т.Буглаев, А.С.Пучков, 1999

* - Статья подготовлена в рамках исследований, выполняемых по грантам "Моделирование рабочего процесса испарительного охлаждения газовых потоков в каналах тепловых энергоустановок" и "Моделирование процесса массопереноса при испарительном охлаждении газовых потоков в каналах энергоустановок" (Конкурсы грантов 1995-1997гг. по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники").

где T_r , $T_{ж}$ и ρ_r , $\rho_{ж}$ - температура и плотность газа и капли, δ и w - диаметр и относительная скорость частицы, r - удельная теплота парообразования.

В [1] показано, что для расчета коэффициентов теплоотдачи и сопротивления испаряющейся капли традиционные зависимости

$$Nu = H_1 Nu^0, \quad Nu^0 = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}, \quad (3)$$

$$k_c = H_2 \psi(We) k_c^0, \quad k_c^0 = \frac{24}{Re} + \frac{4,4}{Re^{0,5}} + 0,32 \quad (4)$$

должны дополняться поправочными коэффициентами, учитывающими наличие поперечного оттока паров от поверхности и деформацию частиц

$$H_1 = \frac{\ln(1+B)}{B}, \quad B = \frac{c_{pr}(T_r - T_{ж})}{r_{ж}}, \quad (5)$$

$$H_2 = 1 - \frac{0,25 C_0}{1 + 0,01 Re + 0,2 C_0 Re^{-1}}, \quad C_0 = \frac{\lambda_r}{c_{pr} \rho_r v_r} \ln(1+B). \quad (6)$$

Величины этих поправок зависят от теплофизического состояния фаз, а также от текущих значений чисел Рейнольдса Re , Вебера We . Причем для относительно мелких капель (порядка 100 мкм) и низкоскоростных режимов движения (до 100 м/с) влиянием поперечного оттока паров ($H_2=1$) и деформации частиц ($\psi(We)=1$) на сопротивление обычно пренебрегают [2].

В [2] было найдено решение задачи испарения одной капли в потоке газа в форме зависимости между размером частицы, ее относительной скоростью и временем испарения от текущего значения числа Рейнольдса капли. Количественные расчеты, приводимые авторами [2], относятся к режимам испарения частиц в среде высокотемпературных (от 1000 до 3000 К) продуктов сгорания воздуха. Процесс испарения капель в этом температурном диапазоне отличается исключительно высокой интенсивностью вследствие высоких начальных температурных напоров, что позволяет не учитывать массоперенос на стадии прогрева капель и принять за температуру поверхности капли, равной температуре насыщения при давлении несущего газа. При значительном понижении температуры охлаждаемой фазы такой подход можно сохранить только для однокомпонентных систем "пар-жидкость".

Особенностью обсуждаемых результатов было рассмотрение совместного испарения в охлаждаемом потоке пара полидисперсного распыла капель. Детальное описание математической модели испарения полидисперсных капельных распылов, базирующейся на зависимостях (1 - 6), приведено в [3, 4]. Начальная дисперсная структура распыла моделировалась набором фракций капель фиксированного размера. Расчет количества частиц во фракциях выполнялся по зависимости Розина-Рамлера

$$\bar{G} = \frac{G_i^\Sigma}{G_N^\Sigma} = 1 - \exp \left[1 - \left(\frac{\delta_i}{\delta_m} \right)^{\bar{n}_0 \sqrt{\ln(2)}} \right], \quad (7)$$

представляющей отношение суммарного расхода охладителя, приходящегося на долю всех капель с размерами не более, чем у текущей фракции δ_i к общему расходу диспергированного охладителя. Зависимость (7) хорошо отражает дисперсные свойства распылов, генерируемых струйными и центробежными форсунками, которые широко используются в промышленных испарительных системах (например, редукционно-охлаждающих установках паротурбинных блоков и котельных, а также в системах кондиционирования воздуха).

В качестве осредненного размера частиц распыла принимался медианный диаметр $\delta_m=100$ мкм, начальные размеры шести фракций составляли 10, 20, 40, 60, 80, 100, 125, 175, 250 мкм с учетом снижения вероятности появления наиболее крупных капель при формировании распыла. Минимальный и максимальный диаметры частиц оценивались с учетом степени полидисперсности распыла $\bar{n}_0$, выражающей соотношение между размерами капель, вероятность присутствия которых в распыле не превышает 0,3%

$$\bar{n}_0 = \frac{3,3333}{\lg(\delta_{\max}/\delta_{\min})}. \quad (8)$$

Для перехода от относительных дисперсных характеристик к оценке количества капель, приходящихся на каждую фракцию распыла, выдерживалась фиксированная степень впрыска охладителя $q = G_{\text{ж}}/G_{\text{п}}$, составлявшая в наших расчетах 1 % от расхода пара. Предполагалось, что пар движется в горизонтальной круглой трубе диаметром 100 мм и длиной до 20 м, что соответствует габаритам промышленных РОУ. Таким образом, при изменении режимных характеристик охлаждаемого пара изменялось лишь число капель в каждой фракции, что значительно упростило интерпретацию результатов моделирования и позволило выявить влияние скорости, температуры и давления несущего потока на эффективность его охлаждения.

На первом этапе расчетов производилась оценка динамики капель распыла в процессе испарения. На рис.1 показано снижение размеров капель одной из фракций (размером 100 мкм, что совпадает с начальным значением медианного диаметра распыла) по длине канала. Как видно из характера кривых на рис. 1, разгон частицы до скорости несущего потока происходит весьма быстро. Это проявляется в снижении темпа сокращения диаметра капель на начальном отрезке длиной от 1 до 3 м, что не превышает 10% от общей протяженности испарительного пути, поскольку по мере разгона частиц быстро падает теплоотдача. Начальная относительная скорость капли (определяемая скоростью движения пара в канале) практически не влияет на относительную протяженность (но не на время!) участка разгона, поскольку коэффициент сопротивления капли (4) зависит от режима движения частицы и обратно пропорционален числу Рейнольдса. Увеличение давления пара от 0,1 до 4,0 МПа характер разгона капли не меняет, поскольку ощутимый рост плотности пара, интенсифицирующий гидродинамическое воздействие на каплю, компенсируется замедлением темпов сокращения размеров частицы и сохранением ее инерционности, что, в конечном итоге, уравнивает протяженность разгонного участка. За его пределами время пребывания капли в канале зависит только от скорости несущего пара и, как показывают данные рис.1, определяет полноту степени испаренности частицы. Так, при давлении пара 0,1 МПа удвоение скорости от 25 до 50 м/с, а затем до 100 м/с практически адекватно увеличивает путь испарения. При давлении пара 4,0 МПа испарительный участок значительно превышает протяженность расчетного рабочего канала, однако соотношение длин отрезков, на которых капля достигает фиксированных размеров (например, 80 мкм) при различных начальных относительных скоростях сохраняется практически постоянным.

Эффективность охлаждения парового потока определяется степенью полноты испарения капель отдельных фракций. Диапазон участков испарения частиц различных фракций в ходе расчетов имел очень широкий разброс и составлял от 0,1 м для мелких капель (10 мкм) до 20 м для капель с начальными размерами от 80 до 175 мкм. Самые крупные частицы (размером 250 мкм) не успевали полностью испариться в пределах расчетного участка, однако при сокращении размеров, например, вдвое, теряли более 80 % от первоначальной массы. Вследствие того, что при сокращении размеров частицы до 5 мкм, масса капель отдельных фракций снижалась в 8-12500 раз, в наших расчетах испарение капли полагалось завершенным по достижении ею диаметра 5 мкм. Следует отметить, что наличие недоиспарившихся капель в канале, не оказывая ощутимого вли-

яния на тепловые показатели работы смесительных устройств, может вызывать серьезные затруднения при их эксплуатации ввиду эрозионной и коррозионной опасности. Поэтому при оценке габаритов рабочих каналов подобных устройств необходимо учитывать не только протяженность участка активного охлаждения несущего потока, но и наличие весьма ощутимого участка доиспарения наиболее крупных капель.

Обобщение расчетных данных по степени испаренности распыленного охладителя представлено на рис.2 в виде зависимости длины испарительного участка от давления охлаждаемого пара для фиксированных значений $\bar{G} = G_{\text{исп}}/G_{\text{ж}} = 0,4, 0,5, \dots, 0,9$. Из характера распределения кривых на рис.2 следует, что на отрезке, соответствующем участку разгона крупных капель, практически независимо от начального давления пара испаряется около 40% от общего количества распыленной влаги. По мере испарения капель мелких фракций (с начальными размерами менее величины медианного диаметра), зависимость степени испаренности распыла охладителя от давления проявляется все более отчетливо: при $\bar{G} = 0,6$ протяженность участка испарения возрастает от 2,5 до 6,0 м; при $\bar{G} = 0,7$ - от 4,0 до 9,0 м; при $\bar{G} = 0,8$ - от 6,0 до 14 м. При достижении степени испаренности $\bar{G} = 0,9$ доиспарение остаточного количества охладителя происходит на удалении более 10 м от входа в канал, и для давлений парового потока более 3,0 МПа значительно превышает отметку 20 м. Следует отметить то обстоятельство, что протяженность испарительного участка для различных значений $\bar{G}$ возрастает приблизительно одинаковыми темпами (6,0:2,5, 9,0:4,0, 14,0:6,0 $\approx 2,33$) и не зависит от давления охлаждаемого пара.

Интегральные показатели, отражающие изменение соотношения между размерами участка активного охлаждения пара и доиспарения отдельных крупных частиц показаны на рис.3а. Помимо давления пара, на это соотношение ощутимо влияет и скорость несущего потока. Как и следовало ожидать, снижение скорости пара благоприятствует более полному испарению капель. Так, 60-процентное испарение воды при давлении 0,1 МПа и скорости пара 25 м/с достигается на отрезке длиной 2,5 против 9 м при скорости 100 м/с. С ростом давления до 4,0 МПа эти значения составляют, соответственно, 6 и более 20 м. При скорости пара 25 м/с достигается почти полное испарение распыленного охладителя в пределах расчетной длины испарительного участка в 20 м, одна-

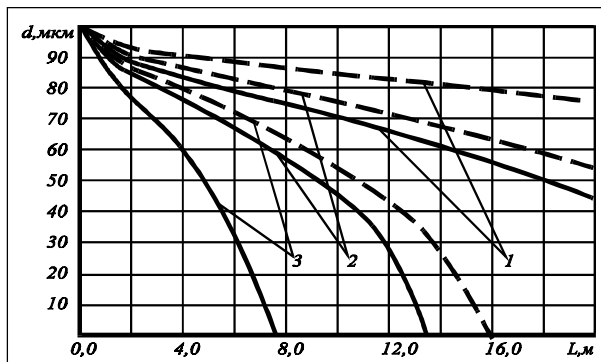


Рис. 1. Сокращение размеров капель фракции №6 в процессе испарения (начальная относительная скорость капли: 1 - 100 м/с; 2 - 50 м/с; 3 - 25 м/с; давление парового потока: — 0,1 МПа; ---- 4,0 МПа)

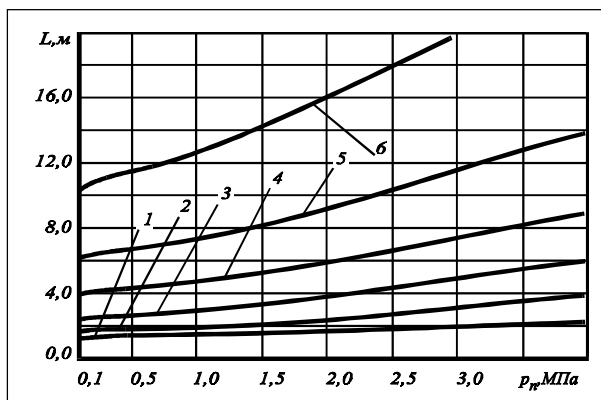


Рис.2. Влияние давления пара на интенсивность испарения диспергированной охлаждающей жидкости (степень полноты испарения охлаждающей жидкости-1 - 40 %; 2 - 50 %; 3 - 60 %; 4 - 70 %; 5 - 80 %; 6 - 90 %)

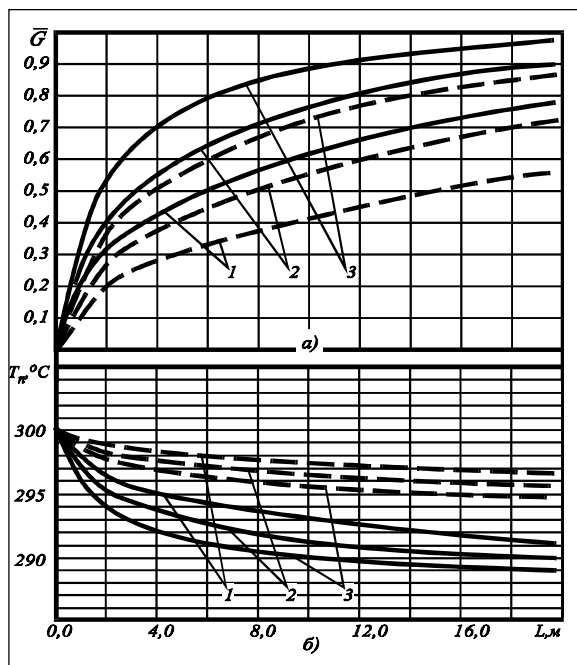


Рис.3. Влияние давления и скорости движения пара на процесс охлаждения парового потока:
а - испарение охлаждающей воды по длине испарительного участка;
б - снижение температуры пара по длине испарительного участка;
начальная скорость пара: 1 - 100 м/с; 2 - 50 м/с; 3 - 25 м/с;
давление парового потока: — 0,1 МПа; ---- 4,0 МПа

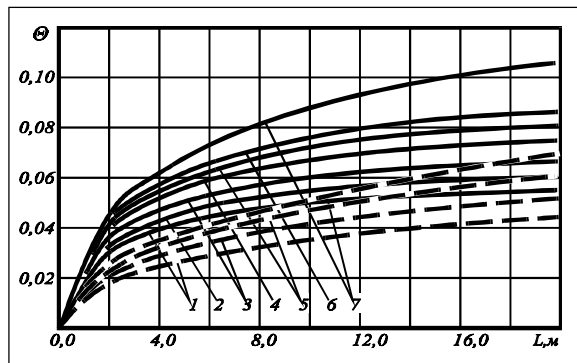


Рис.4. Относительная эффективность испарительного охлаждения при переменном давлении парового потока:
давление парового потока - 1 - 0,1 МПа; 2 - 0,1 МПа; 3 - 0,1 МПа; 1 - 0,1 МПа; 2 - 0,1 МПа; 3 - 0,1 МПа
начальная скорость пара - — 25 м/с; ---- 100 м/с.

Однако основной причиной, обуславливающей заметное снижение степени испаренности охлаждающей воды следует признать увеличение температуры насыщения охладителя. Это влечет при сохранении начальной температуры пара на уровне 300°C падение располагаемого температурного напора почти в 4 раза от 200 до 50°C. Это обстоятельство следует учитывать, оценивая эффективность испарительного охлаждения не только по ухудшению динамики дисперсных характеристик (рис.1) и увеличению протяженности соответствующих испарительных участков (рис.2, 3), но и по росту удельных тепловых потоков между паровой и жидкой фазами в расчете на один градус температурного напора. Соответствующие данные, представленные на рис.4, показывают,

ко при различных давлениях парового потока обеспечивается различная глубина охлаждения парового потока.

Данные по снижению температуры охлаждаемого пара при различных режимах движения двухфазной смеси представлены на рис.36. При начальной температуре парового потока 300 °C и давлении 0,1 МПа распыливание воды в количестве 1% от расхода пара обеспечивает его охлаждение на 8-12°C. Для давления 4,0 МПа конечная температура пара при одинаковой степени впрыска охладителя не опускается ниже 298- 295°C.

Снижение эффекта испарительного охлаждения при росте давления охлаждаемого потока объясняется изменением термодинамических свойств теплоносителей и, в первую очередь, ростом температуры насыщения. С одной стороны, наблюдается снижение удельной теплоты парообразования, с другой стороны, возрастает теплоемкость пара. Соответствующие количественные термодинамические, а также теплофизические характеристики пара и воды [5] приведены в табл.1. Несложные балансовые выкладки

$$\delta T = \frac{G_{\text{ж}} r_{\text{ж}}}{G_{\text{т}} c_{\text{рг}}} \quad (9)$$

показывают, что для достижения равной глубины охлаждения парового потока по мере роста давления в диапазоне 0,1- 4,0 МПа потребуются увеличение подачи охладителя почти на 80%.

Таблица 1

Влияние давления охлаждаемого пара на термодинамические и теплофизические свойства теплоносителей

Параметр теплоносителя	Размерность	Давление пара, МПа						
		0,1	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0
Температура пара	$^{\circ}\text{C}$	300						
Температура насыщения	$^{\circ}\text{C}$	99,63	127,43	151,85	179,88	198,28	212,37	250,33
Теплоемкость пара	кВт/кгК	2,010	2,030	2,070	2,141	2,220	2,321	2,834
Удельная теплота парообразования	кВт/кг	2258,2	2181,8	2108,4	2014,4	1945,4	1888,8	1711,9
Плотность пара	кг/м ³	0,379	0,542	1,914	3,876	5,889	7,968	16,992
Кинематическая вязкость пара	10 ⁵ м ² /с	5,331	3,725	1,054	0,519	0,341	0,251	0,117
Теплопроводность пара	Вт/мК	0,0433	0,0437	0,0442	0,0454	0,0466	0,0478	0,0525
Число Прандтля пара	-	0,938	0,939	0,943	0,948	0,957	0,972	1,069

что относительная глубина охлаждения пара $\Theta = (T'_n - T''_n) / (T'_n - T_{\text{Сж}})$ (где T'_n и T''_n - начальная и конечная температуры пара, $T_{\text{Сж}}$ - температура насыщения охлаждающей воды), по мере роста давления пара возрастает более чем в 1,5 раза.

Для распространения обсуждаемого метода расчета интенсивности испарительного охлаждения на газовые потоки необходимо учесть наличие массоотдачи от поверхности капли и изменение температуры поверхности частиц в процессе ее прогрева до температуры равновесного испарения. Решение этой задачи в сочетании с учетом влияния режимных параметров несущего потока на дисперсную структуру распыливаемого охладителя позволит, на взгляд авторов, достаточно широко использовать полученные результаты моделирования процесса испарительного охлаждения для повышения эффективности промышленных теплоэнергетических установок.

Список литературы

1. Физические основы рабочего процесса воздушно-реактивных двигателей / Под ред. Б.В. Раушенбаха. - М.: Машиностроение, 1964. - 564с.
2. Ламден Д.И., Мостинский И.Л. Об испарении капли, тормозящейся в среде горячего газа // Теплофизика высоких температур. - 1975. - №6. - С.1305-1308.
3. Стребков А.С., Буглаев В.Т. Моделирование процесса испарения полидисперсных распылов // Физические процессы и явления, происходящие в теплоэнергетических установках. - Брянск: Изд-во БГТУ, 1997. - С.4-12.
4. Буглаев В.Т., Стребков А.С. Результаты моделирования теплоотдачи при испарительном охлаждении газового потока капельной влагой: Труды II Российской нац. конф. по теплообмену. - М.: МЭИ, 1998. - Т. 4. - С. 268 - 271.
5. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. - М.: Энергия, 1975. - 80 с.

Поступила в редакцию 6.01.99.

ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛОСКОГО СЛОЯ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСТОЧНИКАМИ ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Ю.В.Липовцев

Обнинский институт атомной энергетики, г.Обнинск

Р

Рассмотрена краевая задача о распределении интенсивности переноса тепла излучением в плоском слое оптически полупрозрачного материала, обладающего свойствами объемного излучения, при таких предпосылках, которые позволили получить аналитическое решение для объемной плотности выходящего излучения. Предполагается, что интенсивность объемного тепловыделения во всех точках одинаковая, одинаковы условия теплообмена на границах плоского слоя, а его оптическая толщина такова, что условия симметрии решения относительно срединной плоскости можно заменить условиями на бесконечности при удалении от границы, рассеяние предполагается изотропным (индикатриса рассеяния равна единице). Полученные результаты представляют практический интерес как тестовый вариант, например, при апробации методов и алгоритмов численного решения данного класса задач для более общих случаев.

Функция распределения интенсивности излучения $\Phi(x, \mu)$ в плоском слое изотропно-излучающей и рассеивающей среды определяется решением интегродифференциального уравнения

$$\mu \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \alpha \Phi = \frac{\beta}{2} \int_{-1}^1 \Phi(x, \mu') d\mu' + b, \quad \alpha = k + \beta, \quad \mu = \cos \theta, \quad (1)$$

где k - спектральный коэффициент поглощения; β - коэффициент рассеяния; θ - угол между направлением излучения и осью x , направленной по толщине слоя; b - интенсивность внутренних источников объемного излучения.

Граничные условия

$$\Phi(0, \mu) = 0, \quad \mu \geq 0; \quad \Phi(x, \mu) = \Phi_0 \text{ при } \xi \rightarrow \infty, \quad (2)$$

где $\Phi_0 = b/k$ - частное решение уравнения (1). В соответствии с этим общее решение представим в виде:

$$\Phi(x, \mu) = \Phi_0 + \psi(x, \mu)$$

и для функции ψ получим однородное интегродифференциальное уравнение

$$\mu \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \psi = \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 \psi(\xi, \mu') d\mu', \quad (3)$$

где введена безразмерная переменная $\xi = \alpha x$ и $\omega = \beta/\alpha$. Граничные условия для функции ψ будут

$$\psi(0, \mu) = -\Phi_0, \quad \mu \geq 0; \quad \psi(\xi, \mu) = 0 \text{ при } x \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Таким образом, мы получили однородное уравнение переноса, для решения которого воспользуемся методом, развитым в работах К.Кейза [1, 2]. В соответствии с граничными условиями (4) разыскиваются решения, затухающие при удалении от поверхности слоя

$$\psi(\xi, \mu) = \varphi_v(\mu) \cdot e^{-\xi/v}. \quad (5)$$

По аналогии с обычной терминологией функции $\varphi_v(\mu)$ будем называть собственными функциями, а соответствующие им значения v собственными значениями. После подстановки (5) в уравнение (3) получим

$$\left(1 - \frac{\mu}{v}\right) \cdot \varphi_v(\mu) = \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 \varphi(\mu') d\mu'. \quad (6)$$

Так как данное уравнение является однородным и линейным, то нормировка функции φ может быть произвольной. Поэтому для удобства примем

$$\int_{-1}^1 \varphi(\mu) d\mu = 1. \quad (7)$$

Уравнение (6) выглядит довольно простым и при условии (7) решение можно записать в виде:

$$\varphi_v(\mu) = \frac{\omega v}{2(v - \mu)}. \quad (8)$$

Если $v \neq \mu$, а μ принадлежит отрезку $-1 \leq \mu \leq 1$, то из уравнения (7) находятся собственные значения v . Действительно, подставив (8) в уравнение (7), получим уравнение для определения собственных значений v

$$1 - \omega \operatorname{arctg} \frac{1}{v} = 0. \quad (9)$$

Очевидно, что при $\omega < 1$ оно имеет только два корня $\pm v_0$, лежащие на действительной оси и этим корням соответствуют две функции (8). Но поиск решений уравнения (6) на этом не завершается, т.к. при всех значениях v на отрезке $-1 \leq v \leq 1$ существует континуум собственных функций вида:

$$\varphi_v(\mu) = \frac{\omega v}{2(v - \mu)} + \lambda(v) \delta(v - \mu), \quad (10)$$

где $\delta(v - \mu)$ - обобщенные δ -функции, а λ находится из условия нормировки (7)

$$\lambda(v) = 1 - \frac{\omega v}{2} \int_{-1}^1 \frac{d\mu}{v - \mu}. \quad (11)$$

Вычисляя главное значение интеграла, получаем для λ явное выражение

$$\lambda(v) = 1 - \omega v \operatorname{arctg} v. \quad (12)$$

Таким образом, кроме двух дискретных собственных значений $\pm v_0$ существует континуум всех значений v на отрезке $-1 \leq v \leq 1$ и соответствующие им собственные функции (10), которые в совокупности с функциями (8) составляют систему функций, с помощью которой искомое решение можно представить в виде:

$$\Phi(\xi, \mu) = \Phi_0 \left(1 + a_0 \varphi_0 e^{-\frac{\xi}{v_0}} + \int_0^1 A_v(\mu) e^{-\frac{\xi}{v}} dv \right). \quad (12)$$

Коэффициенты разложения находятся из граничного условия (2) при $\xi = 0$

$$a_0 \varphi_0 + \int_0^1 A_v \varphi_v(\mu) dv = -1.$$

Интегральные представления этих коэффициентов в общем виде для произвольной функции справа получаются при использовании условий ортогональности собственных функций. В данном случае они принимают вид:

$$a_0 = \frac{4}{\omega^2 v^2 X(v_0)} \int_0^1 W(\mu) \varphi_0(\mu) d\mu, \quad A_v = -\frac{v}{W(v)N(v)} \int_0^1 W(\mu) \varphi_v(\mu) d\mu,$$

где $W, X, N(v)$ – известные функции, свойства которых приведены в монографии Чандрасекара [3].

На этом изложение метода Кейза решения уравнения переноса, приводящего к полной аналогии с задачами классических дифференциальных уравнений с частными производными и методом Фурье, можно закончить и перейти к результатам, которые удалось получить при определении функции распределения объемного излучения, выходящего из плоского слоя излучающей среды через границу $x=0$. Подставив коэффициенты a_0, A_v в общую формулу (13) и применяя тождество Чандрасекара

$$\Phi(0, \mu) = \Phi_0 \left(1 - \frac{1}{X(\mu)} \int_0^1 \gamma(\mu') \left(\frac{1}{\mu' - \mu} - \frac{1}{v_0 - \mu} \right) d\mu' \right), \quad \mu \leq 0.$$

получим выражение для интенсивности выходящего излучения

$$\Phi(0, \mu) = \Phi_0 \left(1 - \frac{1}{X(\mu)} \int_0^1 \gamma(\mu') \left(\frac{1}{\mu' - \mu} - \frac{1}{v_0 - \mu} \right) d\mu' \right), \quad \mu \leq 0. \quad (14)$$

Функция γ такова, что

$$\int_0^1 \frac{\gamma(\eta)}{\eta - \mu} d\eta = X(\mu), \quad \int_0^1 \gamma(\eta) d\eta = 1. \quad (15)$$

С учетом этих интегралов выражение (14) принимает вид:

$$\Phi(0, \mu) = \Phi_0 \frac{1}{X(\mu)(v_0 - \mu)}, \quad \mu \leq 0. \quad (16)$$

Для дальнейших преобразований заменим μ на $-\mu$, считая $\mu > 0$, и обозначим через $\Phi_e(\mu)$ интенсивность выходящего излучения

$$\Phi_e(\mu) = \Phi_0 \frac{1}{X(-\mu)(v_0 + \mu)}, \quad \mu \geq 0. \quad (17)$$

Выразим функцию $X(-\mu)$ через H -функцию, которая протабулирована Чандрасекаром. Тогда выражение (17) примет вид:

$$\Phi_e(\mu) = \Phi_0 H(\mu) \sqrt{1 - \omega}, \quad \mu \geq 0. \quad (18)$$

Для функции $H(x)$ известен интеграл

$$\int_0^1 H(x) dx = \frac{2}{\omega} (1 - \sqrt{1 - \omega}). \quad (19)$$

Это позволяет определить объемную плотность выходящего излучения

$$P_e = \frac{1}{\Phi_0} \int_0^1 \Phi_e(\mu) d\mu = \frac{2(\sqrt{1 - \omega} - 1 + \omega)}{\omega}. \quad (20)$$

На рис.1 приведены графики углового распределения интенсивности выходящего излучения полупространства, полученные по формуле (18), на этом рисунке $\varphi_e = \Phi_e / \Phi_0$. На рис.2 представлена зависимость объемного излучения (20) от параметра ω , характеризующего соотношение спектрального коэффициента поглощения и рассеяния $\omega = \beta / (\beta + k)$, $0 \leq \omega \leq 1$.

Аналогичным образом можно получить аналитические решения для других случаев радиационного теплообмена полупространства с окружающей средой, которые представляют интерес в инженерной практике. Рассмотрим полупространство без внутренних источников объемного излучения под действием внешнего облучения. В этом случае в уравнении (1) $\beta = 0$, а граничные условия (2) примут вид:

$$\Phi(0, \mu) = \Phi_0 \lambda(\mu), \quad \mu > 0; \quad \Phi(x, \mu) = 0 \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (21)$$

где функция $\lambda(\mu)$ определяет угловое распределение падающего на поверхность $x=0$ внешнего излучения.

Общее решение теперь принимает вид:

$$\Phi(\xi, \mu) = \Phi_0 \left(a_0 \varphi_0 e^{-\frac{\xi}{v_0}} + \int_0^1 A_v \varphi_v(\mu) e^{-\frac{\xi}{v}} dv \right). \quad (22)$$

Коэффициенты a_0, A_v находятся из первого граничного условия

$$\lambda(\mu) = a_0 \varphi_0 + \int_0^1 A_v \varphi_v(\mu) dv.$$

Как и в методе Фурье они являются коэффициентами разложения функции $\lambda(\mu)$, заданной на границе. В данном случае для них получаем следующие выражения:

$$a_0 = \frac{-4}{(\omega v_0)^2 X(v_0)} \int_0^1 \lambda(\eta) W(\eta) \varphi_0(\eta) d\eta, \quad A_\mu = \frac{v}{N(v) W(v)} \int_0^1 \lambda(\eta) W(\eta) \varphi_v(\eta) d\eta.$$

Для функции углового распределения интенсивности выходящего излучения теперь получим

$$\Phi(0, \mu) = \Phi_0 \frac{1}{\chi(\mu)} \int_0^1 \lambda(\eta) \chi(\eta) \left(\frac{1}{\eta - \mu} - \frac{1}{v_0 - \mu} \right) d\eta, \quad \mu < 0.$$

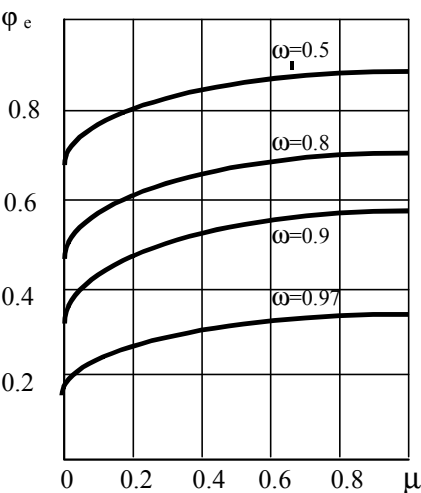


Рис. 1. Графики углового распределения интенсивности выходящего излучения

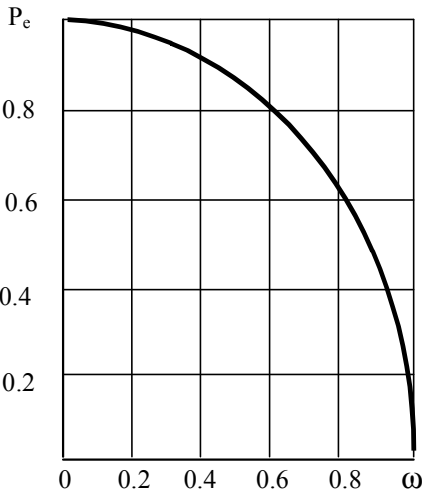


Рис.2. Зависимость объемного излучения от коэффициентов поглощения и рассеяния

В случае диффузного облучения поверхности полупространства интеграл можно выразить через известные функции, как и в предыдущем случае, и интенсивность обратного излучения будет равна

$$\Phi_e(\mu) = \Phi_0(1 - H(\mu)\sqrt{1-\omega}), \quad \mu > 0. \quad (23)$$

Аналогично предыдущему находим и объемную плотность обратного излучения

$$P_e = 1 - \frac{2(\sqrt{1-\omega} + \omega - 1)}{\omega}. \quad (24)$$

В заключение отметим, что функция $H(x)$, вошедшая в выражения окончательных результатов рассмотренных задач, определяется решением нелинейного интегрального уравнения

$$H(x) = 1 + \frac{x H(x) \omega}{2} \int_0^1 \frac{H(t)}{t+x} dt. \quad (24)$$

Решение этого уравнения представляет практический интерес по двум аспектам. Во-первых, оно нелинейное, и, кроме того, подынтегральная функция имеет особенность при $x = t = 0$. Особенность эта, конечно, устранимая, но при численном решении задачи необходимо предусмотреть процедуру вычисления пределов интегральных сумм, исключаящую вычисление подынтегральной функции непосредственно в точке $x = 0$. Для получения результатов, приведенных на рисунках функция $H(x)$ вычислялась методом простой итерации. При этом установлено, что сходимость итераций имеет место для двух очевидных алгоритмов:

$$H^{N+1}(x) = 1 + \frac{\omega x H^N(x)}{2} \int_0^1 \frac{H^N(t)}{t+x} dt, \quad H^{N+1}(x) = \frac{1}{1 - \frac{\omega x}{2} \int_0^1 \frac{H^N(t)}{t+x} dt}, \quad N=0,1,2,3,\dots, \quad (25)$$

где N – номер итерации. Отметим также, что интеграл вычислялся по простейшей формуле прямоугольников следующего вида:

$$\int_0^1 f(t) dt = \sum_{i=1}^m \Delta t \cdot f\left(\frac{\Delta t}{2} + \Delta t \cdot (i-1)\right), \quad (26)$$

где m – число частичных отрезков, на которые делится весь отрезок интегрирования, а подынтегральная функция вычисляется в средних точках. По своей точности эта формула не уступает формуле трапеций, функция $H(x)$ вычисляется в промежуточных точках $x_i = (i-1)\Delta x + \Delta x/2$; $i=1,2,3,\dots,m$; $\Delta x = 1/m$ и вычисление подынтегральной функции при $x=0$ исключено. При этом наблюдается быстрая сходимость результатов, хотя сейчас скорость сходимости не имеет принципиального значения. В качестве начального приближения можно брать константу

$$H^0(\mu) = \frac{2}{\omega}(1 - \sqrt{1-\omega}), \quad (27)$$

которая согласно формуле (19), является средним значением функции $H(x)$ на отрезке $[0,1]$. Путем сравнения с этой константой среднего значения вычисленной функции можно оценить точность итераций в этом интегральном смысле. В приведенной ниже табл.1 по строкам показаны последовательные итерации функции $H(\mu)$ при $\omega = 0.5$, которые получены с шагом интегрирования $\Delta t = 0.05$, но в строках приведены значения не для всех узловых точек.

Таблица 1

Последовательные итерации функции $H(m)$ при $\omega = 0.5$, полученные с шагом интегрирования $\Delta t = 0.05$

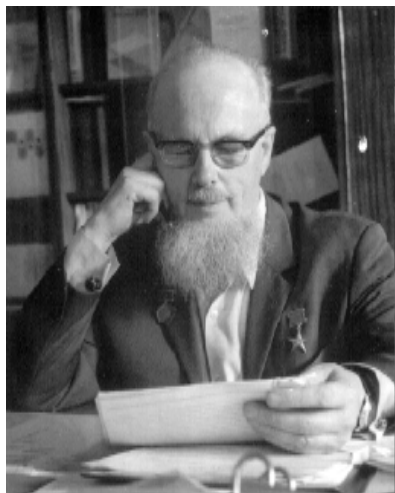
$N \backslash \mu$	0.025	0.225	0.425	0.625	0.825	0.975
0	1.171573	1.171573	1.171573	1.171573	1.171573	1.171573
1	1.030863	1.130684	1.176363	1.204876	1.224730	1.236139
2	1.025754	1.123012	1.174017	1.207854	1.232312	1.246701
3	1.025522	1.121889	1.173364	1.208071	1.233471	1.248543
4	1.025517	1.121734	1.173230	1.208071	1.233655	1.248876
5	1.025512	1.121713	1.173205	1.208066	1.233685	1.248937
6	1.025511	1.121719	1.173200	1.208064	1.233690	1.248949
7	1.025510	1.121709	1.173200	1.208064	1.233691	1.248951
8	1.025510	1.121709	1.173199	1.208064	1.233691	1.248952

Как видим, уже после третьей итерации результаты не меняются в четвертом знаке после запятой, при этом итерационный процесс устойчив при любом числе итераций.

Список литературы

1. Case K.M. Elementary solutions of the transport equation. // Ann. phys., 1960, 9,1
2. Case K.M. Recent development in neutron transport theory. University of Michigan Memorial Phoenix Project Report, 1961.
3. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. – М.: ИЛ, 1953. – 421с.

Поступила в редакцию 15.02.99.



**АКАДЕМИК
Российской Академии
наук
И.В. ПЕТРЯНОВ
и подготовка кадров
для атомной
промышленности**

В 1949 г. в Московском химико-технологическом институте (МХТИ), ныне – Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, для подготовки специалистов химиков-технологов атомной, электронной и других отраслей новой техники был создан инженерный физико-химический факультет со сроком обучения 5,5 лет. Для заведования кафедрами и чтения лекций по профилирующим курсам на факультет были привлечены авторитетные ученые из московских отраслевых и академических институтов. В их числе в качестве профессора (по совместительству) по кафедре, вначале обозначенной номером 44, а впоследствии получившей название «Кафедра разделения и применения изотопов», был приглашен Игорь Васильевич Петрянов.

Заведовал кафедрой, также по совместительству, с начала ее организации по 1960 г., т.е. до переезда в Новосибирский Академгородок (в связи с назначением директором Института катализа АН СССР), профессор Г.К. Боресков.

Автор этих строк с 1949 по 1960 гг. работал в качестве доцента – заместителя заведующего новой кафедрой, после отъезда Г.К. Борескова до 1981 г. – профессором и заведующим кафедрой, а с 1982 г. по настоящее время – профессором кафедры. Это дало мне счастливую возможность многие годы (1949 – 1987) регулярно общаться с Игорем Васильевичем.

И.В. Петрянов участвовал в первоначальном определении профиля новой специальности, разработке перечня специальных дисциплин, учебных программ и содержания профилирующих курсов, лабораторных практикумов, семинаров, тематики курсовых проектов и дипломных работ.

Более 30 лет он читал для студентов нашей кафедры лекции по специальным курсам: вначале «Физические методы разделения стабильных изотопов» (диффузия, термодиффузия, электромагнитная сепарация, центрифугирование), а позднее – «Изотопные эффекты и общие основы многоступенчатых процессов разделения».

Участие Игоря Васильевича в профессорско-преподавательской работе высшего учебного заведения не случайно, а вполне органично. Будучи широко образованным физикохимиком, он обладал выдающимся талантом популяризатора науки. Это мнение подтверждается его успешной работой в качестве главного редактора научно-популярного журнала Академии наук СССР «Химия и жизнь», научным редактором «Детской энциклопедии», руководителем секции научно-популярной литературы РИСО АН СССР, рядом написанных им интересных книг серии «Ученые – школьнику», выступлениями по телевидению.

Своими яркими лекциями и редким личным обаянием Игорь Васильевич неизменно завоевывал любовь и благодарность студентов каждого выпуска. Как слушатели лекций, так и весь коллектив кафедры высоко ценили его научный авторитет, неизменный интерес ко всему новому, ясность мысли, простоту и приветливость.

Качества большого исследователя счастливо сочетались с опытом и талантом преподавателя-воспитателя научной смены, умеющего просто и образно говорить о сложном. Почти 40 поколений студентов физ.-хим. факультета МХТИ им. Д.И. Менделеева имели редкую возможность слушать яркие лекции и выступления Игоря Васильевича, запоминающиеся на всю жизнь. Я и мои коллеги всегда гордились тем, что у нас на кафедре читает лекции академик Петрянов и радовались возможности общаться с ним, учиться у него умению увлекаться и увлекать других. Редкое сочетание качеств делало его во многом образцом для всех тех, кто желал совершенствоваться.

Многолетнее общение с Игорем Васильевичем позволяет мне утверждать, что он со своей стороны также высоко ценил и любил свою работу на кафедре, возможность общения со студенческой аудиторией, что вполне имманентно его натуре широко эрудированного крупного ученого- популяризатора знаний. При этом замечу, что содержание читаемого курса не совпадало с его основными научными интересами, связанными с изучением аэродисперсных систем и созданием соответствующих средств защиты.

Последние лекции студентам кафедры «Технология изотопов и особо чистых веществ» (такое название она получила с 1969 г.) профессор Петрянов прочитал в 1986 – 1987 учебном году, т.е. накануне своего 80-летия.

И.В. Петрянову принадлежат большие заслуги в области экологии. Он одним из первых привлек внимание и развивал правильное понимание по проблемам защиты окружающей среды в нашей стране. Недаром И.В. Петрянов был заместителем председателя Научного совета по охране природной среды и комплексному использованию ресурсов при ГКНТ СССР.

Понимая большое значение пропаганды экологических знаний, И.В. Петрянов выступал с лекциями перед многочисленной аудиторией инженерно-технических специалистов в работавшем на общественных началах на базе МХТИ им. Д.И. Менделеева факультете «Защита окружающей среды от промышленных загрязнений» Московского народного университета технического прогресса. Автор этих строк многие годы был проректором университета, работавшего под эгидой общества «Знание», руководителем отделения химии и химической технологии и «несет ответственность» за привлечение и без того предельно загруженного профессора к чтению лекций.

И.В. Петрянов оставил после себя не только отличные фильтры, «Лепестки», «Беруши», научные труды и книги, учеников и последователей, но и добрую память как об удивительном, неповторимом Ученом и Человеке.

Я глубоко чту память об Игоре Васильевиче Петрянове. Время общения со столь разносторонней и богато одаренной лучшими качествами личностью хранится в копилке наиболее значительных и радостных событий прожитых лет.

Я.Д. Зельвенский,
профессор РХТУ им. Д.И. Менделеева

**ПРОГРАММА НАУЧНЫХ ШКОЛ-СЕМИНАРОВ, КОНКУРСОВ И МОЛОДЕЖНЫХ
НАУЧНЫХ КОНГРЕССОВ ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ И
ПЕРСПЕКТИВНЫМ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ
СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

“ЭНЕРГЕТИКА-3000”

Обнинский институт атомной энергетики совместно с Государственным научным центром РФ - Физико-энергетическим институтом и Медицинским радиологическим научным центром РАМН проводят в рамках Программы “Энергетика-3000” в 1999 г. конкурсы научных работ студентов, аспирантов и молодых ученых по следующим направлениям:

**КОНКУРС
“ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ”**

Председатели экспертного совета конкурса -

Юрий Алексеевич Казанский, д.ф.-м.н., профессор, академик МАНВШ, ректор ОИАТЭ
Анатолий Васильевич Зродников, д.ф.-м.н., профессор, директор ГНЦ РФ - ФЭИ

1. Ядерная энергетика в мировом топливно-энергетическом балансе:

Ресурсы ядерного топлива.

Экономика ядерной энергетики.

Перспективы и пути развития ядерной энергетики.

2. Безопасность ядерной энергетики:

Новые ядерные энергетические установки: физика, теория.

Ядерные топливные циклы.

Обращение с радиоактивными отходами.

Надежность оборудования АЭС.

3. Ядерная энергетика и общество:

Подготовка персонала для ядерной энергетики и промышленности.

Международные и региональные проблемы ядерной энергетики.

Международный и национальный контроль за безопасностью ядерной энергетики.

**КОНКУРС
“РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ”**

Председатель экспертного совета конкурса -

Анатолий Федорович Цыб, д.м.н., академик РАМН, директор МРНЦ РАМН

1. Радиобиологические и медицинские аспекты применения источников энергии.

2. Экологические проблемы современной энергетики:

Оценка воздействия широкомасштабной энергетики на окружающую среду.

3. Использование современных технологий в медицине.

Желающие принять участие в конкурсах должны **до 01.09.99 г.** направить в оргкомитет заявку. **Заявка должна содержать следующую информацию.**

Сведения об авторах работы.

Краткую аннотацию работы на русском и английском языках (не более 3 листов).

Содержание работы.

Рекомендацию ученого и научно-технического советов.

Основные требования к работе: работа должна быть выполнена в 1998-99 гг., тематика работы должна соответствовать направлениям конкурсов, работа должна быть выполнена совместно студентами/аспирантами вуза и научными сотрудниками ГНЦ или ИАН, основное содержание работы необходимо подготовить в виде статьи, готовой к опубликованию. Если работа (или ее часть) представлялась на одном из мероприятий Программы "Энергетика - 3000", это следует отметить в заявке.

Итоги конкурсов будут подведены в конце 1999 г. По их результатам будут присуждены **денежные премии** (для каждого из конкурсов) - одна I-ой степени, две II-ой степени и три III-й степени. Лучшие работы будут опубликованы в журнале "Ядерная энергетика".

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТ

Изложение и оформление основного содержания работы должно удовлетворять следующим требованиям.

1. Объем основного содержания работы не должен превышать 10 с. текста. К печатному варианту работы следует приложить электронный вариант на дискете стандартного формата (360 К; 1,2М - 5,25"; 1,44М - 3,5"; либо по электронной почте E-mail). Файлы должны содержать текст, выполненный в Microsoft Word 6/7 или PageMaker или Write. Каждая работа должна иметь краткую аннотацию, реферат, сведения об авторах (на русском и английском языках).

2. В рукописи должны быть указаны: ее УДК, название, фамилии авторов, их ученая степень и должность, полное наименование вуза, адреса и номера телефонов авторов. Название работы должно предельно кратко и конкретно отражать ее тему.

3. В формулах необходимо выделять прописные и строчные буквы, индекс писать ниже строки, показатели степени - выше строки, греческие буквы обводить красным карандашом, на полях делать отметку, каким алфавитом в формулах обозначены буквы, а также и другие пояснения. Математические формулы приводить только необходимые для понимания существа вопроса.

4. Работу иллюстрировать фотографиями и чертежами. Чертежи выполнять четко, размером не более 13х21 см. Обязательно в тексте работы давать ссылку на рисунки, причем обозначения в тексте должны строго соответствовать обозначениям на рисунках. Каждый чертеж и фотография должны иметь порядковый номер в тексте и подпись. Чертежи и фото в текст рукописи не вклеивать, а прилагать отдельно, составив на них описание.

5. Единицы физических величин приводить в Международной системе единиц (СИ).

6. В табличном материале точно обозначить единицы физических величин. Не сокращая слов, давать полностью наименование, слишком громоздких таблиц не давать.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТу и содержать все упоминаемые в тексте статьи работы. Проверить правильность ссылок на литературу, формулы, рисунки, таблицы, приложения и др. Убедиться в правильности оформления справочных и дополнительных текстов.

8. Дополнения и корректуру против рукописи вносить нельзя.

Адрес для контактов:

Россия, 249020 г. Обнинск, Калужской обл., Студгородок 1, ОИАТЭ.

Тел: +7-(084-39) 3-82-45, 3-69-31, 5-85-11.

Факс: +7-(084-39)-7-08-22

E-mail: salnikov@iate.obninsk.ru,
obninsk@meteo.ru

Internet: <http://www.okclub.org/energy3000.htm>
<http://www.obninsk.ru>

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.516.4:621.039.59

New Solutions for Thorium-Uranium Fuel Reprocessing \ V.I.Volk, A.Yu.Vakhrushin, B.S.Zakharkin, S.L.Mamaev, V.S.Vlasov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 1 table, 3 illustrations. - References, 4 titles.

The new technological scheme of reprocessing is proposed for closed Th-U fuel cycle with increased ^{233}U breeding. This scheme is based upon the combination of crystallization and extraction operations and consist of steaming of solution obtained after fuel dissolution, and crystallization of thorium nitrate from the cooled remnant solution.

The volume of flow containing ^{233}U and entering to extraction reprocessing, is reduced by 10-30 times. The extraction reprocessing is provided using extragents which do not form second organic phase with the thorium solvates. The reduction of volume of treated flows provides fast ^{233}U regeneration and further fuel refabrication which will not be complicated by decay products of even uranium isotopes.

УДК 621.039.544.35

Concept of Possible Involving of Thorium in Nuclear Power Industry \ P.N.Alekseev, E.S.Glushkov, A.G.Morozov, N.N.Ponomarev-Stepnoy, S.A.Subbotin, D.F.Tsurikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages. - References, 6 titles.

The contemporary nuclear industry is familiar with the closed uranium-plutonium cycle, which gives the grounds for development of future large-scale nuclear power engineering. Still there is no any forcible arguments to replace it by the closed thorium-uranium cycle. However there is the permanent interest to increase the raw material stockpiles of nuclear industry by supplementing with the thorium fuel.

The Russian Scientific Center "Kurchatov Institute" together with organizations of the Ministry of Nuclear Energy of Russian Federation provides the works related to thorium problem. These include the physical, material science and technological investigations as well as the study of optimal reactor arrangement and investigations of effective ways of thorium involving in nuclear power industry based on the complex technical and economical and radiological analysis.

УДК 621.039.59:621.039.544.35

The Technological Possibilities of Fabrication Thorium-Containing Fuel Composition \ G.N.Kazantsev, I.S.Kurina, I.Ya.Ovchinnikov, V.V.Popov, V.N.Sugonyaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 4 illustrations.

The technological experience of fabrication different fuel compositions, accumulated by the State Scientific Center "IPPE", allows to provide the works on thorium-containing fuel compositions in three ways:

- fabrication of metal thorium-containing fuel;
- fabrication of ceramic thorium-containing fuel;
- fabrication of cermet thorium-containing fuel.

УДК 621.039.544.35:621.039.526

Ways and Possibilities of Thorium Cycle Application for Light Water and Fast Reactors \ V.M.Dekusar, E.V.Dolgov, V.G.Ilunin, A.G.Kalashnikov, V.A.Pivovarov, M.F.Troyanov, Z.N.Chizhikova, V.N.Sharapov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 3 tables. - References, 3 titles.

The developed fuel cycle with the large-scale utilization of thorium is a long-way outlook for Russia. However the useful features of thorium use in light water and fast reactors can be related in near future. These useful features relate to the safety improvement, less actinide accumulation and the better resistance to non-sanctioned use of fissionable materials.

The article is devoted to the parameters and problems of reactors which can help to start the thorium involvement in nuclear industry.

УДК 621.039.526:621.039.516.4

Integral Experiments on Critical Facilities and Reactors for Basing of Uranium-Thorium Cycle \ V.I.Golubev, A.V.Zvonarev, G.N.Manturov, Yu.S.Khomyakov, A.M.Tsiboulia; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 5 tables, 2 illustrations.

The uranium-thorium compositions with different moderator amount were studied on six critical facilities (KBR 18-23). The KBR-18..21 were created as the central subcritical cylindrical core made from enriched uranium oxide and metal thorium surrounded by igniter zone of enriched uranium. The material of central zone was to provide K_f value about 1. The hydrogen was added in the form of thin CH_2 foils and the $H/^{235}U$ nuclei ratio was from 0 up to ~70. The fuel enrichment was varied from 10 to 2.5%.

The KBR-22..23 were real critical systems with uranium-thorium core.

The criticality of system and K_f of central zone were measured in the experiments. In addition, ratio of ^{232}Th and ^{238}U capture and fission cross-sections to ^{235}U fission cross-section were measured in the central zone. The relative cross-sections of some transuranium elements were measured.

The experiments were made in the BN-350 reactor for thorium sample irradiation to define the intensity of ^{233}U accumulation and ^{232}U content. In addition the relative fission, capture and $(n,2n)$ cross-sections were measured in different zones of the reactor for ^{232}Th , ^{233}U and ^{231}Pa .

УДК 621.039.526:621.039.516.4.

Investigation of Thorium Irradiated in Lateral Blanket of Fast Reactor and in Thermal Spectrum of Graphite Reactor \ A.V.Zvonarev, B.Ya.Zil'berman, V.I.Ivanov, N.A.Nerozin, V.B.Pavlovich, B.A.Petrukhin, F.P.Raskach, E.Ya.Smetanin, L.V.Sytnik, M.F.Troyanov, Yu.S.Khomyakov, L.A.Chernov, I.G.Sheyner; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 2 tables, 2 illustrations.

To find the possibility for ^{232}U accumulation lower than 10 ppm, the IPPE had organized the irradiation of thorium samples in the lateral blanket of the BN-350 fast reactor and in the thermal graphite-water reactor with subsequent radiochemical analysis of irradiated samples. The main results of these works are presented in the article.

УДК 621.039.58

On the Problem of Estimation of Model Uncertainties During Probabilistic Analysis Providing Nuclear Power Plant Unit's Safety \ A.V. Antonov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 1 table, 1 illustration. - References, 6 titles.

The problem of analysis of uncertainties, which are caused by sufficient discrepancies of conceptual and mathematical models as well as by numerical approximation, errors in codes and limitations of calculation process is considered. Methods of the statistic resemblance theory are proposed as a method of analysis. The Fisher criterion is considered which is a particular case of models obtained in the frame of the resemblance theory. A numerical example is given to illustrate the application of proposed method.

УДК 519.688:621.039.58

Information Authenticity Control in Vibro-Diagnostics System of the Novovoronezh NPP \ A.O.Skomorokhov, M.T.Slepov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 10 pages, 3 tables, 6 illustrations. - References, 8 titles.

The paper is devoted to the questions of automation of spectrum spoilage check procedure for the vibration monitoring system installed at 3 and 4 units of the Novovoronezh NPP. The indications are described which allow to divide the original set of spectra into the "normal" and "abnormal" classes. The selection of the most informative spectrum indications is demonstrated. The diagnostics of specified faultiness is made based on the criteria developed by the authors.

УДК 541.15+543.51

Main Objectives of the Ecological Estimation of Properties of Secondary Substances Formed after Contaminated Food Irradiation \ T.V. Melnikova, L.P. Polyakova, G.V. Kozmin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 5 tables, 1 illustration. - References, 11 titles.

The problem of secondary contamination of irradiated food by organochlorinated pesticides (OCP) residues that degraded upon treatment with ionizing radiation is discussed in this article. The absence of systematic concept in the solution of the problem at the reviewed publications is demonstrated. On the base of performed OCP monitoring the concentration ranges of the OCP are determined at that types of food which can be exposed to radiation treatment. Irradiation of model objects is carried out and the estimation of OCP degradation is given. The methods investigating of new chemical compounds that are formed after the irradiation of OCP containing objects are proposed.

УДК 621.039.6

The Energetic Approach to Solve the Problem of Tokamak Plasma Control with Gas Puffing \ O.N. Alexandrova, N.V. Pashatsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 2 illustrations. - References, 12 titles.

The interaction processes between the molecular hydrogen being injected into tokamak's camera and plasma were studied at the current increase stage. Using energetic approach the criterion of optimum gas puffing was calculated.

УДК 621.039.526:621.039.534.6

Lead Coolant for Fast Reactor-Burner with Hard Neutron Spectrum \ G.L. Khorasanov, A.P. Ivanov, V.V. Korobeinikov, A.I. Blokhin, A.L. Shimkevich; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 5 tables, 4 illustrations. - References, 4 titles.

The possibility of increasing minor actinides (MA) burn out efficiency due to their fission in a fast reactor with lead isotope, Pb-208, as a coolant is considered. Calculation of MA fission and capture rate in a fast reactor blanket with different coolants: sodium, lead natural, and lead isotope, Pb-208, is given. It is shown that the use of Pb-208 in the fast reactor results in increase by 20-30 percent of MA incineration in comparison with a conventional fast reactor. The induced radioactivity of sodium, bismuth, lead, and its stable isotopes is analyzed.

УДК 539.17.013

Simulation of Periodic Structures in Distribution of Defects, Generated in NPP Structures Materials by the Stationary Source \ I.R.Bagdasarova, V.A.Galkin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages. - References, 14 titles.

A possible mechanism is studied as to formation of periodic structures in a defect spectrum due to influence of stationary spatially homogeneous source effect and the fusion of defects.

УДК 517.911.5:621.039.58

Numerical Solution of Vlasov Equation with Noncontinuous Coefficients Applied to NPP Simulation \ M.G.Tkachenko, V.A.Galkin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 10 pages. - References, 6 titles.

This paper is devoted to analytical and numerical simulation of the Vlasov-Liouville equation. This equation appears in the models of heat and mass transfer related to the laser fusion problem. Exact solutions are constructed and peculiarities of their applications are discussed.

УДК 536.423

Analytical Estimation of the Efficiency of Steam Flow Transpiration Cooling \ V.T.Buglaev, A.S.Strebkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 1 table, 4 illustrations. - References, 5 titles.

The results of simulation of the process of transpiration cooling of steam flow by dispersed liquid depending on the initial mode parameters of steam-drop mixture are analyzed. The estimations are made of the length of cooler evaporation zone and of the extent of steam cooling under different pressures of two-phase flow. The data on the dynamics of evaporating drops for one of the fractions of cooler poly-disperse spray are given.

УДК 536.33

Radiation from a Flat Layer of Scattering Medium with Volume Sources of Heat Generation \ Yu.V. Lipovtsev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 1 table, 2 illustrations. - References, 3 titles.

Consideration is made of boundary-value problem on the intensity distribution of radiative heat transfer in flat layer of a semitransparent material with volume sources of heat generation. An analytical solution for the space density of radiation from the layer was obtained which can be used in various problems of this type.

НАШИ АВТОРЫ

О.Н. Александрова - старший преподаватель кафедры физики Озерского технологического института МИФИ., Закончила МГУ в 1987 г. Область научных интересов: физика плазмы, статистические методы обработки данных экологического мониторинга.

А.В. Антонов - д.т.н., профессор кафедры АСУ Обнинского института атомной энергетики (ОИАТЭ), закончил МИФИ в 1977 г. Область научных интересов: оценивание надежности объектов в условиях ограниченной информации, оптимизация правил обслуживания сложных систем.

И. Р. Багдасарова - аспирантка кафедры прикладной математики ОИАТЭ.

А.И. Блохин - к.ф.-м.н., в.н.с. ГНЦ РФ-ФЗИ.

В.Т. Буглаев - д.т. н., профессор Брянского института транспортного машиностроения.

В.А. Галкин - д. ф.-м. н., профессор кафедры прикладной математики ОИАТЭ.

А.П. Иванов - к.т.н, зам.начальника отдела ГНЦ РФ-ФЗИ.

Г.В. Козьмин - к.б.н., заведующий кафедрой экологии ОИАТЭ.

В.В. Коробейников - д.ф.-м.н., начальник лаборатории ГНЦ РФ-ФЗИ, профессор кафедры РКР ОИАТЭ.

Ю.В. Липовцев - д.ф.-м.н., профессор. С 1988 г. - зав.каф. механики и прочности конструкций в ОИАТЭ. Область научных интересов - механика материалов и конструкций.

Т.В. Мельникова - аспирантка кафедры экологии ОИАТЭ.

Н.В. Пашацкий - д.т.н, профессор кафедры машин и аппаратов химического производства Озерского технологического института МИФИ. Закончил Уральский политехнический институт в 1957 году. Область научных интересов: физика плазмы, обработка поверхностей дуговым разрядом.

Л.П. Полякова - к.х.н., доцент кафедры экологии ОИАТЭ.

А.О. Скоморохов - к.т.н., доцент кафедры автоматики, контроля и диагностики ОИАТЭ.

М.Т. Слепов - закончил в 1992 г. ОИАТЭ. В настоящее время работает в должности начальника лаборатории технической диагностики на Нововоронежской АЭС. Научные интересы: вибрационный мониторинг оборудования, частотный анализ, распознавание образов.

А.С. Стребков - к.т.н., доцент Брянского института транспортного машиностроения.

М.Г. Ткаченко - аспирантка кафедры прикладной математики ОИАТЭ.

Г.Л. Хорасанов - к.ф.-м.н., с.н.с ГНЦ РФ-ФЗИ.

А.Л. Шимкевич - д.ф.-м.н., начальник лаборатории ГНЦ РФ-ФЗИ.

OUR AUTHORS

O.N.Alexandrova - graduated from the Moscow State University in 1987, senior lecturer at the Physical Department of Ozyorsk Technology Institute of Moscow Engineering Physical Institute. Scientific interests: plasma physics, statistical methods of the ecology monitoring data treatment.

A.V. Antonov - Dr.Sci. (Engineering), Professor of Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering (OINPE). Graduated from the Moscow Engineering Physics Institute. Scientific interests: estimation of object's reliability in condition of limited information, optimization of rules for complicated system service.

I. R. Bagdasarova - post-graduate student of the applied mathematics department in the OINPE.

A.I. Blokhin - Cand. Sci. (Phys.-Math.), leading researcher of the State Scientific Center of Russian Federation - Institute of Physics and Power Engineering (IPPE).

V.T.Buglayev - Dr.Sci.(Engineering), Professor of the Bryansk Institute of Transport Mechanical Engineering.

V.A.Galkin - Dr.Sci.(Phys.-Math.), Professor of the applied mathematics department in the OINPE.

A.P. Ivanov - Cand. Sci.(Engineering), deputy head of department of the IPPE.

G.L. Khorasanov - Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher of the IPPE.

V.V. Korobeinikov - Dr. Sci. (Phys.-Math.), head of laboratory of the IPPE, Professor of OINPE.

G.V. Koz'min - Cand.Sci. (Biology), head of the ecology department in the OINPE.

T.V.Mel'nikova - post-graduate student of the ecology department in the OINPE.

Yu.V. Lipovtsev - Dr. Sci.(Phys.-Math.), Professor, since 1988 - head of department in the OINPE. Scientific interests: mechanics of material and structures.

N.V. Pashatsky - Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Ozyorsk Technology Institute of Moscow Engineering Physical Institute. Graduated from Ural Polytechnical Institute in 1957. Scientific interests: plasma physics, surface treatment with arc discharge.

L.P.Polyakova - Cand.Sci.(Chemistry), associate professor of the ecology department in the OINPE.

A.L. Shimkevich - Dr. Sci. (Physics), head of laboratory of the IPPE.

A.O. Skomorokhov -Cand. Sci (Engineering), associate professor of the department of automatics, control and diagnostics in the OINPE.

M.T. Slepov - graduated from the OINPE in 1992, the head of the laboratory of technical diagnostics of Novovoronezh NPP. Scientific interests: vibration monitoring of equipment, pattern recognition, frequency analysis.

A.S.Strebkov - Cand.Sci.(Engineering), associate professor of the Bryansk Institute of Transport Mechanical Engineering.

M.G. Tkachenko - the post-graduate student of the applied mathematics department in the OINPE.