

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ,
НАДЕЖНОСТЬ И
ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

К.В. Дергачев

Электронная система прогнозирования эрозии рабочих лопаток турбин атомных станций.....3

С.В. Михайлов

Проектирование ядра ультразвукового дефектоскопа СК 26 на базе многопроцессорной системы.....14

Г.Н. Власичев

Расчетная модель расплавления твэла с учетом перемещения расплавленной оболочки в активной зоне реактора БН при запроектной аварии20

ФИЗИКА И ТЕХНИКА
РЕАКТОРОВ

Е.Б. Громов

Консервация конденсатно-питательного тракта и парогенераторов энергоблоков с применением октадециламина.....31

Ю.Е. Титаренко, Е.И. Карпихин, В.Ф. Батяев, А.Б. Колдобский,

В.М. Живун, Р.Д. Муламетов, С.В. Квасова, Д.В. Фищенко

Экспериментальное определение выходов радиоактивных продуктов взаимодействия протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом.....37

Г.Б. Усынин, С.Г. Усынина

Об использовании концепции насыпной активной зоны для РБН.....51

ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Б.И. Яцало, И.А. Пичугина, Г.В. Козьмин, О.А. Мирзеабасов,

И.В. Охрименко, М.Ф. Каневский, Е.А. Савельева

Геоинформационная система радиоактивно загрязненных территорий.....57

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ
И РАДИОАКТИВНЫЕ
ОТХОДЫ

Е.Н. Ильин, И.Ю. Пашкеев, А.В. Сенин

Иммобилизация радиоактивных отходов в металлокерамических материалах методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.....62

ТЕПЛОФИЗИКА

М.В. Давыдов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов

Анализ экспериментов MAGICO и QUEOS по перемешиванию облака частиц с водой (паровые взрывы при тяжелой аварии) с помощью кода VAPEX.....72

S.A. Rouhanifard, A.A. Kazantsev, V.V. Sergeev

Relap5 Modeling of the NPP VVER-1000 Steam Generator.....80

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ
МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

Ю.М. Бакун, А.С. Апян, Н.Н. Лянной, Е.С. Матусевич,

Н.Г. Шишканов, Р.А. Розиев

Разработка технико-методических средств для радиометрических исследований и дозиметрического планирования радиойодтерапии.....91

CONTENTS

SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP	<i>K.V. Dergachev</i> Electronic System of Erosion Forecasting of Turbine Rotor Blade of Nuclear Power Plants.....3
	<i>S.V. Michailov</i> Designing of Ultrasonic Defectosop SK26 Core on the basis of Multiprocessor System.....14
	<i>G.N. Vlasichev</i> Calculation Model of Pin Meltdown subject to Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident20
REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY	<i>E.B. Gromov</i> Temporary Closing-down of Condensate-feed Channel and Steam Generators of Power Units with the using of Octadecylamine.....31
	<i>Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, B.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, C.V. Kvasova, D.V. Fischenko</i> Measurement of Radionuclide Yields Produced in 2.6 GeV Proton Irradiated nat-W.....37
	<i>G.B. Usynin, S.G. Usynina</i> Ballslayer as Core for the Fast Reactor51
ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING	<i>B.I. Yatsalo, I.A. Pichugina, G.V. Kozmin, O.A. Mirzeabassov, I.V. Okhrimenko, M.F. Kanevsky, E.A. Savelieva</i> Geoinformation System of Radioactive Contaminated Territories57
FUEL CYCLE AND RADIOACTIVE WASTES MANAGEMENT	<i>E.N. Ilyin, I.Yu. Pashkeev, A.V. Senin</i> Immobilization of Radioactive Waste in Ceramet Materials by the Method of Self-propagating High Temperature Synthesis62
THERMAL PHYSICS	<i>M.V. Davydov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, I.V. Parfenov</i> Analysis of the MAGICO and QUEOS experiments on the premixing of the clouds of particles with water with the VAPEX code.....72
	<i>S.A. Rouhanifard, A.A. Kazantsev, V.V. Sergeev</i> Relap5 Modeling of the NPP VVER-1000 Steam Generator.....80
APPLICATION OF NUCLEAR METHODS AND MEANS	<i>Yu.M. Bakun, A.S. Apyan, N.N. Lyannoy, E.S. Matusevich, N.G. Shishkanov, R.A. Roziev</i> Development of Technicomethodical Means for Radiometric Investigations and Dosimetric Design of Radioiodine Therapy91

УДК 681.5:621.165

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭРОЗИИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

К.В. Дергачев

Брянский государственный технический университет, г. Брянск



Рассматриваются структура, функциональная схема работы и характеристики вычислительного комплекса, предназначенного для прогнозирования процесса эрозионного изнашивания рабочих лопаток турбин атомных электростанций.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и на протяжении всего жизненного цикла влажно-паровых турбин ставится задача обеспечения высокой степени их надежности, безопасности и экономичности.

В турбинах АЭС поток влажного пара оказывает сильное эрозионное воздействие на входные кромки рабочих лопаток 2-3 последних ступеней цилиндра низкого давления. Их изнашивание часто приводит к возникновению на отдельных режимах работы повышенных вибраций, которые могут повлечь за собой образование усталостных трещин и отрыв лопатки. Кроме этого, эрозия элементов проточной части, главным образом, рабочего облопачивания, влечет за собой существенное снижение экономических показателей влажно-паровых турбин.

Обеспечение безопасности, надежности и экономичности влажно-паровых турбоустановок осуществляется посредством проведения плановых остановов для их осмотра и ремонта. Чаще всего график осмотров новой турбины составляется на основе опыта эксплуатации и проведения замеров. Недостатками такого эмпирического подхода являются его низкая оперативность и недостаточно полный учет влияния режимных, конструкционных и материаловедческих особенностей вводимой в эксплуатацию турбины на процесс эрозионного изнашивания ее деталей, приводящий к нецелесообразным остановам или к увеличению стоимости ремонта, вследствие развившихся дефектов.

Повышение экономической эффективности эксплуатации при заданных параметрах надежности и безопасности, предъявляемых к объектам ядерных энергетических установок, может быть достигнуто за счет использования методов и средств оперативного контроля эрозионного состояния [1]. Наибольшей степенью оперативности и точности обладают диагностирующие и прогнозирующие системы.

Диагностирующие системы, рассмотренные в [2], позволяют по одному или нескольким косвенным признакам (газодинамические параметры, вибрация и др.) выявлять геометрические изменения входных кромок. Однако диагностические методы используются, в основном, для распознавания эрозионного состояния лопаточного аппарата в

текущий момент времени и не могут быть использованы на этапе проектирования турбины для расчета ее будущего эрозионного состояния. Прогнозирующие системы, в свою очередь, позволяют моделировать процесс эрозии, узнавать параметры износа лопатки в любой момент времени, планировать оптимальный график ремонтов и помогают подбирать безопасные режимы работы турбины. Достоверность и полнота результатов расчетов, производимых прогнозирующими системами, напрямую зависит от точности математических методов и моделей, выбранных для описания газодинамических и эрозионных процессов. Высокой точности и скорости расчетов в таких сложных вычислительных задачах можно достичь при помощи автоматизации процесса расчета на современных компьютерах.

Таким образом, наиболее предпочтительным средством контроля в целях повышения эффективности и надежности турбин АЭС является электронная система прогнозирования эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

К системам, моделирующим эрозионные процессы, предъявляются особые требования, обусловленные пространственно-временной и режимной неоднородностью процесса изнашивания поверхности материала. Случайный характер параметров ударного нагружения входных кромок капельным потоком делает необходимым проведение их дискретизации. Поверхность лопатки необходимо разбивать на микроплощадки, в пределах каждой из которых свойства материала и параметры нагружения считаются однородными. Спектр эрозионно опасных капель должен быть разделен на фракции, характеризующиеся средним диаметром капель. Среди многообразия режимов работы турбины нужно выделить несколько наиболее часто используемых; при этом весь расчетный временной отрезок работы турбины необходимо разбить на несколько более мелких. Для получения достоверных результатов расчета при моделировании процесса эрозионного изнашивания рабочих лопаток турбомашин дискретизация указанных параметров должна быть как можно более мелкомасштабной. Такой подход определяет высокие требования к скорости работы вычислительной системы и объему памяти необходимых для обработки и хранения массивов параметров эрозионно ударного воздействия. Несколько лет назад этим требованиям удовлетворяли, в основном, дорогостоящие супер-ЭВМ, стоимость которых была сравнима со стоимостью всего турбинного агрегата. Прогнозирующие системы, созданные в то время, для использования на более распространенных микроЭВМ отличались чрезмерным упрощением и неточностью модели износа, неудобным интерфейсом и низкой скоростью работы. Современные серийно выпускаемые компьютеры общедоступны; при этом они обладают достаточным быстродействием и объемом памяти для достоверного моделирования кинетики эрозионных процессов.

Ввиду этого актуальной представляется задача разработки алгоритмического, информационного и программного обеспечений необходимых для точного прогнозирования эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток с использованием средств современной вычислительной техники.

ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Разрабатываемая система должна выполнять следующие функции:

- удобный ввод и редактирование исходных данных по геометрии, материалам лопаток и газодинамике турбины;
- хранение исходной информации и результатов расчетов по всем типам рассчитанных ранее турбин в базах данных;

- подробный расчет геометрических характеристик лопатки и ее пространственную дискретизацию;
- моделирование движения парового потока и частиц эродента в межвенцовом зазоре;
- расчет кинетики эрозионного изнашивания входных кромок рабочих лопаток турбомашин;
- расчет количественных характеристик эрозионного повреждения лопаток за указанный промежуток времени;
- вывод результатов расчета в виде графических изображений, текста и таблиц на экран монитора.

Структурно-функциональная схема программы представлена на рис. 1.

АЛГОРИТМ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для прогнозирования эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток турбомашин необходимо выполнить следующие этапы.

- Ввод исходных данных:
 - ввод исходных газодинамических данных по турбине или выбор турбины, сведения о которой уже внесены в базы исходных данных системы (рис. 2);
 - ввод данных о геометрии рабочей лопатки или выбор данных из баз данных геометрических характеристик (геометрия может быть задана координатами точек или дугами окружностей образующими профили поперечных сечений лопатки);
 - ввод информации о параметрах и свойствах противозэрозионной защиты лопаток при помощи выбора данных из баз физических свойств материалов;
 - ввод данных о переменных режимах работы турбоагрегата и их относительной продолжительности.
- Моделирование движения капельных потоков и их взаимодействия с поверхностью рабочей лопатки:
 - проведение пространственной дискретизации эродируемой лопатки турбины и расчет ее геометрических характеристик;
 - моделирование движения парового потока и расчет его параметров;
 - моделирование формирования, движения и воздействия капельных потоков эродента на поверхность лопатки.
- Расчет количественных характеристик эрозионно усталостного повреждения с учетом эрозионно усталостных свойств материала.
- Вывод информации о прогнозируемом эрозионном состоянии лопатки.

В результате проведения пространственной дискретизации вся поверхность рабочей лопатки разбивается на микроплощадки. Координаты их центров рассчитываются при помощи интерполяции координат точек базовых профилей и сохраняются в базе геометрических данных. После этого на экран выводятся полученные промежуточные профили лопатки. В качестве интерполирующего алгоритма используется кубический сплайн.

Моделирование процесса расширения пара в турбинной ступени осуществляется на основе алгоритмов газодинамических расчетов, приведенных в [3]. Согласно данной методике кольцевое сечение проточной части разбивается на ряд тонких концентрических кольцевых слоев - струек. В каждом из них на основании газодинамических расчетов определяются параметры движения двухфазного рабочего тела. К их числу относятся действительные и относительные скорости движения пара, их углы входа в рабочий аппарат, влажность в межвенцовом зазоре, масса капельной влаги, достигающей рабочей лопатки и др. Совокупность данных параметров, рассчитанных для номинального и ряда дискретно заданных частичных режимов работы турбомашин, дает пол-

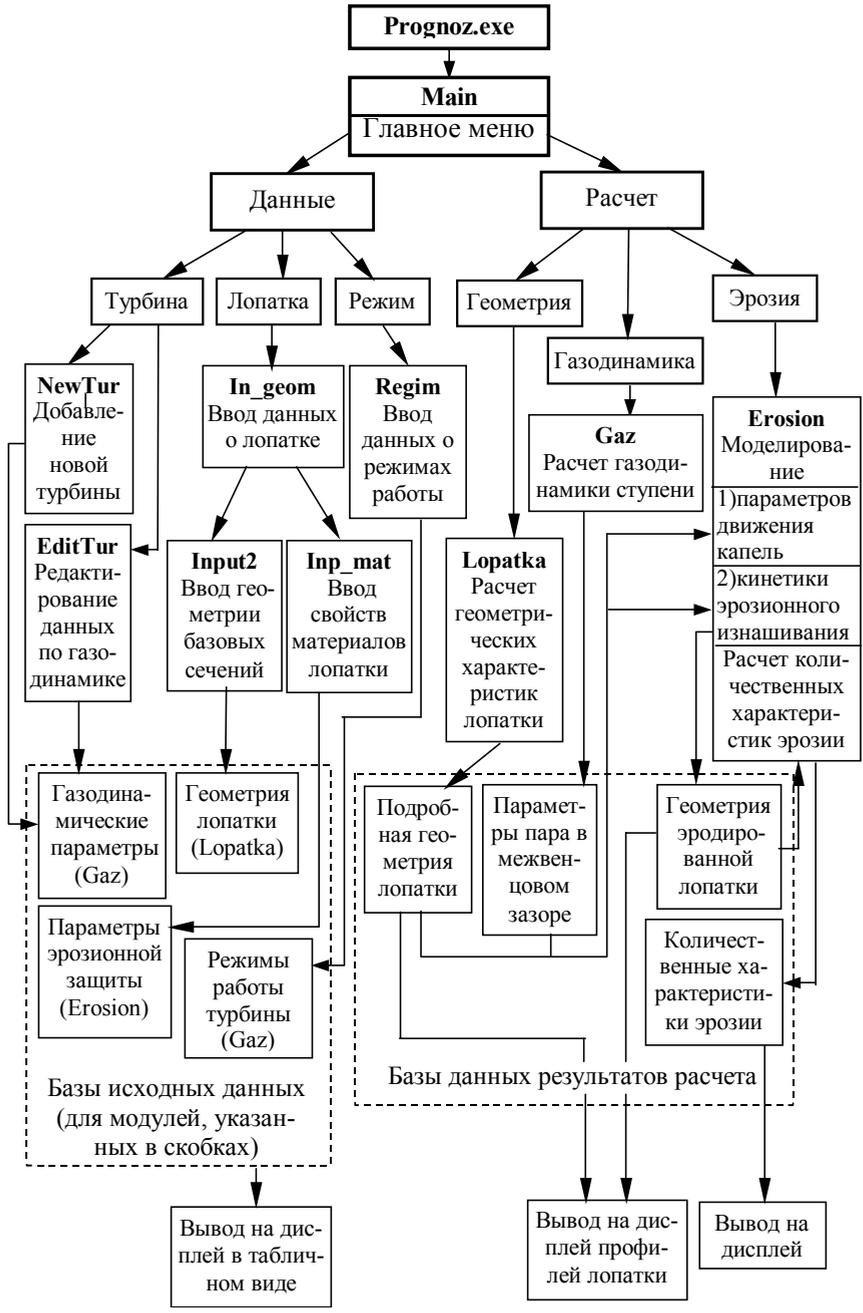


Рис. 1. Структурно-функциональная схема электронной системы прогнозирования

ную исходную информацию о газодинамическом состоянии рабочего тела в ступени.

После расчета газодинамики ступени выполняется построение эпюр распределения по поверхности эродирующих рабочих лопаток кинематических параметров ударного воздействия эрозионно опасных фракций капель, исходя из математической модели кинематики полидисперсного двухфазного потока частиц эрودента в турбинной ступени.

Для определения диапазона радиусов эрозионно опасных капель оценивается

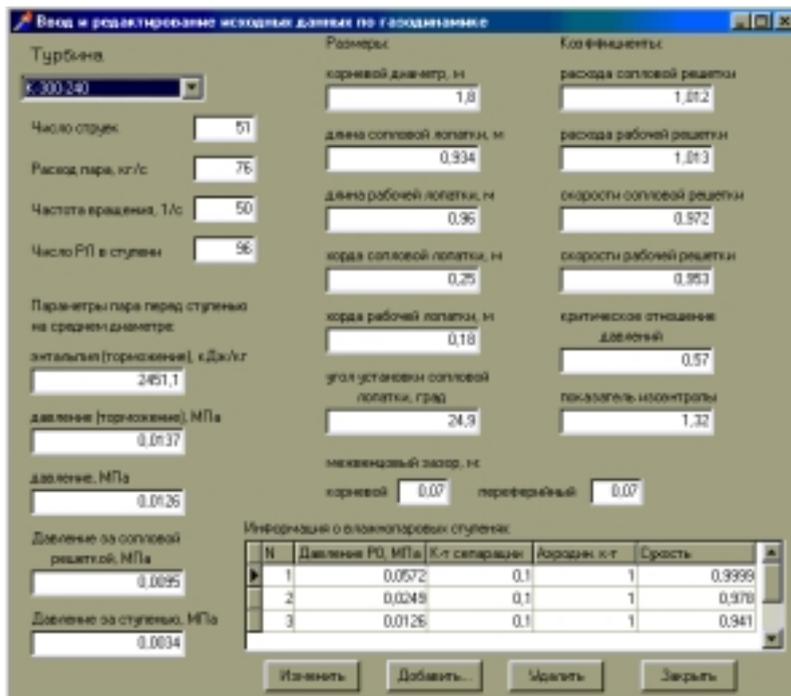


Рис. 2. Окно ввода газодинамических данных

максимальный радиус капли в потоке кромочного следа за сопловой решеткой в каждой из струек по высоте лопатки. При расчете движения частиц жидкого эродента моделируется явление дробления капель газовым потоком. Количественно условие дробления характеризуется критерием Вебера, при достижении критической величины которого ($We_{кр}=14$) происходит распад эрозионно опасной капли.

Движение капли в кромочном следе описывается уравнением [4, с. 95]

$$\frac{dc'}{dt} = \frac{3}{8} \frac{C_x(c-c')|c-c'|}{\rho' v c' r_k}, \quad (1)$$

где c и c' – скорости кромочного следа и капли; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления капель; ρ' – плотность эродента; v – удельный объем пара в струйке; r_k – радиус капли.

Численно решая дифференциальное уравнение (1) методом Кутты-Мерсона, итерационно определяется максимальный радиус капли, не подвергшейся разрушению до столкновения с поверхностью рабочей лопатки. Одновременно рассчитываются абсолютные скорости движения капель различных фракций и из треугольника скоростей определяются относительная скорость и угол их входа в рабочий аппарат.

Для расчета количественных характеристик эрозии рабочих лопаток в системе используется математическая модель эрозионно усталостного повреждения материалов [5]. Она основана на гипотезе о том, что в основе механических видов эрозионного разрушения поверхности твердых тел лежит механизм многоциклового усталости, который приводит к накоплению в микрообъемах материала необратимых структурных изменений. Чтобы определить суммарное усталостное повреждение любой точки, лежащей на поверхности рабочей лопатки, в математической модели вычислительного комплекса используется линейная гипотеза суммирования эрозионных повреждений, которая позволяет связать время до начала разрушения с условиями эрозионного нагружения.

Суммарное усталостное повреждение слоя материала с единичной площадью поверхности за единицу времени от всех групп эрозионно опасных капель во всем диапазоне нагрузок турбины может быть найдено по формуле

$$D = N_{\text{э}0}^{-1} \int_0^{N_{\text{max}}} \tau(N) \int_{r_1}^{r_2} \left(\left(\frac{r_k}{W_R} \right)^{1,5} V_n' (V_R')^2 \right)^{m_{\text{э}}} n(r_k) b^{-1} \cos \varphi \, dr_k \, dN, \quad (2)$$

где $\tau(N)$ – функция, определяющая долю работы турбины при нагрузке N по отношению к общему времени ее работы; $W_R, N_{\text{э}0}, m_{\text{э}}$ – эрозионно усталостные характеристики материала: пороговый эрозионный комплекс, абсцисса точки перелома кривой эрозии и показатель наклона левой ветви кривой эрозии соответственно; V_R' – скоростной эквивалент динамического предела выносливости; V_n' – нормальная составляющая скорости капли; $n(r_k)$ – функция распределения числа капель по радиусам (нормальное распределение); b – ширина полосы эрозионно опасного потока, достигающего одной входной кромки; φ – угол между нормалью к поверхности лопатки и направлением скорости падения капли; N_{max} – максимальная мощность, развиваемая турбиной; r_1 – радиус минимальных эрозионно опасных капель; r_2 – радиус максимальных капель, достигающих входной кромки.

При прогнозировании учитываются только эрозионно опасные фракции капель, т.е. фракции, для которых справедливо условие

$$V_n'^2 r_k \geq W_R. \quad (3)$$

Величины эрозионных свойств $W_R, N_{\text{э}0}, m$ материала микроплощадки являются случайными вследствие статистической неоднородности материала поверхностного слоя лопатки. Распределения этих свойств являются нормальными, а их стандартные отклонения вычисляются по методу Монте-Карло.

Определив параметры каплеударного нагружения эрозионно опасными потоками капельной влаги и суммарное повреждение каждой микроплощадки поверхности рабочей лопатки, переходим к расчету длительности инкубационного периода каждой микроплощадки поверхности рабочей лопатки:

$$\tau_{\text{и}} = D^{-1}. \quad (4)$$

Скорости износа во втором (максимальном) и в третьем (установившемся) периодах зависят от эрозионно усталостных свойств материала лопатки, инвариантных по отношению к условиям каплеударного нагружения и от значения $\tau_{\text{и}}$. Для их нахождения в прогнозирующей системе использовались зависимости, приведенные в [5, 6].

Показатели процесса эрозии для каждой микроплощадки поверхности рабочей лопатки позволяют построить кинетические кривые износа (рис. 3). На основе композиции всего множества кинетических кривых определяется широкая номенклатура количественных характеристик эрозионного износа лопаток, в частности общий объем и масса изношенного материала, ширина зоны износа в любом расчетном сечении, глубина износа в каждой расчетной точке в произвольный момент времени, уменьшение хорды профиля и др. Вид эродированных профилей рабочей лопатки выводится на экран монитора (рис. 4).

Таким образом, на основании математического описания эрозии реализован моделирующий алгоритм, имитирующий процессы эрозионного разрушения.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Большинство известных в настоящее время систем моделирования эрозионного изнашивания созданы при помощи средств разработки для операционной системы MS DOS.

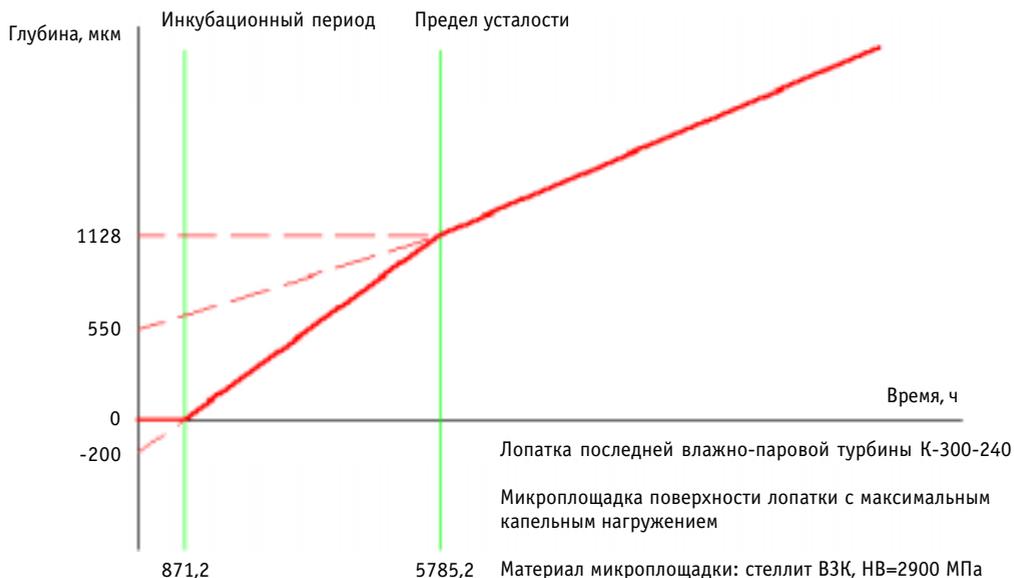


Рис. 3. Прогнозируемая кинетическая кривая эрозии

Вследствие того, что DOS реально позволяет использовать прикладным программам не более 1 Мб оперативной памяти, такие системы не способны обеспечить достаточную дискретизацию физических процессов и дают неудовлетворительную по точности информацию о кинетике эрозии. Такие вычислительные программы также характеризуются длительным процессом расчета по сравнению с системами для Windows, а также недостаточно удобным пользовательским интерфейсом.

Необходимый уровень дискретизации и повышение уровня удобства работы обеспечиваются разработкой прогнозирующего вычислительного комплекса, предназначенного для функционирования в системе Windows на современных персональных компьютерах.

В качестве среды разработки электронной системы прогнозирования была использована инструментальная среда разработки программ Borland Delphi 3 для Windows 9x, сочетающая в себе визуальные средства программирования и высокую скорость работы. Программы, разработанные в этой среде, позволяют преодолеть все названные выше недостатки систем для MS-DOS. Использование объектно-ориентированной системы Delphi и языка Object Pascal в качестве средства разработки прогнозирующего вычислительного комплекса позволило повысить точность расчетов за счет использования больших размерностей массивов и создать графический интуитивно понятный интерфейс, ориентированный на использование многоуровневого меню. Исходные, промежуточные и результирующие данные всех этапов расчета хранятся в реляционных базах данных Paradox, поэтому существует возможность накопления и анализа информации по процессу эрозии лопаточного аппарата многих типов турбомашин.

Система прогнозирования имеет иерархическую модульную структуру (рис. 1). Исполняемый файл Prognosz.exe вызывает центральный модуль системы (Main), управляющий главным меню вычислительного комплекса. Функции наполнения системы информацией, моделирования физических процессов и вывода результатов прогнозирования возложены на меню «Данные» и «Расчет». Остальные пункты главного меню, такие как «Помощь» и «Выход» являются вспомогательными.

В меню «Данные» содержатся пункты меню второго уровня, вызывающие исполнение модулей интерактивного ввода исходных данных. Газодинамические данные и гео-

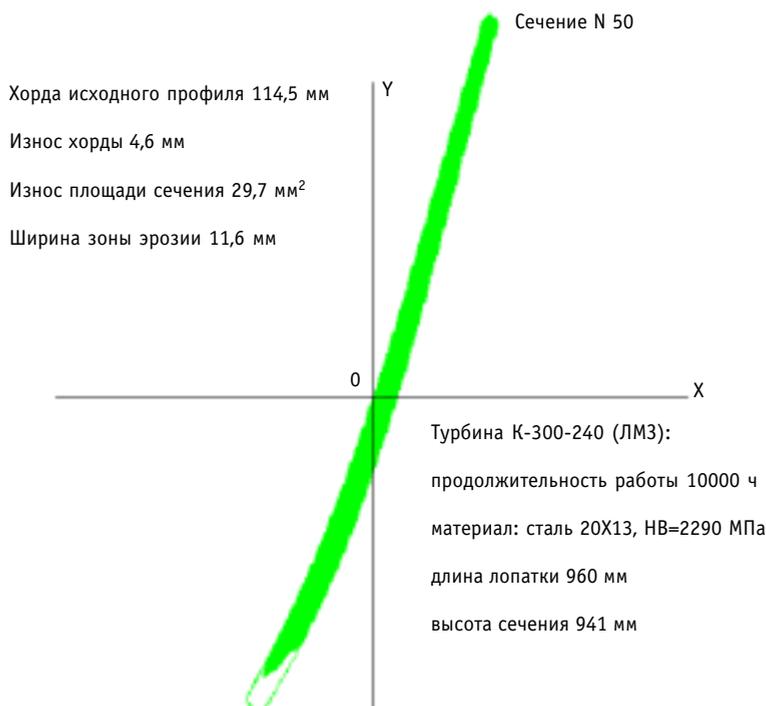


Рис. 4. Прогнозируемое состояние профиля рабочей лопатки

метрия проточной части турбины задаются в меню «Турбина» посредством модулей EditTur и NewTur. Интерфейсная часть модуля EditTur (рис. 2) позволяет выбрать турбину для моделирования и прогнозирования, отредактировать ее параметры и удалить ненужные данные. Если необходимой для моделирования турбины нет в списке, то ее можно в него добавить при помощи модуля NewTur. Геометрия основных сечений рабочей лопатки и параметры эрозионной защиты задаются посредством меню «Лопатка». Данный пункт активизирует модуль In_geom, содержащий информацию по параметрам микроплощадок. Из него, в свою очередь, может быть вызван модуль Input2, отвечающий за наполнение и редактирование баз геометрических характеристик сечений, заданных по точкам или дугами окружностей, и модуль Inp_mat, содержащий информацию о материалах лопаток турбин и их эрозионной защите. Режимы работы турбины задаются в меню «Режим», использующем процедуры модуля Regim. В этом окне вводится расход пара и параметры, известные за последней ступенью (давление, энтальпия, температура, степень сухости), и частота вращения ротора.

Меню «Расчет» содержит подменю, активизирующие исполнение модулей расчетного характера. Пункт меню «Геометрия» вызывает процедуры модуля Lopatka, производящие подробную пространственную дискретизацию поверхности рабочей лопатки, на основе данных, полученных из модуля Input2, вывод полученных профилей на экран и сохранение найденных координат микроплощадок в базе результатов Rezgeom2.db. Продолжительность расчета по пункту «Геометрия» составляет 40-50% общего времени всех расчетов.

Меню «Газодинамика» выполняет процедуры газодинамических расчетов турбинной ступени, находящиеся в модуле Gaz. Данный модуль рассчитывает параметры пара перед рабочим колесом и выводит их в табличном виде. Результаты газодинамических расчетов для каждой струйки заносятся в базу Rez_nom.db – для номинального режи-

ма и в Rez_var.db – для переменного режима работы турбины. Удельная продолжительность газодинамических расчетов не превышает 10%.

Пункт «Эрозия» исполняет код модуля Erosion, состоящий из процедур моделирования параметров движения капель, кинетики эрозионного изнашивания и расчета количественных характеристик эрозии. При моделировании используются данные из базы эрозионно усталостных характеристик материала лопатки, результатов пространственной дискретизации и результатов расчета газодинамики. Координаты микроплощадок эродированного профиля после прогнозирования сохраняются в базе Rez_eros.db. Указанные процедуры исполняются приблизительно за 40% общего времени расчетов.

Большое количество записей в базах результатов Rezgeom2.db и Rez_eros.db во многом определяет размер свободного дискового пространства, необходимого для установки прогнозирующей системы. Для записи координат микроплощадок каждой, введенной в систему, лопатки на диске необходимо около 2 Мб.

Процессы ввода исходных данных, проведения расчетов и обработки их результатов облегчены интуитивно понятной системой всплывающих подсказок. Такие подсказки существуют для всех таблиц, в которых производится редактирование данных, для таблиц результатов и для кнопок, выполняющих функции редактирования и расчета. Они содержат в себе подробную информацию о полях таблиц, разъяснения по функциям кнопок и др.

Использование графического интерфейса, объем баз данных по эрозионному износу и необходимость высокой скорости и точности расчетов определяют основные требования к компьютеру: процессор Intel Pentium 200, оперативная память 32 Мб, свободное дисковое пространство 30 Мб, видеоадаптер и монитор SVGA (800x600), мышь, операционная среда Windows 95/98, система для работы с базами данных DataBase Desktop7.

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Электронная система прогнозирования прошла тестовые испытания по расчету эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток последней ступени цилиндра низкого давления турбины К300-240 ЛМЗ.

Полученные в результате газодинамических расчетов турбин различных типоразмеров параметры пара были проверены по hs-диаграммам. Отклонения составили менее 3%. Расчет скоростей и направлений потоков пара для ступеней судовых и конденсационных паровых турбин электростанций показал приемлемое соответствие данным, приведенным в [3, 7]. Максимальные размеры и относительные скорости эрозионно опасных капель потока, полученные в моделях последних влажно-паровых ступеней

Таблица 1

Сравнительные данные по эрозии рабочих лопаток последних турбинных ступеней

Турбина	Время, тыс. ч.	Среднестатистическая ширина зоны эрозии, мм		Среднестатистический износ хорды профиля, мм	
		реальная	расчетная	реальный	расчетный
К-300-240 ЛМЗ Сырдарьинской ГРЭС	20	12,3	12,1	5,5	5,7
К-300-240 ЛМЗ Костромской ГРЭС	55	24,9	24,6	14,3	14,6
Турбина №2 атомного ледокола «Ленин», (закалка ТВЧ стали 12Х13)	30	4,8	5,0	0,34	0,41
Турбина №3 атомного ледокола «Ленин», (хромовое покрытие лопаток)	20	2,8	3,1	0,90	1,05

различных турбин, совпадают с экспериментальными данными [7-9].

Итоговым результатом расчета являются прогнозируемые геометрические характеристики эродируемых профилей рабочих лопаток. Они достаточно точно совпадают (табл. 1) со среднестатистическими данными замеров, приведенных в работах [7, 9].

Расчетные прогнозы эрозионного состояния турбинных ступеней подтвердили экспериментальные данные о влиянии режимных, конструкционных и материаловедческих параметров ступени на ее эрозию. В частности, было проверено, что увеличение осевого зазора снижает эрозионный износ входных кромок рабочего аппарата.

Результаты тестирования системы и приемлемое совпадение прогнозов с экспериментом свидетельствуют о достоверности реализованных математических моделей и методов.

ВЫВОД

Наиболее предпочтительным средством автоматизированного контроля эрозионного состояния деталей турбин АЭС является применение электронных систем прогнозирования.

В данной работе решена задача разработки алгоритмического и программного обеспечения для прогнозирования эрозионного износа входных кромок рабочих лопаток. Программная реализация системы прогнозирования обеспечивает удобный ввод и редактирование исходных данных, хранение информации в базах данных, расчет геометрических характеристик лопатки, моделирование движения парового потока и частиц эродента, расчет кинетики эрозионного изнашивания и количественных характеристик эрозионного повреждения рабочих лопаток, вывод результатов расчета на экран монитора и на печать.

Удовлетворительное соответствие экспериментальным данным характеристик и возможностей электронной прогнозирующей системы свидетельствуют о целесообразности ее внедрения для прогнозирования технического состояния влажно-паровых турбомашин АЭС. Использование такой системы при проектировании и эксплуатации турбин позволит избежать необоснованных простоев и обеспечить высокую степень их надежности.

Литература

1. Хаимов В.А., Храбров П.В., Марченко Ю.А., Котляр О.Е. Эрозионные процессы лопаточного аппарата и задачи диагностического контроля//Труды ЦКТИ. – 1992. - Вып. 273. - С. 84-92.
2. Жуковский Г.В., Марченко Ю.А., Терентьев И.К. Тепловые расчеты паровых и газовых турбин с помощью ЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1983. – 255 с.
3. Паровые и газовые турбины: Сборник задач / Под ред. Б.М. Трояновского, Г.С. Самойловича – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 235 с.
4. Носовицкий А.И., Шпензер Г.Г. Газодинамика влажно-паровых турбинных ступеней. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
5. Фаддеев И.П., Лагерева А.В. Прогнозирование процесса эрозии рабочих лопаток судовых турбин//Судостроение. - 1989. - № 5. - С.18-20.
6. Stanisa B., Povarov O., Rizenkov V. A. Osnovne zakonitosti erozije materijala lopatica parnih turbina pri sudaranju s vodenim kapljicama. Процесс эрозии материала лопаток паровых турбин при ударном воздействии капель воды// Strojarstvo. - 1985. - Т. 27. - № 6. - С. 313-318. (серб.)
7. Мокравцов М.В. Эрозионный износ рабочих лопаток влажно-паровых ступеней ЧНД турбин и перспективные методы его снижения: Дис. к.т.н. - С-Пб.: СПбГТУ, 1991.

8. Казак М.А., Альфер Б.В., Фаддеев И.П., Радик С.В. Прогнозирование эрозии лопаток судовых турбин низкого давления//Судостроение. - 1975. - №4. - С. 18-20.

9. Казак М.А., Фаддеев И.П. Состояние проточной части турбин судовых ГТА в процессе длительной эксплуатации//Энергомашиностроение. - 1974. - №10. - С. 7-9.

Поступила в редакцию 30.05.2001

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА СК26 НА БАЗЕ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ

С.В. Михайлов

Обнинский институт атомной энергетики



В работе представлена методика проектирования ядра ультразвукового дефектоскопа СК26 в виде многопроцессорной системы на базе цифровых сигнальных процессоров ADSP-21XX. Предложена классификация локальной магистрали многопроцессорной системы.

В настоящее время контроль состояния технологических каналов (верхних и нижних переходников, а также циркониевых частей) реакторов РБМК выполняется при помощи ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов, например, "Tomoscan", "Krautkramer" и СК26. Выигрыш тендера шведскими специалистами позволил им внедрить на Игналинской АЭС УЗ-дефектоскоп канадской фирмы "Tomoscan". Этот высокоскоростной дефектоскоп выполнен на базе микропроцессора 68040 (33 МГц, 64 Мб ОЗУ) фирмы "Motorola" и по сравнению с выше перечисленными имеет следующие достоинства: УЗ-данные полностью записываются в течение всего такта зондирования; благодаря высокой производительности допускается вторичное вхождение в канал при обнаружении дефекта, тогда как у СК26 для этой цели используется режим автоматического слежения дефектов (АСД), т.е. после срабатывания АСД оператор сам решает, нужно ли снизить скорость зондирования для более качественного съема УЗ-данных. Стационарная универсальная (использующая ультразвуковой и токовихревой методы) УЗ-дефектоскопическая система западногерманской фирмы "Krautkramer" была внедрена японскими специалистами в 1999 г. на Ленинградской АЭС. В настоящее время она почти не используется из-за ее громоздкости и необходимости нахождения обслуживающего персонала в грязной зоне (на "пятаке"). Четырехплатный аналоговый 16-канальный УЗ-дефектоскоп СК26 впервые был внедрен в производственный процесс на Ленинградской АЭС в 1996 г. Немного позднее различные модификации СК26 (уже двухплатные, цифровые, на базе микропроцессора ADSP-21061) были внедрены на Курской и Смоленской АЭС, например, в 1998 г. на Курской АЭС при помощи СК26 было проконтролировано около 1600 технологических каналов, а в 2001 г. там же – около 2000.

СК26 имеет ряд существенных недостатков: ущербная обработка УЗ-данных (например, отсутствует их фильтрация); УЗ-данные снимаются не в течение всего такта зондирования, а лишь в течение некоторого действительного интервала времени (это снижает качество УЗ-зондирования); нецелесообразное использование аппаратных ресурсов, например, часть времени микропроцессор СК26 тратит на увеличение пропускной способности канала связи с персональным компьютером (формирование дельта-кода передаваемых данных), а не на их обработку. Основной причиной этих недостатков

© С.В. Михайлов, 2001

является низкая производительность ядра СК26. Ядром называется модуль управления (модуль запускает такт зондирования и формирует его контрольные параметры, т.е. длительность, частоту оцифровки, усиление, частоту следования зондирующих импульсов и др.) и сбора информации. Существуют несколько способов увеличения производительности ядра: увеличение числа микропроцессоров общего назначения; использование микропроцессора со сверхвысокой тактовой частотой; использование микропроцессора специального назначения. Наиболее приемлемым из них является первый способ [1]. Настоящая работа посвящена решению проблем, связанных с проектированием ядра УЗ-дефектоскопа СК26 в виде многопроцессорной системы (МПС) на базе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) семейства ADSP-21XX.

В процессе контроля технологического канала работа многопроцессорного ядра разбивается на периодически повторяющиеся циклы (итерации), состоящие из фаз вычисления и обмена. В фазе вычисления ядро зондирует участок технологического канала (в течение нескольких тактов зондирования, число которых равно количеству ультразвуковых датчиков (УЗД) в подвеске - механизме транспортировки зондирующей части торпеды), читает, обрабатывает и передает в персональный компьютер (ПК) данные, снимаемые с УЗД, а в фазе обмена ядро выполняет внутренний обмен данными между ЦСП по локальным магистралям (ЛМ) МПС.

Ядро УЗ-дефектоскопа предлагается разработать в соответствии с методикой проектирования МПС, состоящей из четырех основных этапов:

- расчет исходных параметров;
- отбор из семейства ADSP-21XX наиболее подходящих ЦСП;
- расчет количества ЦСП в МПС в зависимости от типа ЛМ для каждого отобранного ЦСП;
- выбор оптимальной архитектуры МПС.

На первом этапе методики определяются следующие исходные параметры: T_{um} – длительность итерации; D_u – количество исходных данных; D_p – количество результирующих данных; V_{noc} – объем последовательных вычислений; $V_{пар}$ – объем параллельных вычислений.

Параметр T_{um} отражает максимальное время, отводимое МПС для выполнения фаз вычисления и обмена. Значение этого параметра зависит от условий технического задания, предъявляемого к ядру, и рассчитывается по формуле

$$T_{um} = \frac{L}{2\pi R \cdot \omega},$$

где L – путь продольного прохождения подвески в течение одного цикла, мм; R – внутренний радиус технологического канала, мм; ω – угловая скорость вращения подвески, об/с. Для СК26 ($R = 80$ мм, $\omega = 1.2$ об/с) $T_{um} = 1.66$ мс при $L = 1$ мм (согласно “Методике ультразвукового контроля РБМК”, разработанной в НИКИМТ).

Параметр D_u отражает максимальное количество исходных данных (16-разрядных слов), которые МПС должна обработать в фазе вычисления (данных, считываемых с УЗД в течение всего цикла). Параметр D_p отражает максимальное количество результирующих данных (также 16-разрядных слов), которые получаются в МПС после обработки исходных данных. К ним относятся видеоданные - данные, предназначенные для визуального наблюдения дефектоскопистом результатов оцифровки сигнала УЗД на экране монитора ПК, - количество которых приблизительно равно количеству исходных данных. Значение параметров D_u и D_p рассчитывается по формуле

$$D_p \approx D_u = q_d \cdot t_s \cdot f_0,$$

где q_d – количество УЗД в подвеске; t_s – максимально возможная длительность стро-

ба (в целях экономии аппаратных ресурсов исходные данные снимают не в течение всего такта зондирования, а лишь в течение некоторого интервала времени, называемого стробом); f_0 – частота оцифровки, т.е. частота съема исходных данных, линейно зависящая от резонансной частоты УЗД. Для СК26 ($q_{\partial} = 16$) $D_u = D_p = 3200$ слов при $t_s = 20$ мкс и $f_0 = 10$ МГц (согласно “Методике ультразвукового контроля РБМК”).

Параметр V_{noc} отражает количество машинных циклов, которые должен сделать ЦСП в однопроцессорной системе для выполнения в фазе вычисления действий, не поддающихся распараллеливанию. К таким действиям относятся зондирование участка технологического канала, чтение исходных и передача в ПК результирующих данных. Параметр $V_{пар}$, наоборот, отражает количество машинных циклов, которые необходимы для выполнения действий, поддающихся распараллеливанию. Поскольку к этим действиям относится только обработка исходных данных, то в целях упрощения получения параметра $V_{пар}$ его следует представить в виде

$$V_{пар} = D_u \cdot V'_{пар}, \tag{1}$$

где $V'_{пар}$ – количество машинных циклов, необходимых ЦСП для обработки одного исходного данного. Для СК26 $V_{noc} = 37425$ циклов, $V'_{пар} = 40$ циклов. Эти значения получены в результате моделирования на симуляторе “SIM2181.EXE” участка программы, отвечающей за работу ядра в фазе вычисления.

На втором этапе методики производится отбор наиболее подходящих ЦСП для МПС по следующим критериям: объем внутренней памяти программ – M_n и данных – M_{∂} , количество внешних источников прерывания, наличие дополнительных возможностей (флагов ввода-вывода, контроллера прямого доступа памяти (ПДП)). Например, отсутствие в ЦСП ПДП делает его не пригодным для использования в МПС с ЛМ параллельного типа. На рис.1 приведена классификация ЛМ для МПС на базе ЦСП семейства ADSP-21XX, полученная из [2-4]. В предложенной классификации способ связи ЦСП в МПС зависит от вида обмена данными между ЦСП, числа шин ЛМ, типа соединений ЦСП и разрядности шин ЛМ. В связи с функциональными особенностями используемого семейства ЦСП в эту классификацию не вошли такие широко известные типы соединений

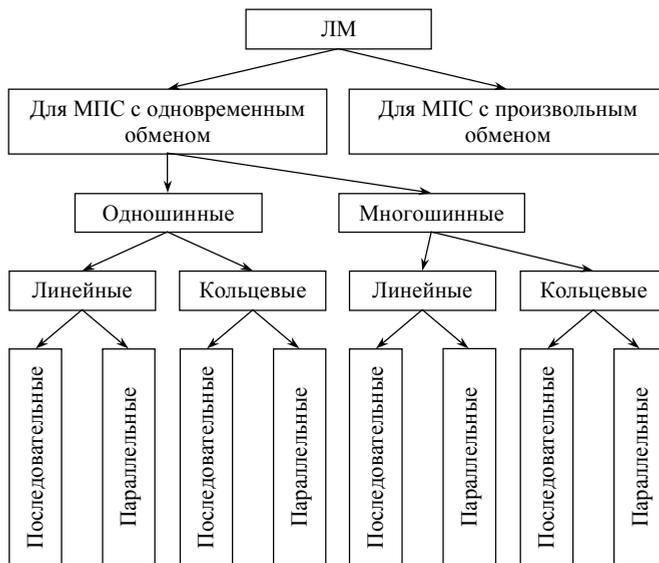


Рис.1. Классификация ЛМ для МПС на базе ЦСП семейства ADSP-21XX

микропроцессоров как звездообразный, древовидный и полносвязный. Приведенная ниже табл. 1 упрощает выбор оптимального типа ЛМ. Анализ этой классификации показывает, что наибольший интерес представляет МПС с одновременным обменом, с одношинной кольцевой ЛМ последовательного или параллельного типа, а также с многошинной линейной ЛМ параллельного типа. Первые два типа ЛМ обладают средней производительностью и лишены микросхем обвязки (это увеличивает надежность и уменьшает их стоимость). Третий тип ЛМ обладает максимальной производительностью, но уступает по надежности, стоимости и площади печатной платы. Результаты исследований (функциональные схемы, алгоритмы работы, формулы для расчета произво-

Таблица 1

Рекомендации по выбору оптимального типа ЛМ для МПС

Конструктив ЛМ	Рекомендации	Комментарий
Одношинная или многошинная	Одношинная ЛМ выбирается, если длительность фазы вычисления для нее значительно больше (на порядок) длительности фазы обмена, в противном случае выбирается многошинная ЛМ	Не имеет смысла уменьшать длительность фазы обмена, когда она и так мала по сравнению с длительностью итерации, тем более, что введение многошинной ЛМ многократно усложнит аппаратную часть МПС
Линейная или кольцевая	Кольцевая ЛМ выбирается, если магистраль с ней содержит не более двух шин. В противном случае выбирается линейная ЛМ	В МПС с одношинной или двухшинной кольцевой ЛМ отсутствуют коммутационные микросхемы обвязки в отличие от МПС с линейной ЛМ
Последовательная или параллельная	Последовательная ЛМ выбирается, если количество данных, передаваемых по ЛМ, значительно меньше длительности фазы вычисления, рассчитанной в машинных циклах ЦСП. В противном случае выбирается параллельная ЛМ	Чем меньше количество передаваемых данных, тем меньше сказывается низкая пропускная способность последовательной ЛМ (по сравнению с параллельной ЛМ) на производительность МПС в целом

дительности ЛМ, их анализ) ЛМ таких МПС представлены в [2 - 4].

Очевидно, что объем внутренней памяти выбираемого ЦСП должен удовлетворять выражениям

$$M_n > C_{выч} + C_{обм} \tag{2}$$

$$M_d > D_u + D_p + D_{выч} + D_{обм} \tag{3}$$

где $C_{выч}$, $C_{обм}$ – объемы участков программы (количества машинных команд ЦСП), отвечающих за поддержку фаз вычисления и обмена соответственно; $D_{выч}$, $D_{обм}$ – количества вспомогательных данных, предназначенных для временного хранения промежуточных значений в фазах вычисления и обмена соответственно. Значения $C_{выч}$ и $D_{выч}$ можно получить из анализа программы, написанной на первом этапе. Для СК26 значения $C_{обм}$ и $D_{обм}$, полученные в результате анализа рекомендованных ЛМ [2-4], сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения $C_{обм}$ и $D_{обм}$ в зависимости от типа ЛМ

Тип ЛМ	$C_{обм}$	$D_{обм}$
Одношинная кольцевая последовательная	64	$2 + D_n \cdot (1 - 1/N)$
Одношинная кольцевая параллельная	48	$2 + D_n \cdot (1 - 1/N)$
Многошинная линейная параллельная	51	5

Для наглядного представления данных и их дальнейшего анализа удобно воспользоваться табл. 3. Так, для СК26 все ЦСП из семейства ADSP-21XX, удовлетворяющие выше перечисленным критериям, занесены в столбец «Процессор» табл. 3. Остальные столбцы этой таблицы будут заполнены в ходе выполнения следующе-

Таблица 3

Количество ЦСП в МПС в зависимости от типа ЛМ и ЦСП

Процессор	Тип ЛМ		
	Одношннная кольцевая последовательная	Одношннная кольцевая параллельная	Многошннная линейная параллельная
ADSP-2191M	6	1	1
ADSP-2189N	-	2	2
ADSP-2186M	-	2	2
ADSP-2183	-	5	4
ADSP-2181	-	607	8

го этапа методики.

На третьем этапе методики значение N – количество ЦСП в МПС с одношннной кольцевой ЛМ последовательного и параллельного типов определяется в соответствии с алгоритмом диспетчеризации передачи данных, подробно описанном в [5]; исходные данные для задачи диспетчеризации пересылок (табл.1 в [5]) этого ал-

Таблица 4

Исходные данные для задачи диспетчеризации пересылок

y_1	x_1, x_2, \dots, x_{D_u} N	$V'_{нар}$
y_2	x_1, x_2, \dots, x_{D_u} N	$V'_{нар}$
...
$y_{\frac{D_p}{N}}$	x_1, x_2, \dots, x_{D_u} N	$V'_{нар}$
$y_{\frac{D_p}{N}+1}$	$x_{\frac{D_u}{N}+1}, x_{\frac{D_u}{N}+2}, \dots, x_{2 \cdot \frac{D_u}{N}}$	$V'_{нар}$
...
y_{D_p}	$x_{(N-1) \cdot \frac{D_u}{N}+1}, x_{(N-1) \cdot \frac{D_u}{N}+2}, \dots, x_{D_u}$	$V'_{нар}$

горитма для СК26 представлены в табл. 4.

Первый столбец табл. 4 содержит результирующие данные в символьном виде (y_1, y_2, \dots, y_{D_p}), а второй – исходные данные (x_1, x_2, \dots, x_{D_u}).

Значение N в МПС с многошннной линейной ЛМ параллельного типа рассчитывается по формуле

$$N = \text{int} \left(\frac{D_u \cdot V'_{нар} + (D_p - D_u) \cdot (a + q)}{T_{ум} \cdot f_{CLK} - V_{noc} - D_u \cdot (a + q) - b} \right), \tag{4}$$

где int – операция округления до целого в сторону большего; f_{CLK} – тактовая частота синхронизации ЦСП; $a = 2, b = 6, q = 2$ – параметры рассматриваемой ЛМ (см.

[4]). Формула (4) получена из (1) настоящей работы, (1), (2) в [4] и (3) в [5] с учетом длительности фазы вычисления ($T_{выч}$), выраженной через исходные параметры методики:

$$T_{выч} = \left(V_{noc} + \frac{V_{nop}}{N} \right) \cdot \frac{1}{f_{CLK}}. \quad (5)$$

Значение N рассчитывается путем подстановки в (4) значения f_{CLK} от каждого ЦСП табл. 3. Для СК26 полученные согласно алгоритму диспетчеризации в [5] и рассчитанные по формуле (4) значения N занесены в соответствующие подстолбцы столбца «Тип ЛМ» табл. 3.

На четвертом этапе методики выбор оптимальной архитектуры МПС выполняется посредством анализа данных табл. 3 (поиск МПС с минимальным количеством ЦСП) с учетом рекомендаций табл. 1. Следует отметить, что на выбор оптимальной архитектуры МПС в значительной степени влияют экономические аспекты разработки; предельные размеры конечного устройства (ядра); надежность (вероятность электрического отказа); мощность рассеивания и др. Свой оптимум будет достигаться в каждом индивидуальном случае в зависимости от расстановки приоритетов в вышеперечисленных аспектах. Ядро СК26 с учетом экономических аспектов и минимальных размеров печатной платы (согласно данным табл. 3) наиболее рационально выполнить в виде МПС с двумя ЦСП ADSP-2186M и одношинной кольцевой ЛМ параллельного типа (использование ADSP-2191M или ADSP-2189N не выгодно из-за высокой их стоимости и наличия дополнительных микросхем обвязки). Остановив свой выбор на конкретной архитектуре МПС, разработчик имеет возможность приступить к созданию физического устройства (ядра), используя соответствующие функциональные схемы МПС и их алгоритмы работы [2 - 5].

В настоящий момент, ядро УЗ-дефектоскопа СК26, выполненное в виде однопроцессорной системы работает в режиме разделения времени, т.е. во время зондирования технологического канала осуществляется сбор УЗ-данных, а их основная обработка выполняется по окончании зондирования. Представленная методика, классификация ЛМ, формулы (1) – (4) и алгоритм диспетчеризации [5] позволят разработчику проектировать ядро УЗ-дефектоскопа СК26 в виде МПС на базе ЦСП семейства ADSP-21XX, работающего в режиме реального времени, и выполнять сбор и обработку УЗ-данных одновременно. Это существенно повысит качество и скорость выполнения контроля технологических каналов реакторов РБМК. Также предложенный в данной работе подход позволит систематизировать процесс проектирования МПС.

Литература

1. Каган Б.М. Электронные вычислительные машины и системы. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - С. 489 - 493.
2. Комаров А.В., Михайлов С.В. Производительность локальной магистрали последовательного типа в многопроцессорной системе // Известия вузов. Электроника. - 2000. - №1. - С. 97 - 100.
3. Комаров А.В., Михайлов С.В. Производительность локальной магистрали параллельного типа в многопроцессорной системе // Известия вузов. Электроника. - 2000. - №3. - С. 73 - 75.
4. Комаров А.В., Михайлов С.В. Производительность локальной многошинной магистрали параллельного типа в многопроцессорной системе // Известия вузов. Электроника. - 2001. - №2. - С. 90 - 93.
5. Комаров А.В. Алгоритм диспетчеризации передачи данных по локальной магистрали многопроцессорной системы кольцевого типа // Известия вузов. Электроника. - 2001. - №1. - С. 80 - 86.

Поступила в редакцию 11.05.2001

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ ТВЭЛА С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОЙ ОБОЛОЧКИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА БН ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ*

Г.Н. Власичев

Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород



Разработана методика расчета аварийного процесса разогрева и плавления твэла с учетом перемещения расплавленной оболочки при прекращении расхода теплоносителя в ТВС быстрого реактора с натриевым теплоносителем. Выполнено тестирование расчетной методики на численных результатах аналогичных методик. Выполнены расчеты плавления оболочки твэла, перемещения и затвердевания расплава оболочки в необогреваемых секциях, находящихся выше и ниже активной части твэла FFTF, а также в самой активной части, согласующиеся с данными эксперимента R-5 на реакторе TREAT.

Исследования аварийных процессов необходимы для выработки мер по предотвращению аварий, ограничению их последствий и доказательства безопасности нового поколения реакторов. Существующая концепция безопасности включает в себя рассмотрение в проекте ядерной энергетической установки запроектных аварий с тяжелыми повреждениями или расплавлением активной зоны [1].

В техническом обосновании безопасности реактора БН-800 показано, что при аварии с потерей энергопитания не происходит расплавления активной зоны, т.к. отрицательные обратные связи по реактивности даже в условиях кипения натрия приводят к снижению мощности [2]. Однако полностью исключить вероятность плавления части активной зоны пока невозможно [3].

В данной работе описываются методика и результаты расчетов аварийного процесса расплавления отдельного твэла реактора типа БН с учетом перемещения расплавленной оболочки. Решение задачи теплообмена в твэле с учетом плавления заключается в определении нестационарных полей температуры и координат фазовых границ в элементах твэла (рис. 1), а впоследствии и в твердых корках, образующихся на концах активной части твэла из переместившегося расплавленного материала оболочки (рис. 1б, в, 2), и в ячейке с расплавом оболочки в нижней части активной зоны, переместившимся из вышерасположенных участков (рис. 1г). В результате вычислений определяются времена расплавления оболоч-

© Г.Н. Власичев, 2001

* Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке конкурсного центра грантов по фундаментальным исследованиям в области технических наук (грант Т00-1.3-1017)

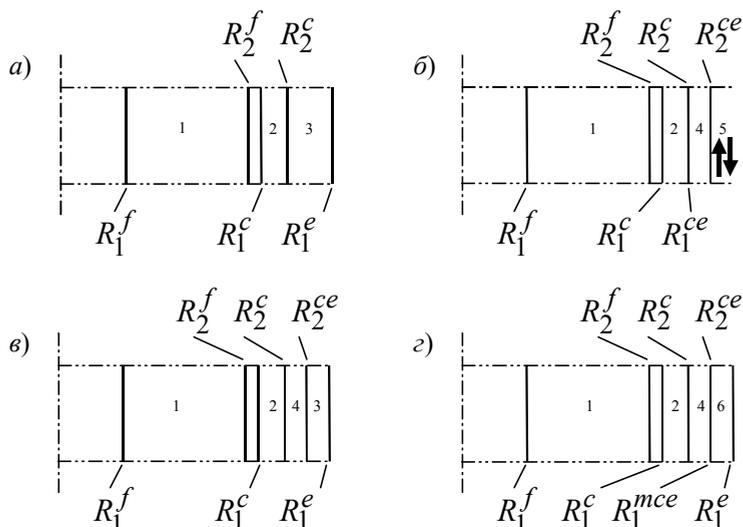


Рис. 1. Расчетные схемы радиального теплообмена в твэле на характерных высотных участках в аварийном процессе после прекращения расхода на участке с осушенной поверхностью (а), на участках с расплавленным материалом оболочки, перемещающимся вверх твердой оболочки (б), в верхней части после оттока жидкой стальной пленки (в), в нижней части с материалом оболочки, заполнившим все поперечное сечение канала (з): 1 - топливный сердечник; 2 - оболочка; 3 - пары натрия (не является расчетной областью); 4 - корка затвердевшей стали; 5 - перемещающаяся жидкая сталь (не является расчетной областью); 6 - неподвижная жидкая сталь

ки и топливного сердечника по высоте твэла, полной или частичной блокировки межтвэльного пространства затвердевающим материалом, а также повторного расплавления затвердевшего слоя. Времена начала и окончания перемещения расплава вверх твердой оболочки твэла выше области расплавления оболочки, начала такого перемещения ниже области расплавления и заполнения расплавом всего сечения ячейки в нижней части активной зоны определяются в результате рассмотрения аксиального перемещения расплавленного материала оболочки (рис. 2). Решение задачи перемещения заключается в определении скоростей расплава оболочки и паров натрия, координат верхней и нижней кромок расплавленного материала во времени с момента расплавления оболочки в наиболее горячем поперечном сечении до окончания движения в результате сползания расплава в бассейн над нижней блокировкой канала для прохода теплоносителя. Определяются также время смены восходящего движения на нисходящее, длина проникновения расплава, возможно, в верхнюю и в нижнюю зоны воспроизводства, а затем время образования и высота слоя из расплава оболочки над нижней блокировкой.

Данная модель является расширением модели, рассмотренной в [4]. Она дополнительно учитывает аксиальное перемещение расплавленной оболочки. Поскольку в условиях запаренной ТВС плавление оболочки на большей части твэла в активной зоне определяется, в основном, подводом тепла к оболочке изнутри твэла, то задача перемещения рассматривается с учетом динамики границ области расплавления оболочки вдоль твэла, полученной из рассмотрения в первом приближении задачи плавления оболочки. Задача перемещения рассматривается как чисто динамическая. Предполагается, что движение паров натрия и расплава оболочки - одномерное, а движущиеся среды - несжимаемые. Предполагается, что первоначально направленное вверх перемещение расплавленного материала оболочки (рис. 2а) происходит под действием силы трения от восходящего потока

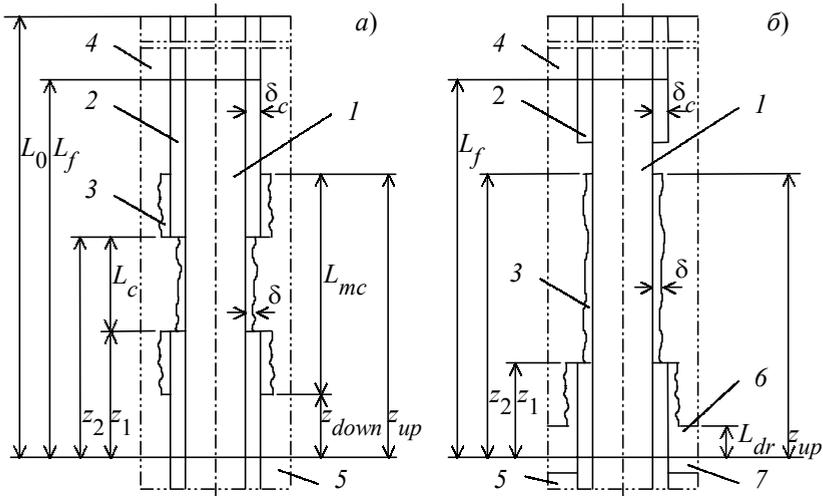


Рис. 2. Расчетные схемы перемещения расплавленной оболочки до (а) и после (б) блокировки в нижней зоне воспроизводства: 1 - топливный сердечник; 2 - оболочка; 3 - перемещающаяся пленка; 4 - пары натрия в канале; 5 - жидкий натрий; 6 - неподвижный расплав оболочки; 7 - блокировка

паров натрия, противодействующих силам тяжести и трения расплава о поверхности сердечника и нерасплавленных участков оболочки. Принимается, что расплав перемещается в виде сплошной неразрывной пленки, толщина которой одинакова по всей длине. Считается, что перемещение пленки за высотные границы области полного (по всему сечению) расплавления оболочки начинается, когда скорость течения пленки становится выше скорости распространения плавления оболочки вдоль твэла на соответствующей границе. Считается, что после смены направления перемещения (реверса) пленки и последующего оттока расплава вниз (обратно к верхней границе области расплавления оболочки) происходит отрыв пленки от вышенаходящейся еще твердой оболочки (рис. 2б). Последующее плавление указанного верхнего участка (рис. 1в) не учитывается в балансе массы.

Математические условия теплообмена в топливном сердечнике и оболочке, в зазоре между сердечником и оболочкой и с осушенной поверхности твэла описаны в [4]. Нестационарное поле температуры в топливном сердечнике твэла с объемным тепловыделением математически описывается одномерным уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат. Для описания объемного плавления используется приближение двухфазной зоны, в котором скрытая теплота учитывается в объемной теплоемкости. Поле температуры в оболочке описывается уравнением теплопроводности с введенной дельта-функцией.

На границе между оболочкой твэла и твердой коркой в данной модели используется граничное условие четвертого рода. На внешней границе твердой корки - внешнем фазовом фронте - используется условие

$$\lambda_c(r, T) \left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2^{ce}-} = R_m^c \frac{\partial R_2^{ce}}{\partial t}; T(R_2^{ce}, t) = T_m^c, \quad (1)$$

где r - радиальная координата с центром на оси твэла; t - время; T - температура; λ - коэффициент теплопроводности; T_m^c и R_m^c - температура начала плавления и скрытая теплота плавления (единицы объема) материала оболочки соответственно; R_2^{ce} - радиальная координата внешней поверхности стальной корки. В данном условии отсутствует теплопередача от жидкой стальной пленки, т.к. ее температура принимается равной температуре плавления. В верхней части активной зоны

после оттока пленки вниз из рассчитываемого сечения на наружной поверхности твердой корки (если она образовалась) (рис. 1в) используется условие, принимаемое на осушенной оболочке до натекания на нее пленки. Для учета вытекания расплавленного материала на данном участке, оказывающего влияние на продолжительность плавления оболочки и твердой корки, в описании их плавления на границах R_1^c и R_1^{ce} соответственно используются условия для внешнего фазового фронта. Для оболочки указанные условия имеют вид

$$\alpha_1^c \cdot [T(R_2^f, t) - T(R_1^c, t)] + \lambda_c(r, T) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_1^c} = R_m^c \frac{\partial R_1^c}{\partial t}; T(R_1^c, t) = T_m^c, \quad (2)$$

где индекс f относится к топливному сердечнику.

Система исходных дифференциальных уравнений, описывающая движение расплавленной оболочки и паров натрия, при вышеприведенных предположениях может быть выражена формулами из [5, 6, 7].

Уравнения количества движения и неразрывности для расплава оболочки:

$$\frac{\partial(1-\alpha)v_{mc}}{\partial t} + \frac{\partial(1-\alpha)v_{mc}^2}{\partial z} = -\frac{(1-\alpha)}{\rho_{mc}} \frac{\partial P}{\partial z} - (1-\alpha)g + \frac{\tau_g \Pi_g + \tau_{mc} \Pi_{mc}}{\rho_{mc}(A_g + A_{mc})}; \quad (3)$$

$$L_c \cdot \delta_c = L_{mc} \cdot \delta,$$

где z - высотная координата; v_{mc} - скорость пленки; ρ_{mc} - плотность расплава оболочки; P - давление; g - гравитационная постоянная; α - отношение площади проходного сечения для паров к площади поперечного сечения канала с оголенным от оболочки топливным сердечником; τ_g и τ_{mc} - касательное напряжение на внешней поверхности оболочки и на границе между пленкой и сердечником соответственно; Π_g и Π_{mc} - смоченный периметр для паров натрия и пленки; A_g и A_{mc} - площадь проходного сечения для паров и поперечного сечения пленки; L_c и L_{mc} - длина расплавленного участка оболочки и пленки; δ_c и δ - толщина твердой оболочки и пленки.

Уравнения количества движения и неразрывности для паров натрия:

$$\frac{\partial(\alpha \cdot v_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \cdot v_g^2)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial z} - \alpha \cdot g - \frac{\tau_g \cdot \Pi_g}{\rho_g \cdot (A_g + A_{mc})}; \quad (4)$$

$$v_g \cdot A_g = v_{gi} \cdot A_{g0},$$

где v_g - скорость паров; $v_{gi} = v_g(z=0)$; ρ_g - плотность паров.

После интегрирования по длине канала с учетом формул для касательных напряжений, коэффициентов трения и ряда упрощений уравнения движения могут быть переписаны в следующем приближенном виде [5]:

$$\frac{1}{L_c} \cdot \rho_{mc} \cdot \frac{\partial(v_{mc} \cdot L_c)}{\partial t} = -(\rho_{mc} - \rho_g) \cdot g \cdot \eta + \frac{f_s}{2 \cdot D_0} \cdot \frac{\rho_g \cdot v_{gi}^2}{(1-\alpha_0)} \cdot \left[1 + 75 \cdot \varepsilon \cdot (1-\alpha_0) + \alpha_0 \cdot \left(\frac{L_{mc}}{L_c} - 1 \right) \right] - \frac{2 \cdot \mu_{mc} \cdot v_{mc}}{\delta_c^2} \cdot \left(\frac{L_{mc}}{L_c} \right)^2; \quad (5)$$

$$\Delta P = \rho_g \cdot g \cdot L_0 + \frac{\rho_g \cdot v_{gi}^2}{2} \left\{ \frac{f_s \cdot L_0}{D_0} \left[1 + 75 \cdot \varepsilon \cdot \frac{(1-\alpha_0) L_c}{\alpha_0 L_0} \right] + K_{fr} \right\}, \quad (6)$$

где ΔP - перепад давления на участке канала L_0 , заполненном парами;

α_0 - геометрический параметр; D_0 - первоначальный гидравлический диаметр канала; K_{fr} - коэффициент сужения поперечного сечения канала над активной зоной затвердевшим материалом [5]; ε - параметр захлебывания [5].

Длина участка расплавленной оболочки определяется как

$$L_c(t) = z_2(t) - z_1(t), \tag{7}$$

где $z_1(t)$ и $z_2(t)$ - координаты нижней и верхней границы расплавленной области соответственно, определяемые из решения задачи плавления оболочки.

Длина участка, занятого перемещающейся пленкой

$$L_{mc}(t) = z_{up}(t) - z_{down}(t), \tag{8}$$

где $z_{up}(t)$ и $z_{down}(t)$ - координаты верхней и нижней границы пленки соответственно, определяемые так:

- до реверса

$$z_{up}(t) = \begin{cases} \int_{t_{m0}}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_{m0}), & \text{при } \int_{t_{m0}}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_{m0}) \geq z_2(t); \\ z_2(t), & \text{при } \int_{t_{m0}}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_{m0}) < z_2(t); \end{cases} \tag{9}$$

$$z_{down}(t) = z_1(t);$$

- после реверса

$$z_{up}(t) = \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_r);$$

$$z_{down}(t) = \begin{cases} \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_1(t_r), & \text{при } \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_1(t_r) \leq z_1(t); \\ z_1(t), & \text{при } \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_1(t_r) > z_1(t); \end{cases} \tag{10}$$

где t_{m0} - момент начала движения; t_r - момент реверса.

После образования нижней закупорки испарение натрия в нижней части канала прекращается. Принято, что с этого времени течение паров в канале отсутствует. Последующее перемещение пленки вниз будет в таких условиях происходить под действием только сил тяжести и противодействующего трения, которое математически можно приближенно описать уравнением (5). Но в данном случае второй член правой части, содержащий v_{gi} , будет нулевым, а в третьем члене отношение L_{mc} / L_c со времени начала аккумулялирования стали над блокировкой считается неизменным. Второе условие с учетом баланса массы выражает постоянство толщины пленки d . При этом высота уровня бассейна из расплава оболочки $L_{dr}(t)$ будет определяться формулами из [5]. Расчет перемещения прекращается в момент окончания сползания жидкой пленки в бассейн, когда $L_{dr}(t) = z_{up}(t)$.

Для расчета нестационарных радиальных распределений температуры в элементах твэла с учетом плавления оболочки и топлива и аксиального перемещения расплавленной оболочки разработана версия программы TRAMS-TWEL [4, 8]. Для расчета параметров перемещения расплава оболочки с момента ее расплавления в наиболее горячем сечении разработана программа MOTE. Высотные координаты верхней и нижней границ области полного расплавления оболочки в зависимость

ти от времени, вычисляемые на основании расчетов по программе TRAMS-TWEL, используются в качестве входных данных. Программа MOTE рассчитывает скорости перемещения расплава оболочки и паров натрия, положение верхней и нижней границ пленки при ее наплывании на нерасплавленные части оболочки, а также при использовании упрощенной модели затвердевания [5] толщину блокировок канала выше и ниже активной зоны. Полученные по TRAMS-TWEL временные зависимости толщины таких блокировок используются в качестве входных данных для более точных расчетов. Процесс расплавления твэла в активной зоне с учетом перемещения материала оболочки, затвердевания расплава на твердых участках оболочки и повторного плавления рассчитывается итерационно - повторными расчетами по программам с обменом данными через файлы на диске в соответствующих последовательности и формате.

По программе TRAMS-TWEL были выполнены расчеты плавления твэла FFTF для условий эксперимента R-5 на реакторе TREAT при значениях данных из [9]. Полученные результаты сопоставлены с приведенными в [9] численными данными аналитической модели, кода SAS (рис. 3) и кода THTB, основанного на численном решении уравнения теплопроводности (таблица). Время расплавления оболочки в наиболее теплонапряженном сечении, полученное по TRAMS-TWEL, на 8 % больше времени расплавления по коду SAS. Внизу активной части твэла возрастает отличие времен плавления, полученных по TRAMS-TWEL и аналитической модели, от таких времен по коду SAS, в котором учитывается динамика выпаривания натрия, имеющая пульсирующий характер, усиливающийся в нижней части канала. Времена расплавления оболочки твэла в центральной и верхней частях активной зоны, полученные по TRAMS-TWEL, совпадают с соответствующими временами, полученными по аналогичному коду THTB, с точностью до двух значащих цифр. В нижней части отличие возрастает до 6%. За время расплавления топлива было принято время, когда температура во внешнем узле топлива достигнет точки начала плавления, т.е. когда двухфазная зона распространится по всему поперечному

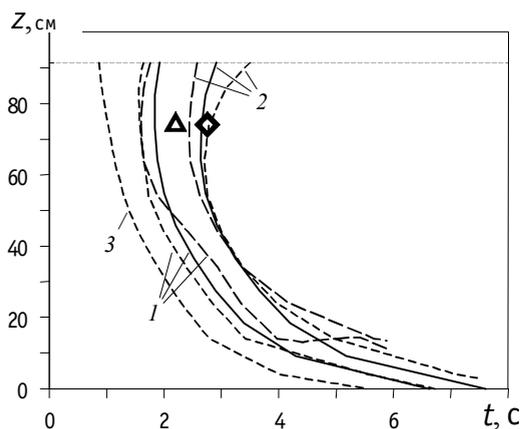


Рис. 3. Результаты расчетов плавления оболочки твэла в условиях эксперимента R-5 по коду SAS (-----), аналитической модели (-----) и программе TRAMS-TWEL (—): 1 - время начала плавления оболочки от момента выталкивания натрия из верхней части экспериментального канала после закипания; 2 - время расплавления оболочки; 3 - время осушения оболочки; \blacktriangle , \blacklozenge - время потери герметичности оболочки в экспериментах R5 и R4 соответственно)

сечению. Отличие этих времен, полученным по двум кодам, составляет 19-23%. Характер изменения по высоте твэла вычисленных по TRAMS-TWEL величин вполне согласуется с данными THTB. В целом, согласие численных результатов для условий эксперимента R-5, полученных по TRAMS-TWEL, с результатами других методик можно считать достаточно хорошим. В экспериментах R-4 и R-5, отличающихся временем остановки реактора, разрушение оболочки произошло соответственно в моменты 2,75 и 2,2 с от начала кипения натрия [5]. Регистрация начала разрушения оболочки основывалась на реакции показаний расходомера на высвобождение газа. Рассчитанное по программе TRAMS-TWEL время расплавления оболочки в наиболее теплонапряженном сечении, равное

2,63 с, согласуется с этими данными.

Для тестирования программы MOTE проведены расчеты перемещения расплавленной оболочки твэла, в которых являющиеся входными данными координаты верхней и нижней границ области полного расплавления оболочки во времени (с момента начала кипения натрия) приняты из [5] (вычислены по модели [9]). Рассчитанные координаты верхней кромки пленки до момента полной блокировки затвердевшей сталью канала над активной зоной практически совпадают с данными [5] (рис. 4). В данном расчете толщина затвердевшего слоя определяется в каждой из двух секций над активной частью твэла FFTF по отдельности по используемой в [5] упрощенной модели – из явного выражения для полубесконечной среды [10, 5]

$$\delta_{fr} = 2 \cdot A_{fr} \cdot [a_c \cdot (t - t_{fr})]^{1/2},$$

где a_c - коэффициент температуропроводности стали; t_{fr} - время достижения границей пленки верхней необогреваемой зоны. Параметр A_{fr} определяется из сложного неявного выражения [10]. В модели [5] для вычисления A_{fr} используется явная приближенная формула. В изолирующей секции между активной частью и отражателем затвердевание рассматривается в течение ограниченного промежутка времени, требуемого для нагрева оболочки, считающейся термически изолированной от сердечника, до точки плавления –

$$\Delta t_{fr} = [\delta_c / 2A_{fr} \cdot c_c \cdot (T_m^c - T_s) / R_m^c]^2 / a_c,$$

где c_c - удельная теплоемкость стали; T_s - температура насыщения теплоносителя. В изолирующей секции материал таблетки имеет низкую теплопроводность, как у окисного топлива. В отражателе находится твердый инконель, т.е. весь материал в данной секции имеет высокую теплопроводность. В изолирующей секции длиной 2,03 см расчетная толщина слоя затвердевшего материала ограничивается величиной 0,46 мм. В нижней части отражателя образуется блокировка всего проходного сечения (толщиной 0,84 мм). Расчетная длина проникновения расплава в канал выше активной части составляет 4,85 см, что на 8% меньше приведенного в [5] расчетного значения, равного ~5,3 см. Дальнейшие события в процессе последующего нисходящего перемещения пленки из-за более быстрого образования верхней блокировки в вычислениях по программе MOTE наступают несколько быстрее, чем в [5]. Качественный ход процессов, полученный по MOTE, соответствует расчетным данным [5]. Исключение составляет только то, что в MOTE учтен скачок координаты верхней границы пленки в момент полной блокировки в зоне отражателя под эту блокаду. После достижения кромкой пленки нижней необогреваемой секции рассчитывается

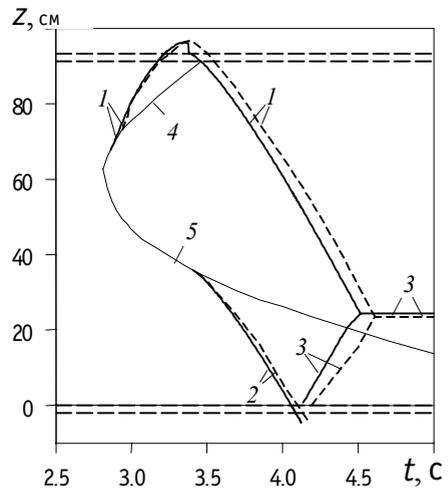


Рис. 4. Координаты верхней (1) и нижней (2) границ перемещающейся жидкой пленки из материала оболочки твэла, высота бассейна из расплава оболочки над нижней закупоркой канала (3) в условиях эксперимента R-5, полученные M.Ishii et al [5] (-----) и по программе MOTE (————) (4, 5 – верхняя и нижняя границы полного расплавления оболочки соответственно; ----- - верхняя и нижняя плоскости активной зоны, границы изолирующих секций с верхним и нижним отражателем)

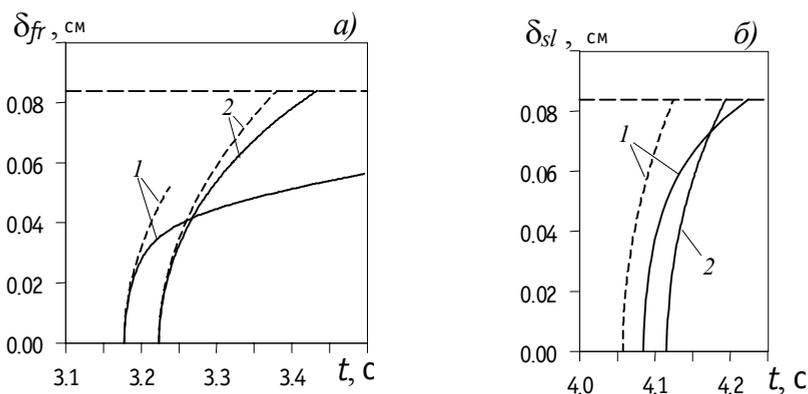


Рис. 5. Толщина слоев из затвердевшего материала оболочки в верхних (а) и нижних (б) изолирующей секции (1) и отражателе (2) по программе MOTE в соответствии с приближенной методикой из [5] (-----), по программе TRAMS-TWEL (————) (----- - ширина эффективного кольцевого канала)

толщина слоя затвердевшей стали на высоте $z = -0$. Для расчета затвердевания на данном участке используется та же модель с учетом того, что начальная температура оболочки твэла принимается равной вместо T_s температуре теплоносителя на входе в активную зону. Нижняя полная блокировка образуется в момент 4,12 с - лишь на 0,08 с быстрее соответствующего времени [5]. Длина нижней блокировки под активной зоной составляет 4,62 см, что на 10% больше расчетного значения [5], равного 4,2 см. После образования нижней блокады стекающая расплавленная оболочка аккумулируется поверх блокады на высоту около 24,2 см к моменту 4,5 с. В [5] данная высота составляет ~24 см к моменту 4,6 с. Таким образом, результаты расчета процессов перемещения расплавленной оболочки твэла и затвердевания расплава в необогреваемых секциях, выполненного по программе MOTE в соответствии с методикой [5] с теми же значениями данных, практически совпадают с приведенными в [5].

В результате расчета перемещения расплавленной оболочки твэла, в котором в отличие от предыдущего расчета толщина твердого слоя в секциях выше и ниже

Таблица

Времена плавления оболочки и топливного сердечника твэла в условиях эксперимента R-5, полученные по разным программам

z, см	Время расплавления оболочки, с		Время расплавления топливного сердечника, с	
	THTB	TRAMS-TWEL	THTB	TRAMS-TWEL
91.44	2.960	2.91	10.630	8.18
82.296	2.800	2.72	9.705	7.40
73.152	2.700	2.65	9.095	6.93
64.008	2.695	2.63	8.755	6.65
54.864	2.785	2.73	8.665	6.62
45.720	2.975	2.92	8.795	6.78
36.576	3.295	3.24	9.175	7.14
27.432	3.795	3.66	9.855	7.70
18.288	4.350	4.20	10.745	8.49
9.144	5.570	5.17	12.475	9.86
0.	8.200	7.60	15.870	12.87

активной зоны рассчитывается по программе TRAMS-TWEL, длина верхней блокировки составила 5,73 см, что на 8% выше расчетного значения [5]. Динамика толщины твердых слоев в верхних секциях показана на рис. 5а. Видно, что в соответствии с расчетом по методике настоящей работы первоначально быстрый рост толщины блокировки в изолирующей секции затем замедляется по мере нагревания оболочки. Ее максимальный поперечный размер составляет 0,56 мм. К моменту полной закупорки проходного сечения в вышенаходящейся зоне отражателя толщина твердого слоя в изолирующей секции равна 0,53 мм, что на 17% выше толщины, полученной по упрощенной модели затвердевания. Незначительное количественное различие результатов расчета затвердевания в данной секции по двум методикам подтверждает правильность сделанных в упрощенной модели предположений. В зоне отражателя качественный характер нарастания во времени толщины твердого слоя, рассчитанной по обоим методикам, одинаков. Однако количественная разница промежутков времени образования полной закупорки, равная 35%, является причиной разной длины верхних блокировок. Динамика толщины твердых слоев под активной зоной показана на рис. 5б. По уточненной методике программы TRAMS-TWEL этот параметр рассчитывался, как и наверху, в двух секциях. Получено, что раньше начинающееся застывание расплава в изолирующей секции впоследствии также отстает от имеющего более позднее начало образования твердого слоя в ниженаходящейся зоне отражателя. На динамику движения стальной пленки в данном случае влияет только время образования полной блокады. Поскольку такая блокада образуется первоначально на глубине $z = -2,03$ см, а не непосредственно под активной зоной, то и длина нижней блокировки, равная 7,39 см, получена большей (в 1,6 раз), чем в предыдущем расчете. Высота стального бассейна в данном случае равна 21,6 см (к моменту 4,6 с).

Качественный ход рассматриваемых процессов, полученный по программе MOTE, в котором входные данные (координаты границ области полного расплавления оболочки во времени) получены по программе TRAMS-TWEL, также соответствует расчетным данным [5], только вычисленные по MOTE параметры движения пленки и характерные времена сдвинуты во времени (вслед за координатами границ расплавления оболочки). Количественная разница в указанных входных данных привела к изменению длины верхней и нижней блокировок - 6,62 см и 8,38 см соответственно.

Результаты последнего расчета перемещения использованы для расчетов затвердевания стальной пленки в активной зоне (рис. 6). В верхней части активной зоны расплав опережает границу области расплавления оболочки недостаточно для сколько-нибудь "ощутимого" расчетной моделью затвердевания расплава на этом участке. В нижней части активной зоны расплав затвердевает на оболочке, твердой по всей толщине, начиная с высотной координаты около 11,5 см (рис. 6б). В верхней своей части блокировка канала неполная (нарастание твердого слоя прекращается ко времени нагрева оболочки до точки плавления), к низу она толще. Перед началом застывания жидкой стали в нижнем отражателе в момент 3,81 с максимальная толщина твердого слоя в активной зоне равна 0,53 мм (63% от толщины полной блокировки) на участке, находящемся на высоте $z = 2,5$ см. Полная блокировка проходного сечения на длину 1,4 см от нижней плоскости активной зоны наступает к моменту 4,36 с - позднее полной закупорки в отражателе в точке $z = -2,03$ см во время 3,89 с и полной закупорки в изолирующей секции в точке $z = -0$ см во время 3,94 с. Позднее под действием номинального тепловыделения в топливе происходит обратное расплавление твердого слоя в канале над нижней плоскостью активной зоны после расплавления оболочки во времена,

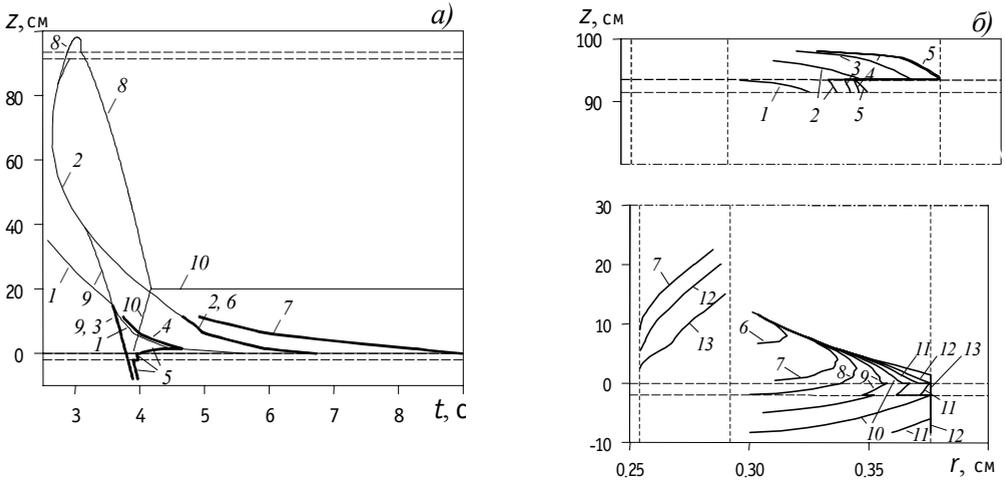


Рис. 6. Характерные времена (а) в процессе расплавления оболочки по высоте твэла в условиях эксперимента R-5: начала (1) и окончания (2) плавления оболочки, начала (3) и окончания (4) затвердевания расплава в нижней части активной зоны, полной блокировки канала под активной зоной и в нижней ее части (5), начала (6) и окончания (7) плавления твердых корок (8, 9 - верхняя и нижняя границы перемещающейся жидкой пленки из материала оболочки соответственно; 10 - высота бассейна из расплава оболочки над нижней закупоркой канала; ----- - границы секций по высоте твэла), расположение фронтов расплавления оболочки твэла и затвердевания ее расплава в эффективном кольцевом канале в ряд моментов времени (б): 2,88 (1), 2,95 (2), 3,02 (3), 3,08 (4), 3,15 (5), 3,70 (6), 3,78 (7), 3,81 (8), 3,85 (9), 3,89 (10), 3,94 (11), 4,00 (12), 4,36 с (13) (----- - внутренний и наружный радиус оболочки, наружный радиус кольцевого канала)

показанные на рис. 6а.

В эксперименте R-5 для сохранения состояния с переместившейся оболочкой энерговыделение было прервано перед плавлением топлива в момент 5,5 с после начала кипения теплоносителя [5]. Поэтому вся сталь должна застыть в конфигурации, сложившейся к этому времени. Действительная длина верхней блокировки оказалась меньше 1 см, что меньше расчетных значений. В добавление к неопределенности перепада давления во время плавления и перемещения оболочки любая блокада может расплавиться благодаря аксиальной теплопередаче, не рассматриваемой в расчетных методиках. Длина нижней блокировки, полученная в [5] равной 4,2 см, находится в хорошем согласии с результатами анализа экспериментов. Длина этой блокировки, полученная по методике настоящей работы равной 8,38 см, примерно в 2 раза превосходит экспериментальный размер, что удовлетворительно соответствует опытному результату. В целом, полученные в результате расчетов перемещения и затвердевания расплавленной оболочки твэла конфигурация, длины слоев из застывшей стали выше и ниже обогреваемого участка удовлетворительно соответствуют данным эксперимента R-5.

Таким образом, выполнено тестирование разработанных программ расчета плавления твэла и перемещения расплавленной оболочки TRAMS-TWEL и MOTE соответственно на численных результатах методик, аналогичных используемым в данных программах. Результаты расчетов плавления оболочки твэла, перемещения и затвердевания ее материала в целом качественно и количественно удовлетворительно согласуются с данными эксперимента R-5 на реакторе TREAT.

Литература

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. - 1990. - т. 69. - вып. 6. - с.409-422.
2. Сценарий и последствия аварии LOFWS в реакторе БН-800 Южно-Уральской АЭС / И.А. Кузнецов, В.М. Поплавский, Ю.Е. Швецов и др.: Доклад на семинаре по безопасности реакторов на быстрых нейтронах. СНГ - Европейское Сообщество. г. Обнинск - г. Актау, 24 - 29 февраля 1992 г. - 24 с.
3. *Biksha Yu.* On Approaches Applied Analysis of Melt-down Accident in BN-800 Type Reactor: Proc. IAEA/IWGFRTech. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. - p.541-544.
4. *Власичев Г.Н.* Расчетный анализ экспериментов по разрушению электрообогреваемых имитаторов твэлов ядерных реакторов // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - № 4. - С. 28-37.
5. *Ishii M., Chen W.L., Grolmes M.A.* Molten Clad Motion Model for Fast Reactor Loss-of-flow Accidents // Nuclear Science and Engineering. - 1976. - V. 60. - №. 4. - P. 435-451.
6. *Chen W.L., Ishii M., Grolmes M.A.* Parametric Study of the Molten-Clad Motion Based on One-dimensional Model // Nuclear Engineering and Design. - 1977. - V. 41. - P.1-12.
7. *Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М.* Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.
8. *Власичев Г.Н.* Комплекс программ расчета аварийных процессов с плавлением внутрикорпусных материалов быстрого реактора // Атомная энергия. - 1994. - Т. 76. - Вып. 6. - С. 459-465.
9. *Chen W.L., Ishii M., Grolmes M.A.* Simple Heat Conduction Model with Phase Change for Reactor Fuel Pin // Nuclear Science and Engineering. - 1976. - V. 60. - №. 4. - P. 452-460.
10. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 488 с.

Поступила в редакцию 30.08.2001

УДК 621.311:621.039

КОНСЕРВАЦИЯ КОНДЕНСАТНО-ПИТАТЕЛЬНОГО ТРАКТА И ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКТАДЕЦИЛАМИНА

Е.Б. Громов

“Балаковатомтехэнерго”, г. Балаково



Рассматриваются результаты разработки, усовершенствования и опробования технологии консервации теплоэнергетического оборудования с применением пленкообразующих аминов, и в частности октадециламина (ОДА).

Простой энергоблоков, связанные с ремонтными работами, профилактикой, осуществлением технологического перевооружения и реконструкцией, требуют повышенного внимания к защите оборудования пароводяного контура АЭС от стояночной коррозии.

В соответствии с требованиями «Временных норм (Водно-химический режим II-го контура АЭС с реакторами типа ВВЭР. Нормы качества рабочей среды и средства их обеспечения)» перед остановом энергоблока на срок более трех суток для консервации оборудования в течение 24-48 часов должна осуществляться обработка рабочей среды гидразин-гидратом с поддержанием концентрации последнего в питательной воде не менее 500 мкг/кг, но не более 1000 мкг/кг.

В настоящее время практически отсутствуют способы эффективной консервации тракта энергоблока в целом, элементы которого изготовлены из различных конструкционных материалов. Следует также принимать во внимание, что часть химических реагентов токсична, вследствие чего возникают трудности экологического характера как в при консервации, так и расконсервации оборудования.

Исследования, проведенные рядом коллективов, и анализ литературных данных [1,2] показали, что наиболее подходящим из пленкообразующих аминов является октадециламин – $C_{18}H_{37}NH_2$. ОДА относится к классу высших алифатических аминов и является подщелачивающим соединением из углеводов с концевой катионоактивной группой.

ОДА представляет собой белое воскообразное вещество с температурой плавления $54,5^{\circ}C$. Вследствие длинной углеродной цепи ОДА слабо растворяется в воде ($C_{ОДА}=1$ мг/дм³ при $T=30^{\circ}C$), но при повышенной температуре и интенсивном перемешивании образует устойчивую эмульсию.

Механизм защитного антикоррозионного воздействия ОДА основан на формирова-

нии молекулярного слоя на поверхности металла вследствие ориентированной адсорбции молекул ОДА, обладающих значительным дипольным моментом. Этот процесс начинается с физической адсорбции, которая переходит в хемсорбцию, причем с повышением температуры этот процесс ускоряется.

Проведенные в МЭИ, ВНИИАМ и Институте изотопов (Германия) экспериментальные исследования [1, 2] удельной сорбции ОДА на различных металлах и в разных средах в диапазоне температур $T=50-250^{\circ}\text{C}$ показали (рис.1), что при одинаковой концентрации ОДА в водном растворе количество адсорбированного ОДА на углеродистой стали в 4-5 раза выше, чем на аустенитной.

В случае осуществления консервации в паровой среде основным показателем защитного эффекта является уровень адсорбции ОДА на поверхности оборудования, который определяется по результатам анализа химсливов с контрольных поверхностей. Как показали исследования, уровень минимальной адсорбции ОДА на поверхности оборудования должен составлять не менее $0,3 \text{ мкг/см}^2$.

Образованная при температуре 150°C пленка ОДА приблизительно на 90% связана с поверхностью металла хемсорбцией и с трудом удаляется химическими растворителями. Наиболее стойкая пленка ОДА создается при обработке в условиях температуры около 250°C и выше.

Объективной характеристикой коррозионно-защитного действия пленки ОДА может быть степень защиты, которая показывает снижение скорости коррозии в результате образования защитной пленки ОДА.

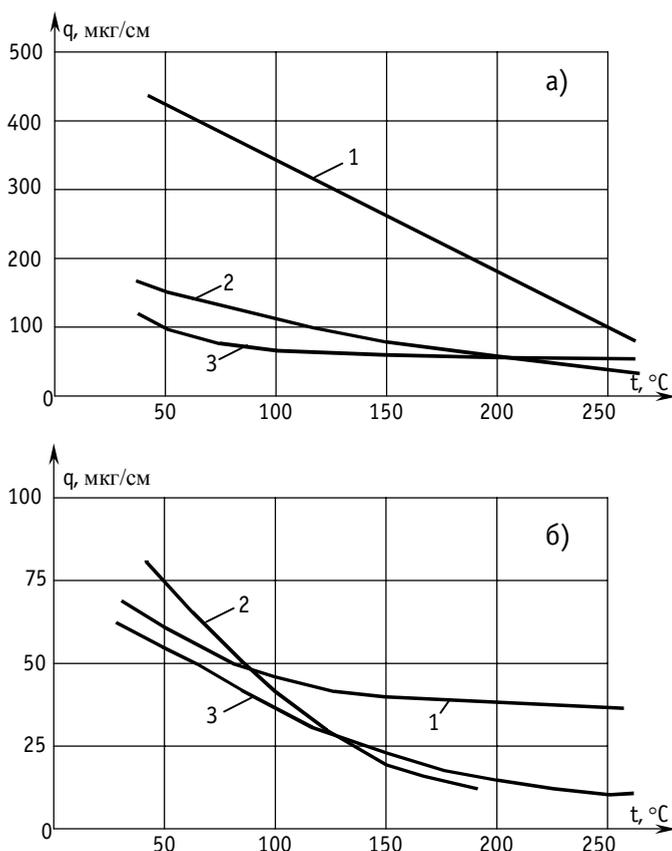


Рис. 1. Адсорбция ОДА на поверхностях различных конструкционных материалов в жидкости а) и паре б) при $C_{\text{ОДА}} = 100 \text{ мг/кг}$, $\text{pH}=8,4$ и $t = 20 \text{ ч}$: 1 – сталь 20; 2 – аустенитная сталь; 3 – турбинная сталь

Степень защиты может быть рассчитана по данным гравиметрических и электрохимических исследований, %:

$$S_m = \left(1 - \frac{\Delta m_{\text{ОДА}}}{\Delta m_0} \right) 100,$$

$$S_i = \left(1 - \frac{i_{\text{ОДА}}}{i_0} \right) 100,$$

где $\Delta m_{\text{ОДА}}$, Δm_0 – потеря массы обработанных и необработанных ОДА образцов; $i_{\text{ОДА}}$, i_0 – плотность тока обработанной и не обработанной ОДА поверхности образцов в активной области потенциалов.

Известно, что применительно к условиям стояночной коррозии оборудования степень защиты должна составлять не менее 80%. Полученные в ходе экспериментов значения S_m , S_i выше указанной величины (от 91 до 99%) и поэтому можно сделать вывод о высокой эффективности использования ОДА для защиты оборудования от стояночной коррозии.

На основании проведенных исследований была разработана рабочая программа консервации оборудования II контура третьего блока Балаковской АЭС. Консервация проводилась в период с 15 по 21.05.92. Дозирование эмульсии ОДА осуществлялось на всас бустерного насоса в течение ~160 часов одновременно с дозированием гидразин-гидрата.

Концентрация ОДА в начальный период поддерживалась в диапазоне 1,6-2,6 мг/кг, на завершающем этапе поднималась до 4,6-5,2 мг/кг.

Анализ данных по продуктам коррозии показал, что заметно выраженного “моющего” эффекта в процессе консервации не наблюдалось. Концентрация железа в питательной воде незначительно повышалась первые три дня с начала консервации, затем упала до величин, не превышающих 10 мкг/кг. Наблюдался эффект выноса продуктов коррозии с паром парогенератора: концентрация железа в питательной воде и паре парогенератора была приблизительно одинакова. Эффективность очистки турбинного конденсата от продуктов коррозии на электромагнитных фильтрах в ходе консервации можно оценивать в 15-30%, ФСД – в 30-70% по железу.

Можно отметить, что в целом показатели водно-химического режима при проведении консервации существенно не изменялись.

После останова блока проведен визуальный осмотр оборудования и отбор проб адсорбированного ОДА. Осмотр оборудования показал, что основная часть поверхностей парового и питательного трактов покрыта слоем плотных, хорошо сцепленных с металлом отложений.

Результаты определения величин сорбции ОДА приведены в табл. 1. Полученные значения удельной сорбции существенно превышают значения удельной сорбции 0,3 мкг/см², теоретически рассчитанные для мономолекулярной пленки ОДА на поверхности гладкого (шлифованного) образца. Это свидетельствует о том, что образовавшиеся пленки являются полимолекулярными и обеспечивают хороший защитный эффект.

Одновременно с режимом консервации теплоэнергетического оборудования вторых контуров АЭС с реакторами типа ВВЭР проводились испытания нового водно-химического режима с использованием микродобавок ОДА на 3 блоке АЭС им. Б. Лойшнера (с 1986 г. до момента останова АЭС) и на 1 блоке Кольской АЭС.

В 1993 г. на 1 блоке Кольской АЭС после двух лет его эксплуатации в ОДА-гидразинном режиме произошло недопустимое отклонение в режиме работы парогенераторов. Выяснение причин данного явления позволило прийти к заключению, что в качестве корректирующего реагента был использован ОДА предельно низкого качества.

Таблица 1

Результаты химсливов и визуального осмотра отдельных элементов после консервации ОДА

Место отбора пробы	Удельная сорбция ОДА, мкг/см ²	Степень гидрофобности поверхностей
Вход ЦНД-2	2,6	Хорошая
VI отбор ЦНД-2 (лопаточный аппарат)	2,1	Хорошая
VII отбор ЦНД-2 (лопаточный аппарат)	1,8	Слабо выражена
СПП (корпус)	2,3	Хорошая
Водяная камера ПНД-4	198,0	Ярко выражена
Сливные насосы ПНД-3	283,0	Ярко выражена
Паровая часть ПГ-1	2,3	Удовлетворительная
Водяная часть ПГ-1	7,1	Удовлетворительная
Трубочатка ПГ-1 (горячий коллектор)	4,7	Удовлетворительная

Одновременно был выявлен ряд недостатков самой технологии, выражающихся в отсутствии входного контроля качества ОДА, несовершенстве системы дозирования и контроля за содержанием ОДА в пароводяном контуре.

До устранения указанных замечаний все работы с использованием ОДА-технологии на АЭС были временно приостановлены ГП АЭН.

В результате проведенных дополнительных исследований вышеуказанные замечания устранены: организовано производство реагента ОДА высокой степени очистки, имеющего европейский сертификат качества (DIN ISO 9001:1994); отработана технология получения водной эмульсии ОДА, позволяющая осуществлять дозирование реагента в холодном состоянии; создана система автоматического контроля его концентрации [3, 4].

При активной поддержке РАО ЕЭС России и корпорации ЕЭЭК технология консервации с использованием ОДА внедрена на более чем 200 объектах тепловой энергетики в России и за рубежом. Выпущены «Методические указания по консервации теплоэнергетического оборудования с применением пленкообразующих аминов (дополнение к РД 34.20.591-97)». В соответствии с этим документом и с рабочей программой, разработанной Балаковским филиалом Атомтехэнерго и ВНИИАМ была проведена опытно-промышленная консервация блока №1 Заинской ГРЭС с целью снижения коррозионных процессов оборудования энергоблока на период ремонта и стоянки блока в резерве. Интенсивность коррозионных процессов на оборудовании подавлялась путем нанесения (формирования) защитного слоя ОДА на внутренние поверхности оборудования, подвергающего стояночной коррозии.

Блок №1 стоял в резерве один месяц и был растоплен для консервации 17.01.2000.

Программа консервации включала в себя три этапа. Первый этап - проведение консервации конденсатно-питательного и парового трактов энергоблока. Длительность этапа 25 часов, концентрация ОДА в питательной воде 2-3 мг/кг, температура 320-340°С. Второй этап - по той же схеме в течение 22,5 часа с концентрацией ОДА в питательной воде 3-5 мг/кг. Третий этап - промывка водным раствором с концентрацией ОДА на уровне 2-3 мг/кг помимо турбины по контуру - котел - РОУ - конденсатор - деаэратор - котел - не проводился в виду того, что на обработанных поверхностях уже образовалась достаточная защитная пленка.

После выполнения работ по консервации блока производилась дополнительная операция по консервации проточной части турбины (ЦВД, ЦСД, ЦНД).

Температура пара, содержание ОДА и показатели ВХР приведены в табл. 2.

Таблица 2

Качество водно-химического режима в период консервации блока №1 Заинской ГРЭС

Время	Температура острого пара, °С	Конденсат		Питательная вода			Пар		
		Fe, мкг/кг	ОДА, мг/кг	pH	Fe, мкг/кг	ОДА, мг/кг	pH	Fe, мкг/кг	ОДА, мг/кг
0 ³⁰	315			9,40			9,25		
2 ⁰⁰	310	13	0,21		24	0,25		47	2,20
4 ⁰⁰	310		0,23	9,40		0,42	9,40		0,62
6 ⁴⁰	310	23	0,25	9,35		0,81	9,25	50	1,56
8 ³⁰	310			9,66			9,37		
9 ³⁰				9,33			9,30		
10 ³⁰	325	30	0,74	9,35	10	2,57	9,32	57	4,52
12 ³⁰	325	30		9,35			9,30		
14 ³⁰	315	63	0,93	9,40	37	2,93	9,45	84	5,00
16 ⁰⁰	315			9,40			9,40		
18 ⁰⁰	320	110	1,61	9,45	63	4,15	9,40	133	5,77
20 ⁰⁰	312			9,40			9,40		
22 ⁰⁰	313	65	1,32	9,35	46	2,27	9,35	79	3,77
0 ³⁰				9,30			9,15		

Через четыре месяца, а именно, 16 мая 2000 г. был произведен осмотр оборудования блока №1 после консервации ОДА. Количественные результаты по величине удельной сорбции ОДА по различным химсмывам и вырезанным образцам с котлов приведены в табл. 3.

По всем представленным образцам из котлов 1 блока и химсмывам величина удельной сорбции ОДА соответствует критерию 0,3 мкг/см².

Отклонение от норм ВХР в период консервации блока №1 не наблюдалось.

Таким образом, разработана, усовершенствована и опробована технология консервации теплоэнергетического оборудования с применением пленкообразующих аминов и, в частности, ОДА - октадециламина. Проведение представленной опытно-промышленной консервации и ряд других испытаний позволили принять техническое решение, ут-

Таблица 3

Концентрация ОДА на поверхности оборудования блока №1

Место отбора пробы	Концентрация ОДА, мкг/см ²	Гидрофобность
Деаэратор 1А водная часть	0,30	Хорошая
Деаэратор 1А часть	0,81	Хорошая
Патрубок ЦСД	0,31	Хорошая
ЦНД, 24-я ступень	0,33	Хорошая
ЦСД, 23-я ступень	0,38	Хорошая
Конденсатор 1Б, люк	0,91	Хорошая
КПП-1А	0,30	Слабая
ВЭ-1Б	0,42	Отличная
ВЭ-1А	0,52	Отличная
ВРЧ II-1А	0,29	Слабая
СРЧ - 1А	0,32	Удовлетворительная
НРЧ-1Б	0,41	Отличная

вержденное техническим директором концерна “Росэнергоатом”, в котором отмечается целесообразность внедрения метода консервации с применением ОДА оборудования второго контура АЭС с ВВЭР перед остановом энергоблоков в ремонт. Такая предостановочная консервация проведена на Кольской АЭС на оборудовании второго контура АЭС с ВВЭР-1000.

Литература

1. Адсорбция октадециламина на металлических поверхностях/*И.Я. Дубровский, Л.М. Баталина, Ю.М. Третьяков и др.*: Сб. трудов “Технология энергоносителей”. - М.: МЭИ, 1989. - С. 34-41.
2. *Филипов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.М.* Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии ПАВ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - С.182.
3. А/с Способ определения концентрации поверхностно-активного вещества/*А.Ф. Дерендовский, В.П. Ницкевич, А.М. Кукушкин и др.*//Заявлено 16.11.89, №4758512/25.
4. *Поваров О.А., Томаров Г.В., Семенов В.Н.* Эффективный метод консервации энергетического оборудования//Энергоснабжение и водоподготовка. - 1998. - №1.

Поступила в редакцию 18.06.2001

УДК 621.039.519

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДОВ РАДИОАКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 2600 МэВ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ВОЛЬФРАМОМ

Ю.Е. Титаренко, Е.И. Карпихин, В.Ф. Батяев, А.Б. Колдобский,
В.М. Живун, Р.Д. Муламбетов, С.В. Квасова, Д.В. Фищенко
Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва

Р

Выполнены измерения выходов радиоактивных продуктов взаимодействия протонов с энергией 2600 МэВ с тонкой мишенью из естественного вольфрама. Измерения производились методом прямой γ -спектрометрии образцов, облученных на ускорителе У-10 ИТЭФ. Всего в эксперименте было определено 129 значений, из которых 10 независимых, 9 независимых метастабильных состояний, 6 суммарных независимых метастабильных и основных состояний и 104 кумулятивных выходов радиоактивных продуктов реакций. Полученные данные сравнены с результатами расчетов выходов, выполненных с использованием 7 расчетных программ: SEM95, SEM2k, LANET, CASCADE, NETC, INUCL, YIELDX. Результаты анализируются с точки зрения возможности образования вторичных продуктов реакций, представляющих потенциальную экологическую и технологическую опасность.

ВВЕДЕНИЕ

По мнению ведущих мировых экспертов к числу перспективных ядерных технологий ближайшего будущего относится электроядерный метод [1, 2]. Он сочетает в себе высокую степень ядерной безопасности с широкими технологическими возможностями, в том числе с пригодностью для реализации трансмутации радиоактивных отходов [3-5]. Это открывает принципиальные возможности решения важнейшей задачи ядерной энергетики – избавление от накапливаемой техногенной радиоактивности. Хорошо известно, что именно эта проблема становится в настоящее время ключевой при оценке перспектив развития ядерной энергетики.

Создание электроядерных установок (ЭЛЯУ) базируется на объединении трех технологий:

- химическое разделение компонентов радиоактивных материалов;
- получение высокоэнергетических пучков протонов большой мощности;
- реакторная технология с существенным расширением области энергий в сторону их увеличения для создания комплекса «мишенное устройство-бланкет».

© Ю.Е. Титаренко, Е.И. Карпихин, В.Ф. Батяев, А.Б. Колдобский,
В.М. Живун, Р.Д. Муламбетов, С.В. Квасова, Д.В. Фищенко, 2001

Мишенное устройство (МУ) является одним из основных узлов любой ЭЛЯУ. В нем под действием протонного пучка высокоточного ускорителя происходит процесс множественной генерации нейтронов, используемых затем для развития и управления цепной реакции в blankets ЭЛЯУ.

В качестве основного функционального материала МУ во многих концептуальных проектах ЭЛЯУ рассматривается вольфрам [6,7], обладающий рядом важных (в рассматриваемом контексте) преимуществ. Он имеет высокую плотность, достаточно технологичен, у него отсутствуют химическая активность и биологическая токсичность (свойственные, например, свинцу и ртути). Это и делает актуальным накопление и анализ ядерных данных для вольфрама, необходимых для проектных и эксплуатационных оценок важнейших рабочих параметров МУ ЭЛЯУ, и обуславливает вопрос о необходимости учета образующихся вторичных продуктов реакций, которые могут представлять собой потенциальную радиобиологическую, технологическую и экологическую опасность.

Сложность протекания физических процессов в МУ и многообразие их возможных конструкций заставляет предположить, что основными методами при их проектировании станут расчетно-теоретические с применением разветвленных многофункциональных расчетных программ, реализующих определенные физические модели протекания процессов в МУ. Следует, однако, отметить, что к настоящему времени программы такого рода часто не обладают прогностическими возможностями оценки ядерных констант с необходимой для решения практических задач конструирования ЭЛЯУ точностью.

Таким образом, накопление ядерно-физических данных для вольфрама при его облучении протонами имеет большое значение как для тестирования и совершенствования расчетных программ, так и для использования в качестве самостоятельных ядерных констант. При этом важнейшими данными такого рода являются сечения образования вторичных нуклидов или их выходы. Работы подобного рода выполняются в ведущих лабораториях мира [8], что безусловно повышает достоверность экспериментальных результатов.

ОБЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Облучение экспериментальных образцов ^{nat}W с целью определения выходов радиоактивных продуктов реакции (РПР) при энергии протонов 2600 МэВ производилось на пучке, выводимом из синхротрона ИТЭФ У-10 при помощи системы медленного вывода. Схема вывода показана на рис.1.

Сформированный пучок имеет следующие параметры: форма – эллипс с осями $\sim 25 \times 15$ мм, интенсивность – $\sim 2 \times 10^{11}$ протон/имп., частота следования ~ 16 имп./мин, длительность одного импульса ~ 0.5 с.

В исследованиях использовались экспериментальные образцы из металлической вольфрамовой фольги естественного изотопного содержания: ^{180}W – 0.13%, ^{182}W – 26.3%, ^{183}W – 14.3%, ^{184}W – 30.67%, ^{186}W – 28.6% [9]. Поскольку измерения выполнялись относительным методом, одновременно с образцами вольфрама облучались мониторы, выполненные из алюминиевой фольги. Выбор алюминия в качестве монитора в данном эксперименте обусловлен целым рядом причин. Он является моноизотопным элементом, может быть получен с высокой химической чистотой, весьма технологичен, и, что наиболее важно, энергетическая зависимость реакции $^{27}Al(p,x)^{22}Na$ с образованием ^{22}Na достаточно хорошо изучена [10].

После изготовления экспериментальные образцы и мониторы взвешивались на аналитических весах Sartorius BP-61 и “заваривались” вместе с тонкой алюминиевой прокладкой между ними в полиэтиленовые пакетики для облучения.

При облучении сборка в виде “сэндвича” (экспериментальный образец, алюминий-

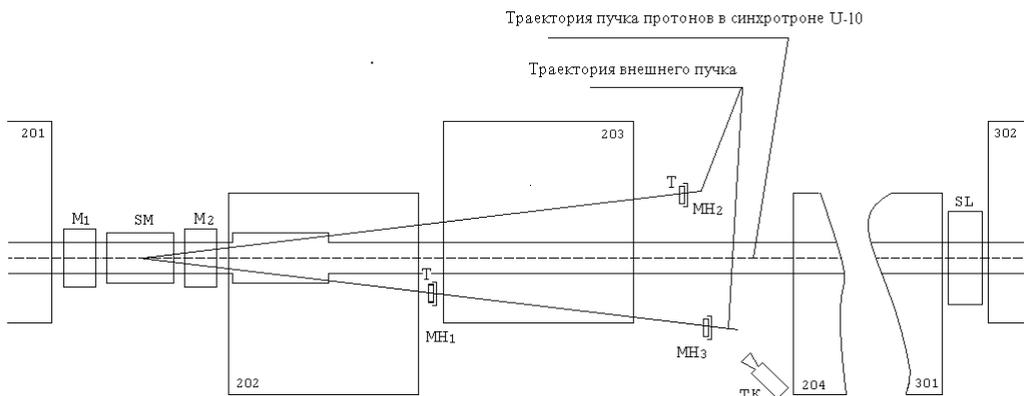


Рис. 1. Схема вывода внешнего протонного пучка с энергией 800 – 2600 МэВ: 201, 202, ..., 302 – магнитные блоки протонного синхротрона U-10; M_1 , M_2 – корректирующие магниты; SM – септум-магнит; SL – магнитная линза; MH_1 , MH_2 , MH_3 – мишени для наблюдения за выведенным пучком; ТК – телевизионная система для наблюдения за выведенным пучком; Т – экспериментальный образец

вая прокладка и монитор) устанавливались перпендикулярно пучку. Диаметры экспериментального образца и стандарта были идентичны и равны 10.5 мм, их толщины 31.43 мг/см² и 114.67 мг/см² соответственно. Время облучения “сэндвича” равнялось 30 мин, при этом флюенс протонов с энергией 2600 МэВ составлял $5.4 \cdot 10^{13}$ р/см².

После облучения экспериментальный образец и монитор перепаковывались повторно в герметичные полиэтиленовые пакетики для того, чтобы предотвратить потери возможных газообразных продуктов реакций и избежать радиоактивного загрязнения.

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Измерения выполнялись методом прямой γ -спектрометрии облученных образцов без их предварительной химической сепарации. В эксперименте использовался спектрометр стандартной архитектуры, в состав которого входили HPGe-детектор GC 2518, модуль 1510 (АЦП, усилитель, блок высокого напряжения) и мастер-плата S – 100, которая в составе IBM PC эмулирует многоканальный анализатор. Энергетическое разрешение установки составляло 1.8 кэВ по γ -линии 1332.5 кэВ ^{60}Co . Детектор был откалиброван для 8 расстояний «источник – детектор» от 40 мм до 375 мм с использованием стандартного набора ОСГИ № 9402. Выбор расстояния осуществлялся исходя из допустимой загрузки спектрометрического тракта.

Длительность отдельного измерения варьировалась от 5 минут (непосредственно после облучения) до трех суток. Измерения облученного образца продолжались в течение 6 месяцев. Это позволило идентифицировать и исследовать РПР в широком интервале периодов полураспада от 12.6 мин. (^{157}Ho) до 1.87 г. (^{172}Hf)

Обработка спектров излучения выполнялась по программе GENIE 2000, которая использовалась как в пакетном, так и в интерактивном режимах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Подробно методика экспериментального определения выходов РПР изложена в авторских работах [11,12].

При двухзвенной цепочке распада генетически связанных РПР ($N_1 \rightarrow N_2$) формулы для вычисления кумулятивного и независимого выходов РПР выглядят следующим образом:

$$\sigma_1^{cum} = \frac{A_0}{\eta_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot F_1 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (1)$$

$$\sigma_1^{cum} = \frac{A_1}{v_1 \cdot \eta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot F_1 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (2)$$

$$\sigma_2^{ind} = \left(\frac{A_2}{F_2} + \frac{A_1 \cdot \lambda_1}{F_1 \cdot \lambda_2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (3)$$

$$\sigma_2^{cum} = \sigma_2^{ind} + v_1 \cdot \sigma_1^{cum} = \left(\frac{A_1}{F_1} + \frac{A_2}{F_2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (4)$$

где N_1, N_2 – число образовавшихся ядер-продуктов; σ_1^{cum} – кумулятивный выход первого нуклида (или независимый в случае отсутствия предшественников); σ_2^{cum} – кумулятивный выход второго нуклида; σ_2^{ind} – независимый выход второго нуклида; λ_1, λ_2 – постоянные распада; v_1, v_2 – вероятность перехода нуклида N_1 в нуклид N_2 , т.е. коэффициент ветвления; N_T – число ядер ${}^{A_M}Z_M T$ в экспериментальном образце; η_1, η_2 – абсолютные квантовые выходы γ -линий; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – эффективность регистрации спектрометра при энергиях γ -линий E_1 и E_2 ; τ – длительность одного протонного импульса; T – период следования импульсов; A_1, A_2 – коэффициенты, определяемые МНК-фитированием экспериментальных точек; F_i – временные функции, вычисляемые из выражения

$$F_i = \left(1 - e^{-\lambda_i \tau} \right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i kT}}{1 - e^{-\lambda_i T}} \text{ при значениях } i = 1, 2, Na. \quad (5)$$

Очевидно, что значения выходов, полученные по формулам (1) и (2), идентичны, но обычно в окончательных результатах приводится значение, полученное из выражения (1), т.к. в этом случае надежность его определения выше.

Погрешности $\Delta\sigma_i$ независимых и кумулятивных выходов РПР, вычисленные с использованием формул (1)-(4), определялись с использованием формул переноса ошибок. Поскольку во многих случаях для определения выходов использовалась не одна, а несколько принадлежащих каждому из РПР γ -линий, значения выходов были получены усреднением нескольких величин ($\sigma_i \pm \Delta\sigma_i$), вычисленных по различным γ -линиям

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_i \sigma_i \cdot W_i}{\sum_i W_i}, \quad (6)$$

где

$$W_i = \frac{1}{\Delta\sigma_i^2}. \quad (7)$$

Погрешность $\Delta\bar{\sigma}$ (без учета погрешности мониторингования) вычислялась по формулам

$$\Delta\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{\sigma} - \sigma_i)^2}{(n-1) \cdot \sum_i W_i}}, \quad (8)$$

$$\overline{\Delta\sigma} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i W_i}}, \quad (9)$$

Для вычисления полной погрешности из значений, полученных по формулам (8)

и (9) выбиралось максимальное значение $\overline{\Delta\sigma} = \max(\overline{\Delta\sigma}^-, \overline{\Delta\sigma}^+)$.

В этом случае формула для ее вычисления имеет вид

$$\frac{\overline{\Delta\sigma}}{\overline{\sigma}} = \sqrt{\left(\frac{\overline{\Delta\sigma}}{\overline{\sigma}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma_{st}}{\overline{\sigma}}\right)^2}. \quad (10)$$

Как показывает анализ, основной вклад в полную погрешность значений выходов РПР, определяемую соотношением (10), вносят неопределенности значений ядерных данных - абсолютных квантовых выходов и сечений мониторинговых реакций.

Формула (10) является окончательным соотношением, определяющим погрешности измеренных значений выходов РПР. Для различных РПР их значения находятся в диапазоне $\cong(10-25)$ %.

Соотношения (1) – (9) реализованы в авторской программе SIGMA [12], использующей базу данных PCNUDAT [13]. Конечным результатом работы этой программы являются значения выходов РПР и их погрешности.

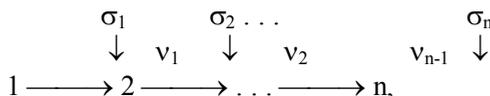
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований по определению выходов продуктов реакций в ^{nat}W , облученном протонами с энергией 2.6 ГэВ, представлены в табл. 1. Всего представлено 129 значений выходов, из которых 10 независимых (i), 9 независимых выходов метастабильных состояний $i(\Sigma m_j)$ (если такое состояние одно, индекс суммы отсутствует), 6 суммарных независимых выходов метастабильных и основных состояний $i(\Sigma m_j+g)$ и 104 кумулятивных (c).

Помимо экспериментальных результатов в табл. 1 представлены значения выходов РПР, полученных расчетным путем с использованием программ SEM95 [14], SEM2k [15], LANET [16], CASCADE [17], HETS [18], INUCL [19], YIELDX [20].

При сравнении расчетных и экспериментальных значений выходов РПР принималось во внимание, что расчетное моделирование по любой программе позволяет получить только независимые выходы, в то время как в эксперименте в большинстве случаев определяются значения кумулятивных выходов. Поэтому процедура сравнения должна включать методику вычисления кумулятивных выходов на основе расчетных значений независимых выходов предшественников рассматриваемого нуклида по цепочкам распада.

Именно, если цепочку образования n радиоактивных ядер представить в виде



то расчетное значение кумулятивного выхода последнего n -го нуклида может быть вычислено как

$$\sigma_n^{cum} = \sigma_n^{ind} + \sum_{i=1}^{n-1} (\sigma_i^{ind} \prod_{j=i}^{n-2} v_j). \quad (11)$$

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные сечения выходов радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом

РПР	T _{1/2}	Тип	Эксп. выход (мбарн)	Расчетные выходы (мбарн)							YIELDX
				CEM95	CEM2k	LAHET	CASCADE	HETC	INUCL		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
¹⁸⁷ Re	19.9h	i	3.51 ± 0.58	0.632	1.01	2.96	1.54	3.10	0.754	1.43	
¹⁷⁷ W	135m	c	13.0 ± 1.6	6.64	7.73	11.2	7.97	13.6	10.4	23.6	
¹⁷⁶ W	2.5h	c	7.86 ± 2.51	6.67	6.94	11.0	8.79	13.2	10.9	22.3	
¹⁸⁴ Ta	8.7h	c	4.39 ± 0.44	4.17	1.29	5.07	7.11	1.12	8.27	3.74	
¹⁸³ Ta	5.1d	c	10.4 ± 1.0	16.1	7.07	17.4	18.1	44.0	20.5	7.35	
¹⁸² Ta	114.43d	c	12.8 ± 1.3	--	--	--	--	--	--	--	
^{176m1} Ta	2.36h	i(m1+m2)	7.98 ± 1.34	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷⁶ Ta	8.09h	c	29.3 ± 3.4	13.8	13.5	19.3	15.2	20.5	24.4	38.0	
¹⁷⁵ Ta	10.5h	c	25.7 ± 2.8	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷⁴ Ta	1.14h	c	25.5 ± 2.8	10.5	11.6	15.1	14.4	17.7	19.7	36.6	
¹⁷³ Ta	3.14h	c	23.9 ± 3.2	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁸¹ Hf	42.39d	c	1.24 ± 0.12	1.92	0.272	1.83	3.57	2.34	2.35	0.398	
^{180m1} Hf	5.5h	i(m)	0.688 ± 0.085	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷⁵ Hf	70d	c	33.0 ± 3.0	18.1	16.6	21.5	19.0	22.8	32.5	54.6	
¹⁷³ Hf	23.6h	c	29.5 ± 2.5	16.3	15.8	18.1	18.8	21.1	30.1	53.8	
¹⁷³ Hf	23.6h	i	5.52 ± 2.43	6.63	5.24	4.13	5.26	3.70	11.5	15.9	
¹⁷² Hf	1.87y	c	21.7 ± 2.1	15.2	13.6	17.3	21.0	21.3	31.9	51.5	
¹⁷¹ Hf	12.1h	c	19.4 ± 2.4	13.9	13.2	14.9	20.1	19.6	27.7	39.3	
¹⁷⁰ Hf	16.01h	c	19.4 ± 4.0	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷³ Lu	1.37y	c	33.4 ± 3.3	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷² Lu	6.70d	i(m1+m2+g)	3.68 ± 0.5	3.00	2.10	3.09	1.66	1.01	4.59	3.47	
¹⁷² Lu	6.70d	c	25.5 ± 2.4	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷¹ Lu	8.24d	i(m+g)	10.7 ± 2.0	4.42	2.56	3.93	3.17	1.63	7.20	5.13	
¹⁷¹ Lu	8.24d	c	29.7 ± 2.5	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁷⁰ Lu	2.012d	c	24.5 ± 2.2	17.8	15.0	17.8	23.3	19.8	34.7	28.5	
¹⁶⁹ Lu	34.06h	c	21.9 ± 1.8	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁶⁷ Lu	51.5m	c	23.1 ± 2.5	--	--	--	--	--	--	--	
¹⁶⁹ Yb	32.026d	c	27.4 ± 2.5	18.9	15.5	17.9	23.8	21.1	35.5	26.0	
¹⁶⁷ Yb	17.5m	c	24.6 ± 2.9	--	--	--	--	--	--	--	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
^{130m} Nd	5.5h	i(m)	2.84 ± 0.49	--	--	--	--	--	--	11
¹³⁹ Ce	137.640d	c	19.6 ± 1.7	22.3	14.8	12.6	20.8	17.8	16.0	10.6
¹³⁵ Ce	17.7h	c	17.6 ± 1.5	20.4	14.0	8.92	18.5	17.4	14.6	7.74
¹³⁴ Ce	3.16d	c	17.7 ± 1.8	19.6	14.1	9.76	20.5	16.0	13.3	8.01
¹³³ Ce	4.9h	i	3.77 ± 0.39	--	--	--	--	--	--	--
¹³² Ce	3.51h	c	16.1 ± 2.7	15.0	13.0	9.68	17.1	17.3	10.8	7.48
¹³² La	4.8h	c	14.3 ± 1.7	--	--	--	--	--	--	--
¹³³ Ba	3848.9d	c	18.2 ± 4.1	21.6	14.1	9.79	18.2	16.4	13.2	7.97
¹³¹ Ba	11.50d	c	16.0 ± 1.3	20.5	14.1	10.9	17.6	16.1	13.0	7.31
¹²⁸ Ba	2.43d	c	15.4 ± 1.5	16.5	13.5	11.3	16.0	15.8	9.73	6.58
¹²⁶ Ba	100m	c	7.86 ± 1.12	10.8	11.6	1.52	10.4	0.043	5.95	4.07
¹²⁹ Cs	32.06h	c	18.6 ± 1.7	20.8	14.1	10.6	15.4	19.4	11.9	6.72
¹²⁷ Xe	36.4d	c	15.2 ± 1.3	19.8	13.6	12.0	16.0	18.5	11.4	5.35
¹²⁵ Xe	16.9h	c	14.1 ± 1.2	19.0	13.1	10.9	13.9	18.2	8.98	3.64
¹²³ Xe	2.08h	c	15.5 ± 1.3	15.4	12.3	6.61	10.8	18.2	6.24	5.64
¹²² Xe	20.1h	c	11.6 ± 1.0	13.0	11.5	3.58	11.1	14.1	5.57	6.00
^{121m} Te	154d	i(m)	0.449 ± 0.072	--	--	--	--	--	--	--
¹²¹ Te	19.16d	c	10.8 ± 1.0	--	--	--	--	--	--	--
^{119m} Te	4.70d	c	1.94 ± 0.17	--	--	--	--	--	--	--
¹¹⁹ Te	16.05h	c	9.06 ± 0.76	--	--	--	--	--	--	--
¹¹⁷ Te	62m	c	8.71 ± 0.79	10.1	9.42	7.40	8.18	14.2	3.57	2.29
^{116m} Sb	5.00h	i(m)	1.07 ± 0.22	--	--	--	--	--	--	--
¹¹⁵ Sb	32.1m	c	9.74 ± 0.89	10.8	11.6	10.6	6.41	16.7	3.03	3.15
¹¹³ Sn	115.09d	c	7.35 ± 0.64	--	--	--	--	--	--	--
¹¹¹ In	2.8047d	c	7.33 ± 0.63	10.0	9.22	9.98	8.19	14.7	3.09	3.02
¹¹⁰ In	4.9h	i	3.25 ± 0.30	--	--	--	--	--	--	--
¹⁰⁹ In	4.2h	c	5.06 ± 0.44	7.06	7.77	5.55	5.04	13.8	1.64	2.27
^{106m} Ag	8.28d	i(m)	1.68 ± 0.16	--	--	--	--	--	--	--
¹⁰⁵ Ag	41.29d	c	5.27 ± 0.69	5.73	6.95	10.1	4.29	11.9	0.994	2.90
¹⁰⁰ Pd	3.63d	c	1.18 ± 0.26	1.21	3.40	3.15	2.14	8.73	0.240	0.754
¹⁰⁰ Rh	20.8h	i(m+g)	2.53 ± 0.30	--	--	--	--	--	--	--
¹⁰⁰ Rh	20.8h	c	3.74 ± 0.48	--	--	--	--	--	--	--
^{99m} Rh	4.7h	c	2.38 ± 0.29	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
⁹⁶ Tc	4.28d	i(m+g)	1.71 ± 0.20	--	--	--	--	--	--	--
^{93m} Mo	6.85h	i(m)	1.59 ± 0.14	--	--	--	--	--	--	--
⁹⁰ Nb	14.60h	c	2.55 ± 0.23	0.748	2.23	5.00	0.497	3.33	0.103	4.28
⁸⁹ Zr	78.41h	c	3.42 ± 0.29	--	--	--	--	--	--	--
⁸⁸ Zr	83.4d	c	2.53 ± 0.27	0.351	1.41	9.45	1.49	2.28	0.103	14.0
⁸⁸ Y	106.65d	i(m+g)	1.54 ± 0.22	0.213	0.812	3.98	0.651	--	--	2.64
⁸⁸ Y	106.65d	c	3.45 ± 0.34	--	--	--	--	--	--	--
⁸⁷ Y	79.8h	c	4.08 ± 0.35	--	--	--	--	--	--	--
⁸⁵ Sr	64.84d	c	3.76 ± 0.39	--	--	--	--	--	--	--
⁸³ Sr	32.41h	c	1.94 ± 0.92	0.122	0.65	6.47	0.960	0.645	0.240	9.18
⁸⁴ Rb	32.77d	i(m+g)	1.29 ± 0.14	--	0.211	2.00	0.806	--	--	1.38
⁸⁵ Rb	86.2d	c	3.30 ± 0.58	0.213	0.941	11.5	2.33	0.645	0.257	13.0
^{82m} Rb	6.472h	i(m)	1.87 ± 0.17	--	--	--	--	--	--	--
⁷¹ Kr	74.4m	c	1.69 ± 0.18	--	0.145	2.51	0.326	0.172	0.189	2.56
⁷⁵ Se	119.779d	c	2.35 ± 0.22	0.057	0.247	6.03	2.47	0.022	0.240	10.9
⁷³ Se	7.15h	c	1.06 ± 0.12	--	--	--	--	--	--	--
⁷⁴ As	17.77d	i	1.37 ± 0.16	--	0.044	1.87	1.08	--	0.017	2.34
^{68m} Zn	13.76h	i(m)	0.416 ± 0.039	--	--	--	--	--	--	--
⁵⁹ Fe	44.472d	c	0.845 ± 0.103	--	--	0.033	0.326	--	--	0.842
⁵⁴ Mn	312.11d	i	2.48 ± 0.41	--	0.004	0.661	0.446	--	0.034	5.61
⁵¹ Cr	27.7025d	c	4.48 ± 1.34	--	--	0.264	0.84	--	0.103	3.92
⁴⁸ V	15.9735d	c	0.551 ± 0.060	--	--	0.066	0.051	--	0.034	1.48
⁴⁸ Sc	43.67h	i	0.66 ± 0.088	--	--	0.066	0.086	--	--	0.442
⁴³ K	22.3h	c	0.673 ± 0.081	--	--	0.033	0.326	--	--	0.982
²⁵ Mg	20.915h	c	0.899 ± 0.087	--	--	--	0.017	--	--	0.622
²⁴ Na	14.9590h	c	4.04 ± 0.34	--	--	0.099	0.069	--	--	1.92
⁷ Be	53.29d	i	8.61 ± 1.01	--	--	--	--	--	--	3.45

Значения коэффициентов ветвления ядерных цепочек были взяты из работы [21].

Очевидно, что такой подход несколько сужает объем расчетной информации по выходам РПР, которая может быть использована при проведении сравнения экспериментальных и расчетных значений. Всего для сравнения использовались экспериментальные и расчетные выходы 75 РПР, а для остальных 54 РПР экспериментальные значения выходов не могли быть сопоставлены с соответствующими расчетными по следующим причинам.

- Отсутствие расчетных значений независимых выходов метастабильных состояний, необходимых для расчета полного выхода нуклида при наличии экспериментальных значений либо лишь независимых выходов метастабильных состояний (^{178m}Ta , ^{180m}Hf , ^{139m}Nd , ^{121m}Te , ^{118m}Sb , ^{106m}Ag , ^{93m}Mo , ^{82m}Rb , ^{69m}Zn), либо лишь их кумулятивных выходов (^{160m}Ho , ^{119m}Te , ^{99m}Rh). В этих случаях сравнение не может быть проведено, поскольку представленные расчетные программы не позволяют вычислить независимые выходы изомерных состояний.

- Коэффициенты ветвления изомерных состояний генетических предшественников либо не известны, либо вероятность распада изомерного состояния по всем каналам, кроме изомерного перехода, превышает 1% (^{182}Ta , ^{163}Tm , ^{152}Tb , ^{151}Tb , ^{150}Tb , ^{149}Tb , ^{149}Gd , ^{149}Eu , ^{147}Tb , ^{147}Gd , ^{145}Gd , ^{133}Ce , ^{132}La , ^{121}Te , ^{119}Te , ^{113}Sb , ^{110}In , ^{100}Rh , ^{96}Tc , ^{89}Zr , ^{87}Y , ^{85}Sr , ^{73}Se).

- Для РПР измерены как независимый, так и кумулятивный выходы. В этом случае для сравнения выбирается независимый выход (^{88}Y), поскольку проводится непосредственное сравнение эксперимента с расчетом без использования формулы (10).

- Различие между измеренными кумулятивными выходами двух соседних элементов цепочки сопоставимо с погрешностью измерений (что свидетельствует о малом значении независимого выхода дочернего нуклида в сравнении с кумулятивным). Тогда (с целью избежать двойного сравнения) для него выбирается экспериментальное значение кумулятивного выхода нуклида с меньшей погрешностью ($^{175}\text{Ta} \rightarrow ^{175}\text{Hf}$, $^{173}\text{Ta} \rightarrow ^{173}\text{Hf} \rightarrow ^{173}\text{Lu}$, $^{172}\text{Hf} \rightarrow ^{172}\text{Lu}$, $^{171}\text{Hf} \rightarrow ^{171}\text{Lu}$, $^{170}\text{Hf} \rightarrow ^{170}\text{Lu}$, $^{169}\text{Lu} \rightarrow ^{169}\text{Yb}$, $^{167}\text{Lu} \rightarrow ^{167}\text{Yb} \rightarrow ^{167}\text{Tm}$, $^{166}\text{Yb} \rightarrow ^{166}\text{Tm}$, $^{161}\text{Tm} \rightarrow ^{161}\text{Er}$, $^{157}\text{Er} \rightarrow ^{157}\text{Ho} \rightarrow ^{157}\text{Dy}$, $^{156}\text{Er} \rightarrow ^{156}\text{Ho}$, $^{155}\text{Dy} \rightarrow ^{155}\text{Tb}$, $^{153}\text{Tb} \rightarrow ^{153}\text{Gd}$, $^{146}\text{Eu} \rightarrow ^{146}\text{Gd}$; подчеркнутые нуклиды использовались для сравнения).

Для корректного сравнения расчетных результатов, полученных по различным программам, они были перенормированы на единое значение сечения неупругого взаимодействия протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом. Это значение было рассчитано по формулам работы [22] и принято равным 1714 мбарн.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как указывалось выше, основой создания константного обеспечения работ по созданию ЭЛЯУ станут расчетные программы, позволяющие учесть физические и конструктивные особенности этих установок. Однако это станет возможным лишь при условии достижения этими программами необходимой точности прогнозирования важнейших конструкционных, эксплуатационных, радиобиологических и радиозоологических параметров ЭЛЯУ.

В качестве примера верификации этих программ при использовании естественного вольфрама в качестве основного материала МУ ЭЛЯУ рассмотрим накопление в МУ долгоживущих α -излучателей, представляющих собой (в силу высокой радиотоксичности) один из наиболее значимых факторов долговременной радиозоологической опасности [23].

В смеси РПР в данном случае возможно образование и накопление четырех таких

нуклидов – ^{146}Sm ($T_{1/2} = 1 \times 10^8$ лет), ^{148}Gd ($T_{1/2} = 74.6$ лет), ^{150}Gd ($T_{1/2} = 1.8 \times 10^6$ лет) и ^{154}Dy ($T_{1/2} = 3 \times 10^6$ лет) по цепочкам распада, приведенных на рис. 2.

В ходе описываемого эксперимента нами были идентифицированы, с последующим определением выхода, лишь РПП с $A = 146$ (^{146}Eu и ^{146}Gd) и $A = 150$ (^{150}Tb). Генетические предшественники ^{148}Gd и ^{154}Dy в смеси РПП с достаточной надежностью идентифицированы не были. Причины этого были индивидуальны в каждом случае, однако по существу они сводились к наличию « фоновых » РПП с близкими периодами полураспада и/или энергиями γ -линий с заметным квантовым выходом, не поддающихся программному отделению. В принципе, выходы генетических предшественников ^{148}Gd и ^{154}Dy (в первую очередь, ^{148}Tb и ^{154}Ho) могут быть определены и в рамках используемого метода, однако для этого необходимо проведение «точечных» целевых экспериментов со специальным выбором временных параметров облучения и измерения.

Как видно из табл. 1 и рис. 2, с учетом изложенных выше критериев формирования информационного массива расчетных и экспериментальных данных для взаимного сравнения непосредственно такое сравнение возможно лишь для ^{146}Sm . Из рис. 2 видно,

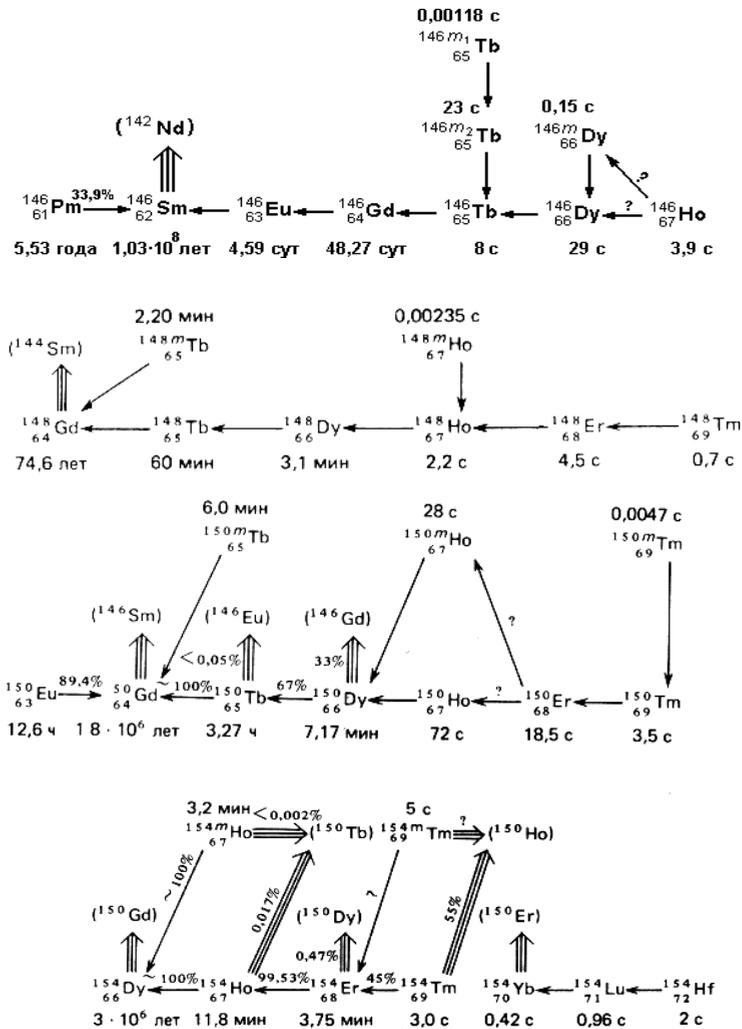


Рис. 2. Цепочки распада, содержащие долгоживущие α -излучатели из числа РПП естественного вольфрама

что кумулятивный выход ^{146}Sm не может быть меньше кумулятивного выхода ^{146}Gd , измеренного нами в настоящей работе (18.6 ± 1.6 мбарн) и использованного для сравнения. Между тем, расчетные значения кумулятивного выхода этого нуклида различаются почти в 3 раза (от 8.46 мбарн для программы LANET до 24.6 для CASCADE). Особо следует отметить значительное (фактор 2.2) занижение величины этого выхода программой LANET, которая считается одной из наиболее часто используемых программ моделирования нуклон-ядерных взаимодействий в рассматриваемой области энергий налетающих протонов.

Исходя из структуры изобарной цепочки с $A = 150$ (рис.2), кумулятивный выход ^{150}Gd не может быть меньше кумулятивного выхода ^{150}Tb , измеренного в настоящей работе (9.23 ± 1.23). РПП с $A = 150$ не были включены в информационный массив для сравнения из-за наличия значительного (36%) коэффициента ветвления на α -распад его короткоживущего ($T_{1/2} = 7.17$ мин) предшественника ^{150}Dy . Однако в силу особой важности обсуждаемого вопроса нами в виде исключения были выполнены оценки расчетных значений кумулятивного выхода ^{150}Tb с учетом отмеченной особенности рассматриваемой изобарной цепочки. Результаты оценок сведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о том, что и для ^{150}Tb (следовательно, и для ^{150}Gd) при сравнении расчета с экспериментом наблюдаются те же тенденции, что и отмеченные выше для $A = 146$, т.е. снова имеет место значительное различие между расчетными выходами, полученными по различным программам (вплоть до фактора 2.5) и некоторое занижение величины этого выхода программой LANET (фактор 1.3 при экспериментальной погрешности величины выхода 13%). Следует добавить, что для сравнения нами использовались экспериментальные значения кумулятивных выходов нуклидов из соответствующих изобарных цепочек, не учитывающие независимых выходов долгоживущих α -излучателей, а также их возможные образование «слева»(при распаде ^{146}Pm и ^{150}Eu , соответственно). Учет этого обстоятельства может еще более увеличить указанный выше фактор занижения.

ВЫВОДЫ

Количество проанализированных по описанным критериям данных недостаточно для формулировки каких-либо однозначных выводов. Тем не менее можно отметить тенденцию к занижению одной из наиболее широко используемых для практических расчетов ЭЛЮ программ (LANET) скорости образования и накопления важнейших нуклидов из группы наиболее радиотоксичных РПП. Это следует учитывать при анализе долгосрочных прогнозов накопления техногенной радиоактивности при различных сценариях развития ядерной энергетики, составляемых в настоящее время.

Сказанное позволяет сделать выводы о необходимости как дальнейшего накопления экспериментальной информации о выходах РПП при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с различными материалами, в первую очередь, изотопно-обогащенными, так и совершенствования физических моделей протекания внутриядерного каскада и основанных на них расчетных программ, представляющих собой методическую основу создания ЭЛЮ. Особо следует отметить настоятельную необходимость

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные сечения выхода ^{150}Tb при взаимодействии протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом

РПП	Эксп. выход (мбарн)	Расчетные. выходы (мбарн)						
		SEM95	SEM2k	LANET	CASCADE	HETC	INUCL	YIELDX
^{150}Tb	9.23 ± 1.23	10.9	9.4	7.1	13.7	11.6	17.6	12.0

расширения методической базы экспериментальных исследований смесей РПП с целью обязательной идентификации и количественного исследования радионуклидов, представляющих собой наибольшую потенциальную экологическую опасность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность МНТЦ за финансовую поддержку данной работы, а также докторам В.С. Барашенкову, Н.В. Степанову, С.Г. Машнику, Т.А. Габриэлю, А.Ж. Сиерку и Р.Е. Праелю за использование данных их расчетных программ.

Литература

1. *Van Tuyle Gregory J.* ATW Technology Development & Demonstration Plan: LANL Report LA-UR-99-1061; *Van Tuyle Gregory J.* ATW Technology & Scenarios: LANL Report LA-UR 99-771.
2. *Mukaiyama T.* OMEGA Program in Japan and ADS Development at JAERI»: Proc. of the Third Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications ADTT'99, Praha, June 1999. Мо-I-5.
3. *Rubbia C.* Status of the Energy Amplifier Concept: Proc. of the Second Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3-7, 1996. – P. 35-51.
4. *Bowman Ch.D.* Accelerator-driven systems for nuclear waste transmutation// Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. – 1998. – 48. – P. 505–556.
5. *Salvatores M.* Strategies for the Back-and-of the Fuel Cycle: A Scientific Point of View: Proc. of the Third Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications ADTT'99, Praha, June 1999 Мо-I-4.
6. *Mukaiyama T., Ogawa T., Mizurnoto M., Takizuka T., Hino R., and Oyama Y.* Omega Program & Neutron Science Project for Development of Accelerator Hybrid System at JAERI: IAEA Technical Committee Meeting on Feasibility and Motivation for Hybrid Concepts for Nuclear Energy Generation and Transmutation, Madrid, 17-19 Sept. 1997, Spain.
7. *Watanabe N.* JAERI 5 MW Spallation Source Project: Second Int. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98) (Gatlinburg, USA, Sept. 20-23, 1998), published by the American Nuclear Society, Inc. 1998. - P. 3-10.
8. *Michel R.* Excitation Functions for the Production of Residual Nuclides with Emphasis on Light Heavy Ions: Fifth Workshop On Simulating Accelerators Radiation Environments (Paris, July 17-18, 2000, France). - P. 27-54.
9. *Holden N.E., Martin R.L. and Barnes I.L.* Isotopic composition of the elements 1983//Pure & Appl. Chem. – 1984. - V. 56. - №. 6. - P. 675 – 694.
10. *Tobailem J.* «Sections Efficaces des Reactions Nucleaires Induites par Protons, Deutrons, Particules Alphas. V. Silicium» Note CEA-N-1466(5), Sacley, 1981.
11. Report of the ISTS Project #839B-99, Moscow, Feb.2001, edited by Yu.E. Titarenko.
12. *Titarenko Yu.E. et al.* Experimental and Computer Simulation Study of the Radionuclides Produced in Thin ^{209}Bi Targets by 130 MeV and 1,5 GeV Proton-Induced Reactions//NIM, A414 (1998), P. 73-99.
13. *Kinsey R.R. et al.* Proc. 9th Int. Symp. of Capture-Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, 8-12 October 1996, Budapest, Hungary.
14. *Gudima K.K., Mashnik S.G. and Toneev V.D.*//Nucl. Phys. – 1983. -A 401. – 329. JINR, Dubna, 1995; OECD Nuclear Energy Agency Data Bank, Paris, France, 1995;
15. *Mashnik S.G. and Sierk A.J.* CEM2k - Recent Developments in CEM: Proc. of the Fourth Intern. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp00), November 13-15, 2000, Washington, DC, USA, (American Nuclear Society, La Grange Park, IL, USA, 2001). - P. 328-341.
16. *Prael R.E. and Lichtenstein H.* Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-89-3014 (1989).
17. *Barashenkov V.S. et al.* JINR Report R2-85-173, Dubna, 1985; Sov. J. Nucl. Phys. 39, 715 (1984); Nucl. Phys. A 338, 413 (1980).
18. *Armstrong T.W. and Chandler K.C.* //Nucl.Sci.Eng. – 1972. – 49. - 110.

19. *Stepanov N. V.* ITEP Preprint No. ITEP-129, Moscow, 1985; ITEP-81, Moscow, 1987; ITEP-55-88, Moscow, 1988 (in Russian).
20. *Silberberg R., Tsao C.H., and Barghouty A.F.* Updated Partial Cross Sections of Proton-Nucleus Reactions//Astrophys. J. – 1998. – 501. – 911.
21. *Firestone R.B.* in: Tables of Isotopes, 8th ed.: 1998 Update (with CD ROM) edited by S.Y. Frank Chu (CD ROM Ed.), С.М. Baldin (Ed.), (Wiley Interscience, New York, 1996).
22. *Letaw J.R. et al.*//Astrophys. J. Suppl. - 1983. – 51. - 271.
23. *Saito M., Stankovskii A., Artisyuk V., Korovin Yu., Shmelev A., Titarenko Yu.* Radiological Hazard of Spallation Products in Accelerator-Driven System. - Emitted to Nucl. Sci. and Eng.

Поступила в редакцию 3.09.2001

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНЦЕПЦИИ НАСЫПНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ДЛЯ РБН*

Г.Б. Усынин, С.Г. Усынина

Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород



Предложена концепция насыпной активной зоны для быстрого реактора с использованием шаровой засыпки из твэл двух типов: запальных, с окисью плутония, и сырьевых, содержащих карбид обедненного урана. Дан предварительный анализ нейтронно-физических и гидравлических характеристик такой зоны. Отмечены преимущества насыпной активной зоны как сжигателя малых актинидов.

Идея применения засыпки шаровых твэлов, циркулирующих через активную зону, была реализована в высокотемпературных гелиевых реакторах на тепловых нейтронах [1]. При анализе применимости этой концепции к реакторам на быстрых нейтронах необходимо учесть, что объемная доля тяжелого металла в активной зоне РБН должна быть не ниже 30÷40 % (как в традиционных РБН), а концентрация легких ядер (С, N, O) - на порядок ниже, чем в ВТГР.

Пористость шаровой засыпки, т.е. объемную долю теплоносителя (в данном случае натрия e_{Na}), можно считать слабо зависящей от диаметра шаров [2]. Объемная доля материала топливного сердечника в засыпке может быть оценена как

$$\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon_{Na}}{(1 + \Delta)^3} \quad (1)$$

и зависит только от Δ - отношения толщины оболочки твэла $\delta_{об}$ к радиусу сердечника. Условие сохранения Δ одновременно может означать примерную равнопрочность сферических оболочек разного диаметра, нагруженных внутренним давлением.

Из условия сопоставимости теплонапряженности и перепада давления по первому контуру с насыпной активной зоной и характеристик активных зон реакторов БН традиционного типа можно ограничиться рассмотрением диаметра шаровых твэлов в диапазоне $d_{ТВЭЛ} = 6\div 15$ мм, а высоты засыпки $H_{АЗ}$ - от 0,7 до 1,5 м. В табл. 1 приведены некоторые характеристики такой насыпной активной зоны.

Не будем обсуждать здесь вопросы изготовления шаровых твэлов с такими характеристиками, отметим лишь, что существующие технологии покрытия топливных частиц плотными отложениями металлов и соединений различных химических элементов [3] позволят, по-видимому, решить этот вопрос и для данных размеров шаровых твэлов.

© Г.Б.Усынин, С.Г.Усынина, 2001

* Работа поддержана грантом Минобразования РФ по исследованиям в области ядерной техники

Таблица 1

Характеристики насыпной активной зоны

Δ		0,10	0,13	0,20
$\delta_{об}$	$d=6$ мм	0,50	0,62	0,86
	$d=10$ мм	0,83	1,03	1,42
	$d=15$ мм	1,25	1,55	2,14
ε_T		0,458	0,423	0,353
ε_{Na}		0,390	0,390	0,390
$\varepsilon_{об}$		0,152	0,187	0,257

Величина $\Delta = 0,13$ характеризует стержневые твэлы $6,9 \div 0,4$ мм (БН-600 и БН-800). Для дальнейших расчетов примем это значение и для насыпной активной зоны. Как видно из табл. 1, объемная доля топлива в ней в этом случае практически такая же, как в традиционных активных зонах БН, а доли конструкционного материала и теплоносителя отличаются в лучшую сторону.

Одним из принципиальных преимуществ насыпной активной зоны является гибкость топливного цикла, возможность оперативного перехода к другому топливному материалу и к другой глубине выгорания. Имеются веские основания стремиться к тому, чтобы внутренний коэффициент воспроизводства был близок к единице. Анализ с помощью регрессионных моделей [4] показывает, что при рассматриваемых объемных долях компонентов невозможно добиться этого с окисным топливом; необходим переход на более плотные виды топлива (металл, карбид, нитрид). Однако окисное топливо предпочтительно для достижения большего процентного выгорания тяжелого металла. В качестве компромиссного решения можно предложить одновременное использование двух видов твэлов одинакового диаметра: запальных, содержащих окись плутония с пониженной плотностью ($\gamma = 0,67 \gamma_{теор}$), и сырьевых, содержащих карбид обедненного урана ($\gamma = 0,9 \gamma_{теор}$). Долю первых в засыпке обозначим через α .

Для упрощения расчетов не будем учитывать содержание ^{235}U в обедненном уране. С этой же целью примем, что оба типа твэлов многократно проходят через активную зону (принцип МПАЗ). В этом случае нуклидный состав топлива можно определить через флюенс z , и средняя концентрация нуклида i будет равна

$$\bar{\rho}_i = \alpha \frac{1}{z_3} \int_0^{z_3} \rho_{i3}(z) dz + (1 - \alpha) \frac{1}{z_c} \int_0^{z_c} \rho_{ic}(z) dz, \quad (2)$$

где z_3, z_c - предельные флюенсы запальных и сырьевых твэлов, достигаемые к моменту удаления их из активной зоны. Кинетику изменения нуклидного состава при выгорании в рассмотренной выше модели можно рассчитывать с однокрупными сечениями, усредненными по объему активной зоны. Самосогласование этих сечений с получающимся нуклидным составом достигается методом итераций. Расчеты производились по программе SYNTES-H с библиотекой БНАБ-78.

На рис. 1, 2 показано изменение относительных концентраций плутония и продуктов деления с ростом флюенса ($z = z_3 = z_c$) для одного из рассмотренных ниже вариантов ($\alpha = 0,15$). Предполагалось, что в запальных твэлах используется чистый ^{239}Pu . Можно отметить, что при $z > 0,7$ в запальных твэлах остается менее 20% от первоначального количества ^{239}Pu . В сырьевых твэлах накопление плутония достигает максимума ~ 80 кг/т при $z \sim 0,65$ и затем начинает снижаться. Накопление продуктов деления к этому моменту соответствует выгоранию $\sim 10\%$ т.а.

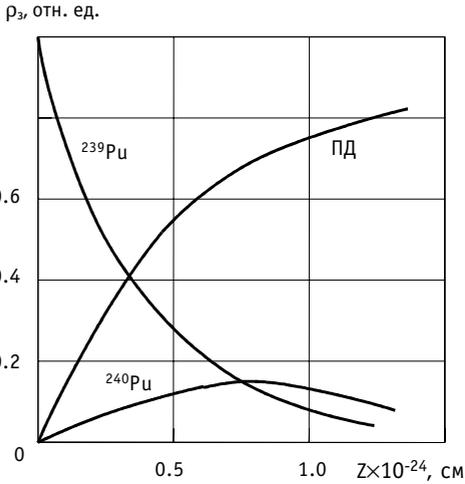


Рис.1. Накопление плутония и продуктов деления в запальных твэлах

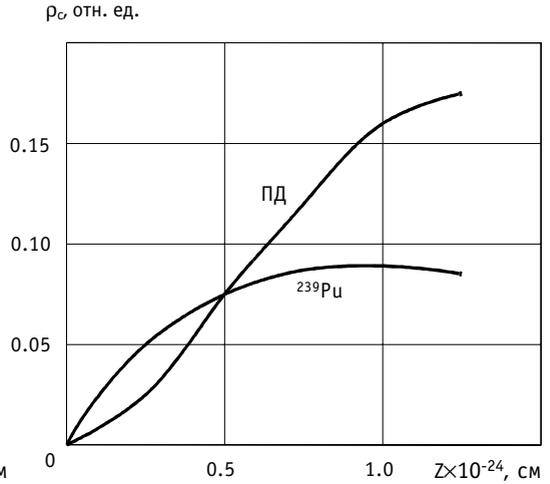


Рис.2. Накопление плутония и продуктов деления в сырьевых твэлах

Расчетная модель реактора в R - Z -геометрии представлена на рис. 3. При выборе радиального масштаба реактора в качестве ориентировки приняты размеры бака РБН типа БН-600. В расчетах, приведенных в данной статье, $R_{A3}=150$ см, $\Delta R_B=60$ см, $\Delta H_T=60$ см. Максимальная теплонапряженность активной зоны определяется допустимыми тепловыми потоками с поверхности твэлов и величиной этой поверхности, приходящейся на единицу объема. Согласно [5] для БН-600 последняя величина оценивается как $\sim 3,3$ см⁻¹. Для насыпной активной зоны она равна 3,84/d. Если принять тепловые потоки в стержневой и насыпной зонах близкими, то и максимальные теплонапряженности будут также близкими при $d \leq 12$ мм.

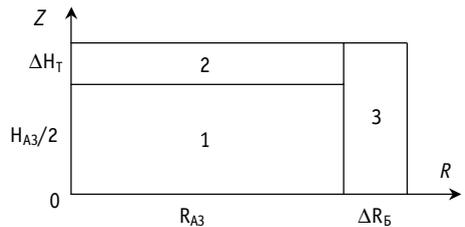


Рис.3. Расчетная схема насыпного реактора в R - Z -геометрии: 1 - активная зона; 2 - верхний (нижний) экран: 80%-Na, 20%- сталь; 3 - боковой экран: 20%-Na, 80%- сталь

Большая объемная доля теплоносителя в торцевых экранах способствует достижению отрицательного натриевого пустотного эффекта реактивности.

Нуклидный состав основного варианта активной зоны рассчитывался в предположении, что оболочкой твэла является нержавеющая сталь, $z_3=z_c=0,85$, что соответствует выгоранию 90% ²³⁹Pu в запальных твэлах и накоплению продуктов деления в сырьевых твэлах, соответствующему выгоранию 15% т.а. Вывод на критичность осуществлялся изменением высоты засыпки H_{A3} . На рис.4 показана по-

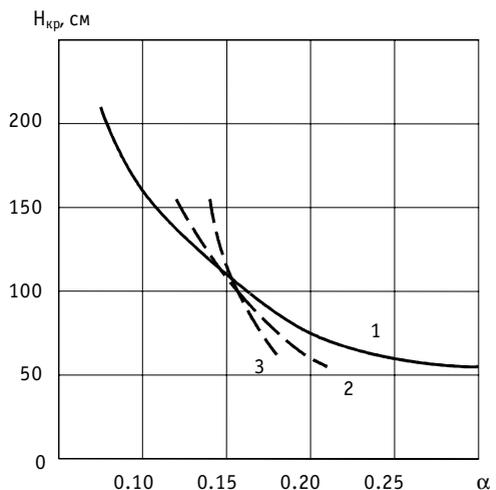


Рис.4. Зависимость критической высоты шарового слоя от доли запальных твэлов: 1 - $z = 0,85$ - основной вариант; 2 - $z = 0,6$; 3 - $z = 0,4$ - дополнительные варианты

лученная таким образом зависимость $H_{A3}(\alpha)$. Минимальная доля запальных твэлов в засыпке оценивается нами как $\sim 0,05$ ($H_{A3} \geq 250$ см), а наиболее приемлемым диапазоном α является $0,10 \div 0,20$. При $\alpha = 0,15$ расчетный коэффициент воспроизводства равен $1,025$, изменение реактивности близко к нулю и по нуклидному составу активной зоны режим МПАЗ близок к режиму ОПАЗ (одноразовая перегрузка активной зоны). При осуществлении этого режима реактор перегружается один раз за $3 \div 4$ года.

Использование твэлов двух типов вместо одного (твэла с МОХ-топливом) имеет следующие преимущества:

- повышение глубины выгорания загружаемого плутония;
- сокращение объема работ с плутонием при изготовлении топлива, поскольку 85% твэлов содержат только обедненный уран;
- возможность отказа от переработки плутониевых (запальных) твэлов (стоимость оставшегося в них плутония сравнима со стоимостью его регенерации);
- основная часть наиболее радиологически опасных продуктов (малые актиниды) компактно сосредоточена в запальных твэлах в виде, удобном для изоляции и захоронения;
- возможно оперативное управление топливным циклом путем изменения параметра α в процессе эксплуатации реактора.

С другой стороны, имеются и недостатки:

- разный уровень энерговыделения в соседних твэлах (рис.5) и необходимое ограничение в связи с этим удельной мощности активной зоны;
- возможное появление неоднородностей в распределении твэлов в засыпке и связанные с этим перегревы оболочек.

Будет оправдан отказ (по крайней мере, временный) и от переработки сырьевых твэлов. Энерговыработка урана в них при одноразовом использовании будет в $10 \div 30$ раз выше, чем в реакторах ВВЭР. В первом случае она может превышать ~ 100 МВт·сут (тепл.) на 1 кг обедненного урана, в то время как в ВВЭР она не превысит 5 МВт·сут (тепл.) на килограмм природного урана, из которого только небольшая часть идет на загрузку реактора, а остальная отправляется в отвал.

Следует отметить достоинства насыпной активной зоны как сжигателя малых актинидов. Если работать со сравнительно небольшой высотой засыпки и верхним торцевым отражателем в виде натриевого слоя, то ввиду значительной утечки нейтронов действующий спектр нейтронов окажется существенно более жестким, чем в реакторах

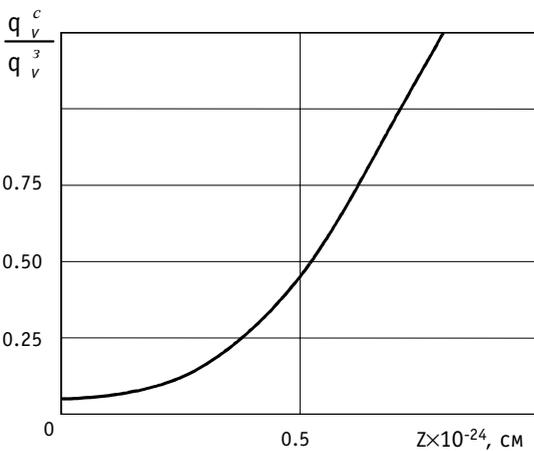


Рис.5. Отношение мощностей запального и сырьевого твэлов в зависимости от набранного флюенса

типа БН-800. В более жестком спектре эффективно делятся актиниды, имеющие пороговый характер сечения деления. Жесткость спектра можно характеризовать отношением среднего сечения радиационного захвата к сечению деления. Как следует из табл. 2, накопление высших нуклидов, в том числе и малых актинидов, в насыпных активных зонах будет существенно меньшим, чем в БН-800, и этот эффект тем значительнее, чем меньше высота насыпной активной зоны.

Высота активной зоны и диаметр

Отношение $\frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_f}$ в различных активных зонах

Таблица 2

	²³⁸ U	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴³ Am
БН-800 (МОХ-топливо)	9,75	0,801	0,341	2,00	0,200	2,65	7,42
Насыпная АЗ ($\alpha = 0,15$)	6,26	0,532	0,273	1,42	0,167	2,10	4,48
Насыпная АЗ ($\alpha = 0,25$)	5,46	0,447	0,262	1,30	0,164	2,22	4,10

твэла определяют гидравлическое сопротивление шарового слоя. Согласно [2] это сопротивление можно оценить по формуле

$$\Delta P = \xi_{ш} \frac{H_{AZ} \gamma_{Na} W^2}{d^2}, \tag{3}$$

где W - условная скорость жидкости, подсчитанная по полному поперечному сечению шаровой укладки (по набегающему потоку); γ_{Na} - плотность теплоносителя; $\xi_{ш}$ - коэффициент сопротивления шарового слоя с толщиной, равной диаметру шара d . При числах Рейнольдса $Re > 10^4$ можно полагать

$$\xi_{ш} = \frac{0,54}{\epsilon_{Na}^4} = const. \tag{4}$$

При $Re < 10^4$ коэффициент $\xi_{ш}$ увеличивается с уменьшением этого числа.

В качестве эталона возьмем значение W для реактора БН-600 [5]. На рис. 6 показана зависимость гидравлического сопротивления насыпной активной зоны от значения коэффициента α и диаметра твэла. Она свидетельствует, что гидравлические характеристики такой активной зоны в рассматриваемом диапазоне параметров позволят использовать циркуляционные насосы, применяемые для реакторов БН традиционного типа. Более того, имеется возможность работать с высотой насыпного слоя более 1,5-2 м, уменьшить α и получить экономию плутония. Уменьшение α возможно также не только с помощью повышения H_{AZ} , но и за счет введения на периферии насыпного слоя т.н. «зоны предварительного накопления», в которую вводятся только твэлы с обедненным естественным или слабообогащенным ураном. После достижения в них некоторой оптимальной концентрации плутония они перегружаются в центральную область засыпки и там работают до установленного для них суммарного флюенса.

Таким образом, запустив реактор с некоторым количеством запальных твэлов, можно перейти затем к стационарному режиму с подпиткой реактора только низкообогащенным или отвальным ураном. Во всяком случае, при такой схеме запуска гарантированно обеспечивается снижение потребления высококонцентрированного делящегося нуклида.

По результатам вышеприведенного анализа можно сказать, что рассмотренная концепция РБН заслуживает дальнейшей, более глубокой и всесторонней проработки.

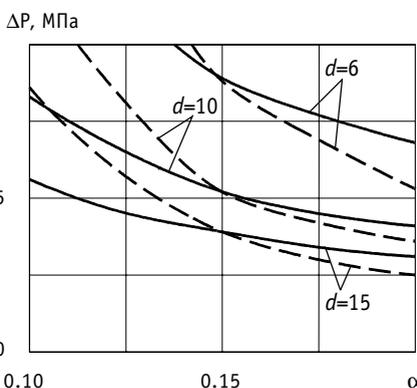


Рис.6. Гидравлическое сопротивление шарового слоя: — $z = 0,85$; - - - $z = 0,6$

Литература

1. Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н. и др. Ядерные реакторы повышенной безопасности (анализ концептуальных разработок). - М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. - М.: Атомиздат, 1978.
3. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1996.
4. Усынин Г.Б., Карабасов А.С., Чирков В.А. Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах. - М.: Атомиздат, 1981.
5. Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

Поступила в редакцию 24.04.2001

УДК 502.3

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**Б.И. Яцало*, И.А. Пичугина*, Г.В. Козьмин*, О.А. Мирзеабасов*,
И.В. Охрименко*, М.Ф. Каневский**, Е.А. Савельева****

* *Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*

** *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, г. Москва*



Приведено краткое описание прикладной геоинформационной системы, на базе которой разрабатывается система поддержки принятия решений PRANA по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий. Описаны созданные векторные электронные карты и базы данных атрибутивной информации для радиоактивно загрязненных территорий Брянской области.

ВВЕДЕНИЕ

Геоинформационные системы (ГИС) и электронные карты в частности являются ключевыми компонентами всех современных систем анализа пространственно распределенных данных мониторинга и оценки последствий загрязнения окружающей среды [1-3].

Области применения ГИС в задачах охраны окружающей среды охватывают весьма широкий спектр научно-практических разработок и исследований. К наиболее известным можно отнести задачи земельного кадастра, сельского хозяйства (создание электронных почвенных карт, картирование производства различных видов сельскохозяйственной продукции, реализация комплексных систем оптимизации продуктивности сельскохозяйственного производства и сбыта сырья/продукции), оптимального размещения объектов нефтегазовой и химической промышленности, представления и анализа данных дистанционного зондирования, анализа различного рода аварий и других чрезвычайных ситуаций, а также многих других задач [2-6, 8]. Тенденция использования современных информационных технологий для решения научно-практических задач ведет к тому, что в скором времени все задачи, так или иначе связанные с анализом или представлением пространственно распределенных объектов и данных, будут решаться с применением элементов ГИС.

Использование ГИС в задачах реабилитации радиоактивно загрязненных территорий и охраны окружающей среды в целом является основой процесса интеграции разнородных данных, в том числе данных сетей мониторинга различных ведомств (Росгидромета, Минсельхоза, Минатома, МЧС и др.).

В данной работе кратко представлены элементы ГИС системы территории Брянской области, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате Чернобыльской аварии, в которой центральное внимание уделяется агросфере.

При решении агроэкологических задач недостаточным является использование лишь

© *Б.И. Яцало, И.А. Пичугина, Г.В. Козьмин, О.А. Мирзеабасов, И.В. Охрименко, М.Ф. Каневский, Е.А. Савельева, 2001*

топографических карт. Для оценки возможных вариантов и оптимизации ведения сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях незаменимыми являются карты землепользования, а также соответствующие данные мониторинга по обследованию сельскохозяйственных угодий.

Радиоактивное загрязнение, обусловленное Чернобыльской катастрофой,хватило всю территорию Брянской области, но наиболее загрязненными оказались юго-западные районы. Общая площадь сельхозугодий по области с уровнем загрязнения ^{137}Cs свыше 1 Ки/км² в послеаварийный период составила 680 тыс. га или 40 % территории области, 282 тыс. га имели уровень загрязнения свыше 5 Ки/км² и 17,1 тыс. га - более 40 Ки/км², которые были выведены из системы землепользования [2]. Мониторинг загрязнения сельскохозяйственных угодий и производимой продукции растениеводства и животноводства является одной из основополагающих задач по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий. В этих целях проводится детальное радиологическое обследование сельскохозяйственных угодий, в том числе личных подсобных хозяйств в Брянской и Калужской областях. Ежегодно анализируется до 10 тысяч почвенных образцов и 22 тысяч образцов сельскохозяйственной и лесной продукции [4].

На основе исходных карт землепользования масштаба 1:50000 созданы *векторные электронные карты землепользования* загрязненных районов Брянской области (при этом в качестве контрольных использовались также карты-планы внутрихозяйственного землеустройства масштаба 1:25000). Библиотека электронных карт включает в себя векторные карты Новозыбковского, Клинцовского, Гордеевского, Красногорского и Злынковского районов, а также отдельные карты землепользования по каждому хозяйству указанных районов (всего в настоящее время более 90 карт).

Создание и редактирование электронных карт осуществлялось в среде PC ARC/INFO с использованием дигитайзера (заведение границ участков земельных угодий), а также с применением цветного АЗ-сканера и программы векторизации растровых изображений EasyTrace.

Электронные карты включают в себя все основные категории землепользования в соответствии с их пространственным расположением, координатами и геометрией (полигоны векторных карт), в том числе

- пахотные угодья;
- пастбища и сенокосы;
- леса;
- болота и водные участки;
- населенные пункты;
- сады, а также другие категории землепользования.

Пример карты землепользования для трех районов Брянской области представлен на рис.1.

Количественные данные о структуре векторных карт землепользования, характеризующие использование земельных угодий в указанных районах и подчеркивающие трудоемкость проведенных работ по созданию электронных карт, представлены в табл.1.

На основе данных мониторинга созданы базы данных (БД) атрибутивной информации, т.е. информации по каждому полигону векторной карты землепользования. Для хранения данных используется СУБД Paradox. Формирование БД проводилось с использованием многолетних данных мониторинга, полученных сетью агрохимического и ветеринарного контроля Брянской области.

Для всех полигонов приводится плотность поверхностного загрязнения территории ^{137}Cs для каждого, привязанного к году, тура обследований, см. рис.2 (для отдельных полигонов приведено также загрязнение ^{90}Sr и трансурановыми радионуклидами).

По сельхозугодьям (в том числе по каждому участку поля) доступна следующая

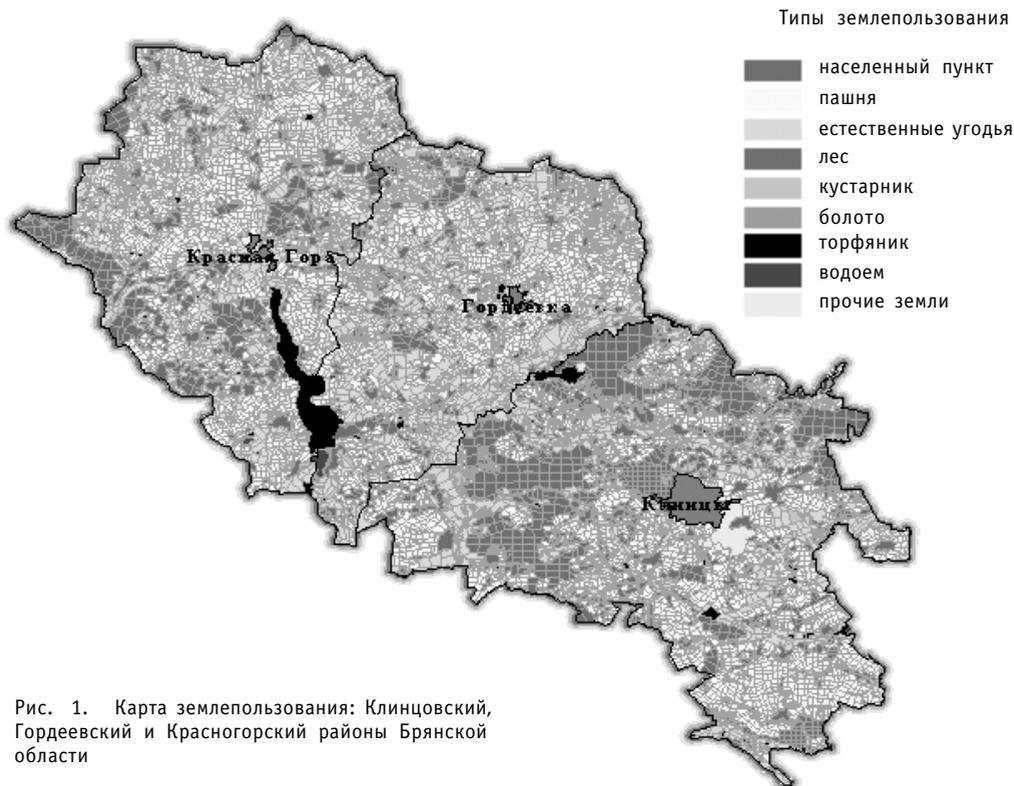


Рис. 1. Карта землепользования: Клиновский, Гордеевский и Красногорский районы Брянской области

информация:

- физико- и агрохимические характеристики почв рассматриваемых участков (тип почвы и мехсостав, содержание калия, фосфора, гумуса, кислотность);
- севооборот и выращиваемая культура (для пахотного угодья);
- данные о принимавшихся ранее контрмерах на рассматриваемых угодьях.

Для полигонов леса (лесные массивы, разбитые на соответствующие участки) дополнительно указаны тип почв и площадь.

По всем населенным пунктам (НП) каждого административного района указаны

- данные мониторинга о поверхностном загрязнении, внешних и внутренних дозах местного населения;

- данные о производстве основных видов продукции личных подсобных хозяйств (ЛПХ) (молоко, мясо, картофель);

Таблица 1

Статистика по полигонам карт землепользования двух районов Брянской области

Информация по полигонам	Красногорский район		Клинцовский район	
	Количество	Площадь (га)	Количество	Площадь (га)
Все полигоны	3097	106817	4200	136473
Полигоны под пашней	1413	43819	1765	44916
Полигоны под пастбищами/ сенокосами	549	28747	584	27726
Полигоны, занятые лесом	291	19134	1032	42863
Количество хозяйств в районе	18 +1 лесничество		23 + 3 лесничества	
Количество населенных пунктов	99		155	

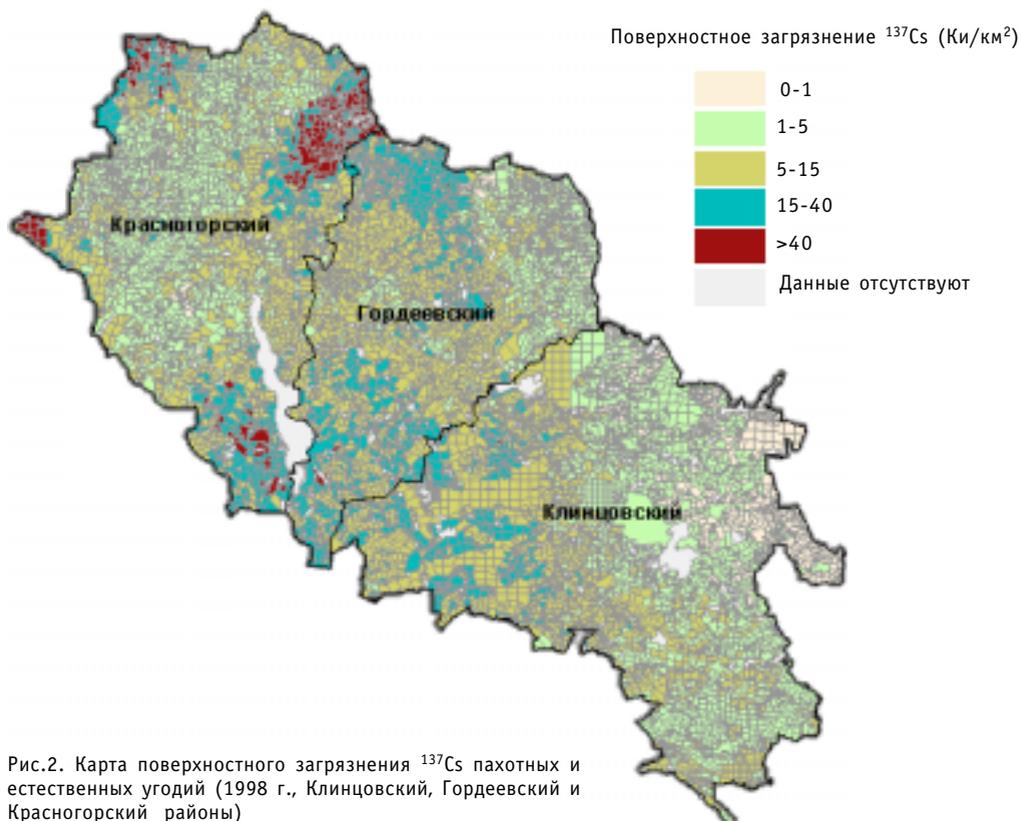


Рис.2. Карта поверхностного загрязнения ^{137}Cs пахотных и естественных угодий (1998 г., Клинцовский, Гордеевский и Красногорский районы)

- данные мониторинга о загрязнении с/х продукции ЛПХ радионуклидами ^{137}Cs ;
- демографические данные.

Пользователю доступна также информация по всем хозяйствам рассматриваемых районов, в том числе

- данные о производстве всех основных видов продукции растениеводства и животноводства за последние годы (в том числе посевные площади, валовые сборы, урожайности, структура севооборота, количество с/х животных, производство молока и мяса);
- данные мониторинга о загрязнении с/х продукции радионуклидами ^{137}Cs ;
- данные о принимавшихся в хозяйстве контрамерах (в том числе использование феррацинсодержащих препаратов).

Для представления и анализа векторных электронных карт и соответствующей атрибутивной информации используются возможности картографического пакета ArcView. Кроме того, для научно-практических задач по использованию указанных наработок на местах и максимально широкому анализу данных на основе библиотеки электронных карт и указанной БД разработано специальное приложение *PRANA-DB-Analysis*. При этом заведенные в формате покрытий PC ARC/INFO картографические данные конвертируются в формат обменных файлов системы ARC/INFO и переводятся в специальный двоичный формат для дальнейшего использования в разрабатываемых приложениях.

Для каждого типа полигонов разработана отдельная форма представления информации из БД. Связывание данных по полигону с соответствующими данными справочников производится посредством SQL-запросов. Каждая форма позволяет одновременно просматривать информацию из разных таблиц базы данных в агрегированном.

Опции просмотра и редактирования БД включают в себя специальные элементы ин-

терфейса, в том числе возможность настройки интерфейса и управления редактированием полей БД, а также организацию SQL-запросов при просмотре баз данных с использованием широкого набора сервисных функций. Для создания приложений используется C++Builder.

Указанное приложение представляет собой эффективный инструмент для компьютерной поддержки сети радиационного мониторинга агросферы (введение и редактирование данных), анализа имеющихся данных мониторинга, создания соответствующих (картографических и табличных) отчетов по запросу пользователя (включая комплексные SQL-запросы различной сложности).

Созданные на базе исходных карт землепользования и БД атрибутивной информации «производные» карты (загрязнение угодий, типы почв, содержания калия, фосфора, кислотность, структура посевных площадей и др.) являются незаменимым средством в процессе принятия решений по ведению сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях.

Разработанная прикладная ГИС PRANA внедрена в МСХ России и Центре Агротехнологии (г.Брянск) для решения научно-практических задач при подготовке карт радиационной обстановки, для ведения банка данных по результатам радиологического и агрохимического обследования территории и сельскохозяйственной продукции, для составления проектно-сметной документации при планировании реабилитационных работ на радиоактивно загрязненных территориях.

Необходимо подчеркнуть, что указанное приложение *PRANA-DB-Analysis* является всего лишь одним из приложений разрабатываемой ГИС системы поддержки принятия решений *PRANA*, предназначенной для оценки и оптимизации мер по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий [7,8], описание которой выходит за рамки данной статьи. Различные версии системы *PRANA* предназначены для проведения научно-практических исследований и оценок, для практического внедрения в научных и административных центрах, а также для целей образования и тренинга студентов и специалистов по широкому кругу вопросов радиоэкологии, радиобиологии, радиологической защиты населения, реабилитации радиоактивно загрязненных территорий и применения ГИС для решения прикладных задач.

Работа выполнена при частичной поддержке международных проектов МНТЦ #1224 и INTAS# 31726.

Литература

1. Берлянт А.М. Картография. - М.: Аспект Пресс, 2001.
2. Берлянт А.М. Геоиконика. - М.: «Астрей», 1996.
3. Майкл Н. ДеМерс. Географические информационные системы. Основы. - М.: Дата+, 1999.
4. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. - Брянский Центр Агротехнологии. Брянск, 1997.
5. Просянникова О.И. Геоинформационная система в агрохимслужбе // Агротехнологический вестник. - 1999. - №2. - С.21-22.
6. Столбовой В.С., Савин И.Ю., Шеремет Б.В. и др. Геоинформационная система деградации почв России // Почвоведение. - 1999. - №5. - С. 646-651.
7. Yatsalo B., Mirzeabassov O., Okhrimenko I., Pichugina I., Kulagin B. PRANA - Decision Support System for Assessment of Countermeasure Strategy in the Long-term Period of Liquidation of the Consequences of a Nuclear Accident (Agrosphere) // Radiat. Prot. Dosim. - 1997/ V.73. №№ 1-4. - P. 291-294.
8. Yatsalo B., Mirzeabassov O., Okhrimenko I., Pichugina I. et al. Geographic Information Decision Support System for Rehabilitation of Radioactive Contaminated Territories: Proc. of the Intern. Confer. ConSoil 2000, Leipzig, Germany, Sept. 18-22, 2000. - p. 433-441.

Поступила в редакцию 28.07.2001

ИММОБИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Е.Н. Ильин, И.Ю. Пашкеев, А.В. Сенин

Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ), г. Челябинск



Для иммобилизации твердых высокоактивных отходов (ВАО) предлагается использовать самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), позволяющий поднимать температуру реагирующей смеси от 1500 до 4000 °С за счет тепловыделения химических реакций. В качестве исходной реакционной смеси рассматривается термитная смесь Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al , SiO_2 , CaO , Na_2O , CeO_2 , имитирующая состав ВАО. В результате СВС формируется металлокерамический блок, состоящий из коррозионно-стойкой железохромовой металлической матрицы и керамической матрицы на основе алюминатов, силикатов и алюмосиликатов. Оценка химической стойкости полученных материалов-иммобилизаторов путем выщелачивания в воде показало их преимущество перед традиционным боросиликатным стеклом.

СПОСОБ ИММОБИЛИЗАЦИИ

В ядерном топливном цикле особое внимание уделяется вопросам, связанным с разработкой методов обращения со средне- и высокоактивными отходами (РАО), которые представляют наибольшую опасность и требуют применения высокостойких матриц-иммобилизаторов для надежной химической и механической фиксации отходов [1-3]. В настоящее время наиболее разработанным и применяемым в промышленности методом консервации высокоактивных отходов является остекловывание. Однако некоторые недостатки стеклянных матриц и технологии их получения заставляют искать более совершенные способы конечной иммобилизации РАО. В лабораторных и полупромышленных условиях исследуются методы консервации РАО в керамических материалах, обеспечивающих большую химическую стойкость [1], но они сопряжены с применением еще более сложного высокотемпературного оборудования в сравнении с остекловыванием.

Предлагаемый способ иммобилизации РАО методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является попыткой объединения преимуществ вышеуказанных способов с одновременным повышением технологичности и безопасности процесса иммобилизации [4].

СВС представляет собой высокотемпературную химическую реакцию, протекающую в конденсированной фазе (т.е. в твердой либо в жидкой) со значительным тепловыде-

© *Е.Н. Ильин, И.Ю. Пашкеев, А.В. Сенин, 2001*

лением, вследствие чего процесс способен протекать в самораспространяющемся режиме при температурах 1500 - 4000°C в зависимости от природы реагирующих веществ.

Примером таких реакций может служить процесс металлотермического восстановления некоторых оксидов, например, алюминотермический.

В образце, спрессованном из смеси порошков реагентов (Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al), локальным тепловым импульсом инициируется реакция СВС, которая затем распространяется по образцу в самоподдерживающемся режиме. При соответствующем подборе соотношения исходных реагентов и условий проведения процесса в результате СВС формируется металлокерамический блок, состоящий из двух взаимопроникающих фаз. Его можно представить как пористую керамическую составляющую, пропитанную восстановленным металлом. Такие материалы обладают высокой механической прочностью. На рис.1 представлена одна из возможных схем формирования металлокерамического блока. Он состоит из внешней защитной металлокерамической оболочки, не содержащей радиоактивных компонентов, и металлокерамической сердцевины - матрицы-иммобилизатора с химически связанными компонентами РАО.

К преимуществам данного метода следует отнести возможность проведения СВС без применения высокотемпературного печного оборудования; процесс осуществляется в одноразовом металлическом контейнере. Сформированный металлокерамический блок готов к захоронению без дополнительных операций по его обработке.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В основу иммобилизации РАО положены реакции, позволяющие получать минералоподобные и другие химические соединения, устойчивые к выщелачиванию грунтовыми водами. Примеры таких СВС-реакций приведены в табл.1, где показаны уравнения химических реакций синтеза некоторых соединений, тепловыделение в этих реакциях (термичность) и адиабатическая температура горения, которую обеспечивают эти реакции в адиабатических условиях, т.е. в отсутствие теплообмена с окружающей средой.

За базовую была принята термитная смесь в соответствии с уравнением (1). При горении такой смеси образуется металлокерамика, состоящая из корунда и коррозионно-стойкого железохромового сплава, содержащего около 80 мас.% железа и 20 мас.% хрома.

В качестве смеси, имитирующей состав твердых кальцинированных отходов, принята смесь оксидов Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , Na_2O , CeO_2 , которые сами входят в состав отходов, а также имитируют химическое и геохимическое поведение подобных им элементов. Например, церий является имитатором собственного радиоактивного изотопа, а также ряда лантаноидов и актиноидов (Th, U, Pu). Натрий является аналогом некоторых щелочных металлов, а кальций - щелочно-земельных металлов (в некоторых случаях и урана [5]).

Представляется важным знать, в какой форме будет находиться каждый из этих эле-

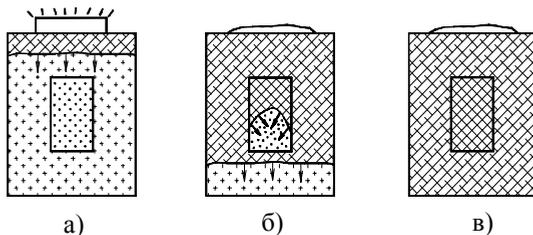


Рис. 1. Схема формирования металлокерамического блока: а) начало горения шихты наружной оболочки; б) процесс формирования сердцевины; в) конечное состояние

Таблица 1

Химические реакции аллюминотермического синтеза

Керамическая основа матриц	УРАВНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ	Расчетное тепловыделение $Q_{x.p.}$, кДж/(моль атомов)	Адиабат. температура горения $T_{ад}$, °С
Al ₂ O ₃	(1) $0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3 + 2Al = 2(0,79Fe + 0,21Cr) + Al_2O_3$	113,6	3115
АЛЮМИНАТЫ			
Al ₂ O ₃ + Ce ₂ O ₃	(2) $6CeO_2 + 7(0,84Fe_2O_3 + 0,16Cr_2O_3) + 33Al = 14(0,84Fe + 0,16Cr) + 5CeAlO_3 + CeAl_{11}O_{18}$	91,3	2530
Al ₂ O ₃ + CaO	(3) $CaO + 2(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 4Al = 4(0,79Fe + 0,21Cr) + CaO \cdot 2Al_2O_3$	99,4	2670
	(4) $CaO + 0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3 + 2Al = 2(0,79Fe + 0,21Cr) + CaO \cdot Al_2O_3$	88,4	2320
Al ₂ O ₃ + Na ₂ O	(5) $Na_2O + 11(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 22Al = 22(0,79Fe + 0,21Cr) + Na_2O \cdot 11Al_2O_3$	109,4	3000
СИЛИКАТЫ			
Al ₂ O ₃ + SiO ₂	(6) $2SiO_2 + 3(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 6Al = 6(0,79Fe + 0,21Cr) + 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (муллит)	88,4	2610
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + Ce ₂ O ₃	(7) $38/9 SiO_2 + 2CeO_2 + 3(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 20/3 Al = 6(0,79Fe + 0,21Cr) + 28/9 (3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + Ce_2O_3 \cdot 2SiO_2$	64,2	2000
АЛЮМОСИЛИКАТЫ			
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + Na ₂ O	(8) $Na_2O + SiO_2 + 0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3 + 2Al = 2(0,79Fe + 0,21Cr) + Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (нефелин)	49,65	2000
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + CaO	(9) $CaO + 2SiO_2 + 0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3 + 2Al = 2(0,79Fe + 0,21Cr) + CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (анортит)	52,9	2000
	(10) $2CaO + SiO_2 + 0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3 + 2Al = 2(0,79Fe + 0,21Cr) + 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (геленит)	56,8	2000
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + CaO + Na ₂ O	(11) $CaO + Na_2O + 4SiO_2 + 2(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 4Al = 4(0,79Fe + 0,21Cr) + CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	51,2	2000
	(12) $2CaO + Na_2O + 3SiO_2 + 2(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 4Al = 4(0,79Fe + 0,21Cr) + 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 + Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	53,0	2000
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + CaO + Na ₂ O + Ce ₂ O ₃	(13) $CaO + Na_2O + 56/9 SiO_2 + 2CeO_2 +$ (14) $+2(0,79Fe_2O_3 + 0,21Cr_2O_3) + 17/3 Al = 4(0,79Fe + 0,21Cr) + CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 1/9 (3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + Ce_2O_3 \cdot 2SiO_2$	40,4	1600

ментов в продуктах аллюминотермического взаимодействия. Для этого вначале в исходную термитную смесь вводились отдельные вышеуказанные оксиды для синтеза простых соединений, а затем состав добавок усложнялся для изучения возможности синтеза более сложных соединений.

Керамическим продуктом аллюминотермического синтеза является оксид алюминия - корунд, поэтому рассматривалась возможность синтеза алюмосодержащих соединений: аллюминатов, силикатов и алюмосиликатов.

Исходная смесь реагентов (Fe₂O₃, Cr₂O₃, Al плюс оксид имитатора компонента отходов) тщательно перемешивалась и прессовалась в виде цилиндрических образцов диаметром 34 мм и высотой 20-25 мм. Образец зажигался с помощью специального поджигающего состава. Продукты реакции дробились, перетирались и подвергались магнитной сепарации на металлическую и керамическую фазы. Керамический порошок доизмельчался до фракции менее 125 мкм и на установке ДРОН-2 подвергался рентгенофазовому анализу (РФА). Результаты РФА представлены на рис.2 в виде штриховых

рентгенограмм.

В системе $Al_2O_3 — Ce_2O_3$ в соответствии с реакцией (2) синтезированы алюминаты церия: гексаалюминат $Ce_2O_3 \cdot 11Al_2O_3$ и моноалюминат $Ce_2O_3 \cdot Al_2O_3$. Продукты взаимодействия состоят из алюминатов церия заданного состава (рис. 2, а).

Система $Al_2O_3 — CaO$ включает в себя довольно обширный ряд алюминатов кальция. По реакциям (3), (4) синтезированы наиболее химически стойкие алюминаты: диалюминат $CaO \cdot 2Al_2O_3$ и моноалюминат $CaO \cdot Al_2O_3$. Результаты РФА показывают, что продукты реакции состоят из чистых алюминатов кальция заданного состава (рис. 2, б, в).

В системе $Al_2O_3 — Na_2O$ по реакции (5) удалось синтезировать чистый алюминат натрия $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$ (рис. 2, г).

При введении в систему кремнезема SiO_2 появляется возможность получения ряда силикатов и алюмосиликатов, имеющих природные минеральные аналоги, характеризующиеся стабильностью на протяжении геологических периодов.

Система $Al_2O_3 — SiO_2 — Ce_2O_3$ включает в себя ряд силикатов алюминия и церия. По реакции (7) осуществлен совместный синтез силиката алюминия — муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ и силиката церия $Ce_2O_3 \cdot 2SiO_2$. Результаты РФА свидетельствуют, что продукты реакции состоят из этих двух соединений (рис. 2, д).

Система $Al_2O_3 — SiO_2 — Na_2O$ по реакции (8) позволяет синтезировать алюмосиликат натрия $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (нефелин) — одно из немногих природных соединений, способных достаточно прочно фиксировать натрий, что используется, например, при синтезе керамик “синрок” [6]. РФА продуктов реакции показал, что они состоят из двух фаз: высокотемпературной кристаллической модификации нефелина — карнегиита и корунда (рис. 2, е). Корунд появился вследствие того, что синтез осуществлялся с избытком термитной составляющей для повышения температуры горения и кинетических факторов.

Система $Al_2O_3 — SiO_2 — CaO$ включает в себя ряд алюмосиликатов кальция. По реакциям (9), (10) была предпринята попытка синтеза анортита $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ и геленита $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$. Вследствие быстрого охлаждения продуктов реакции неметаллическая составляющая не успевает кристаллизоваться, и образуются аморфные стеклообразные фазы соответственно анортитного и геленитного составов, которые с помощью РФА не идентифицируются (на рентгенограммах характерных пиков нет). Их кристаллизация возможна с помощью термообработки полученных образцов.

Система $Al_2O_3 — SiO_2 — CaO — Na_2O$ по реакциям (11), (12) позволяет осуществить совместный синтез алюмосиликатов кальция и натрия. РФА продуктов реакции показал, что они содержат две кристаллические фазы: нефелин и корунд. CaO , как и в предыдущем случае, находится в стеклообразной фазе (рис. 2, ж).

В системе $Al_2O_3 — SiO_2 — CaO — Na_2O — Ce_2O_3$, при введении всего набора имитаторов по реакции (13) образуется стеклообразная фаза, химический состав которой соответствует правой части уравнения (13).

Дополнительно были синтезированы Ca-, Na- и Ce-содержащие алюмосиликатные стекла и подвергнуты отжигу для оценки их способности к кристаллизации и дальнейших испытаний на химическую устойчивость. Стекла отжигались при $1000^\circ C$ в течение 42 часов на воздухе. Состав этих и других композиций приведен в табл. 2.

В системе $Al_2O_3 — SiO_2 — CaO$ получены два вида стекол, состав которых находится в двух различных элементарных треугольниках на соответствующей трехфазной диаграмме состояния: 1) в треугольнике корунд — муллит — анортит (образец 5) и 2) в треугольнике гексаалюминат кальция — анортит — геленит (образец 6). После отжига материалов на рентгенограмме первого образца появились интенсивные пики корунда и анортита, а также один слабый пик муллита. На рентгенограмме отожженного

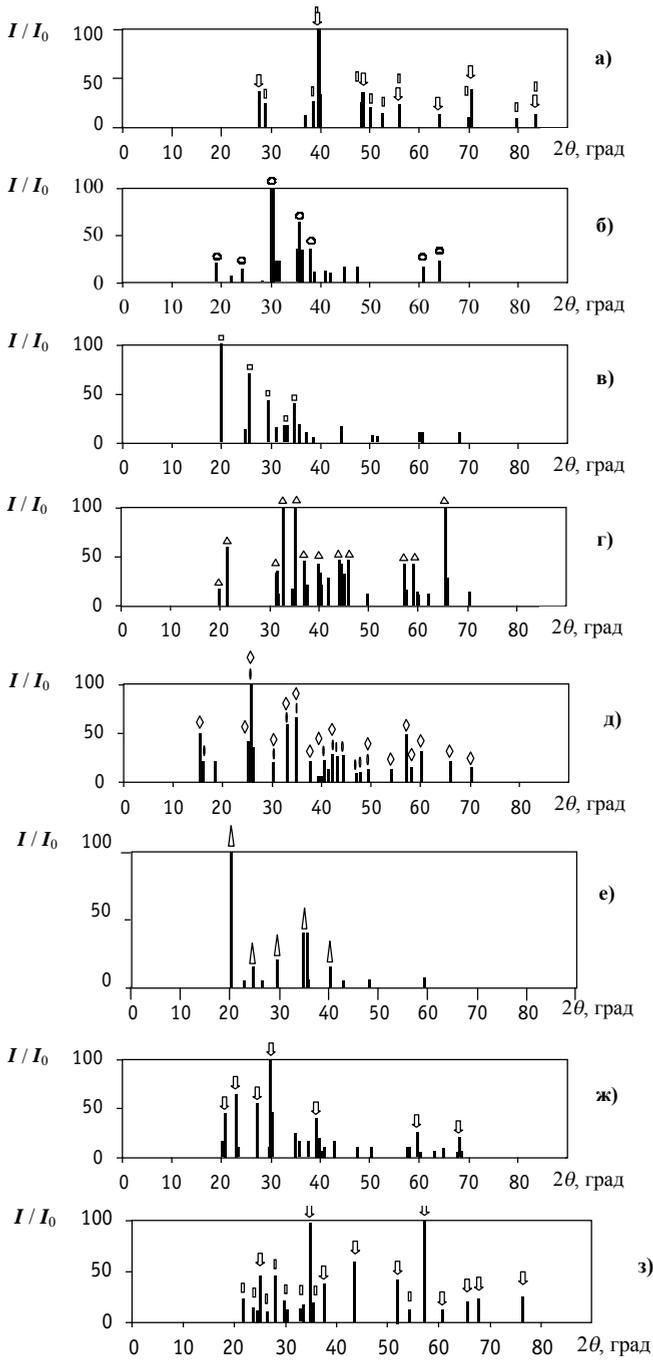


Рис.2 Результаты рентгенофазового анализа синтезированных материалов (излучение $\text{Cu-K}\alpha$):
 а) $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (\square - $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$; ∇ - $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, излучение $\text{Co-K}\alpha$);
 б) $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (\blacktriangle);
 в) $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (\square);
 г) $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ (Δ);
 д) $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (\diamond - $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; \blacksquare - $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$);
 е) $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (карнегиит ∇);
 ж) $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (нефелин ∇);
 з) $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (анортит \square) + Al_2O_3 (корунд ∇)

второго образца появились линии корунда и анортита (рис.2, з).

В системе Al_2O_3 — SiO_2 — Na_2O получены два вида стекол с составами в треугольниках 1) корунд — карнегит — нефелин (образец 7) и 2) корунд — нефелин — альбит (образец 8). После их отжига на рентгенограммах обнаружены только пики корунда. На рентгенограмме отожженного стекла, полученного по уравнению (13) (образец 9), отмечены пики анортита и корунда, имеются слабые пики нефелина и дисиликата церия.

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Химическая стойкость синтезированных веществ (табл.2) определялась путем их выщелачивания в дистиллированной воде в течение двадцати суток при температуре 20°C.

Полученные металлокерамические образцы отмывали в дистиллированной воде, дробили и отмагничивали металлическую составляющую. Отсеянную неметаллическую часть фракции 125...180 мкм в количестве 3 г подвергали выщелачиванию в 100 мл дистиллированной воды в кварцевых стаканах диаметром 50 мм. Вода перемешивалась с помощью магнитной мешалки с частотой вращения 200 об/мин. Выщелачиванию подвергались образцы №№ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10 (табл.2).

Характеристики выщелачивания полученных соединений сравнивались с выщелачиваемостью специально синтезированного боросиликатного стекла, состав которого заимствован из [7]. В боросиликатное стекло вводилось 20% модельного кальцината PAO. В состав кальцината входили 11% Fe_2O_3 , 41% Na_2O , 21% Al_2O_3 , 10% CeO_2 , 9% CaO , 8% Cr_2O_3 . В качестве флюсующей добавки использовалась смесь оксидов 71% SiO_2 , 20% B_2O_3 , 4,5% TiO_2 , 4,5% Na_2O . Выщелачивание стекла производилось при условиях выщелачивания исследуемых образцов (3 г порошка 125...180 мкм в 100 мл воды при 20°C с перемешиванием).

В воде методами химического анализа определялось содержание ионов кальция, натрия и церия; в результатах анализа они условно представлены в форме CaO , Na_2O и Ce . Ошибка определения этих веществ составляла $Ca \pm 50$ мкг/л, $Na_2O \pm 2$ мкг/л, $Ce \pm 5$ мкг/л. Полученные зависимости скорости выщелачивания этих компонентов от времени показаны на рис. 3.

Максимальные скорости выщелачивания кальция наблюдаются у алюминатов кальция (рис. 3, а), причем в первые сутки выщелачивания у моноалюмината $CaO \cdot Al_2O_3$ (образец 1) выщелачиваемость Ca примерно на порядок выше по сравнению с ди-

Таблица 2

Состав синтезированных материалов

№ образца	Химический состав, мас. %					Фазовый состав
	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Na_2O	CeO_2	
1	22,85	—	—	—	77,15	$Ce_2O_3 \cdot Al_2O_3$
2	78,43	—	21,57	—	—	$CaO \cdot 2Al_2O_3$
3	64,52	—	35,48	—	—	$CaO \cdot Al_2O_3$
4	95,53	—	—	4,47	—	$Na_2O \cdot 11Al_2O_3 + 2Al_2O_3$
5	75,00	22,60	2,40	—	—	Стекло
6	75,00	19,90	5,10	—	—	Стекло
7	75,00	18,50	—	6,50	—	Стекло
8	75,00	21,50	—	3,50	—	Стекло
9	44,98	34,47	4,78	4,68	11,08	Стекло
10	54,32	27,64	—	—	18,04	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + Ce_2O_3 \cdot 2SiO_2$

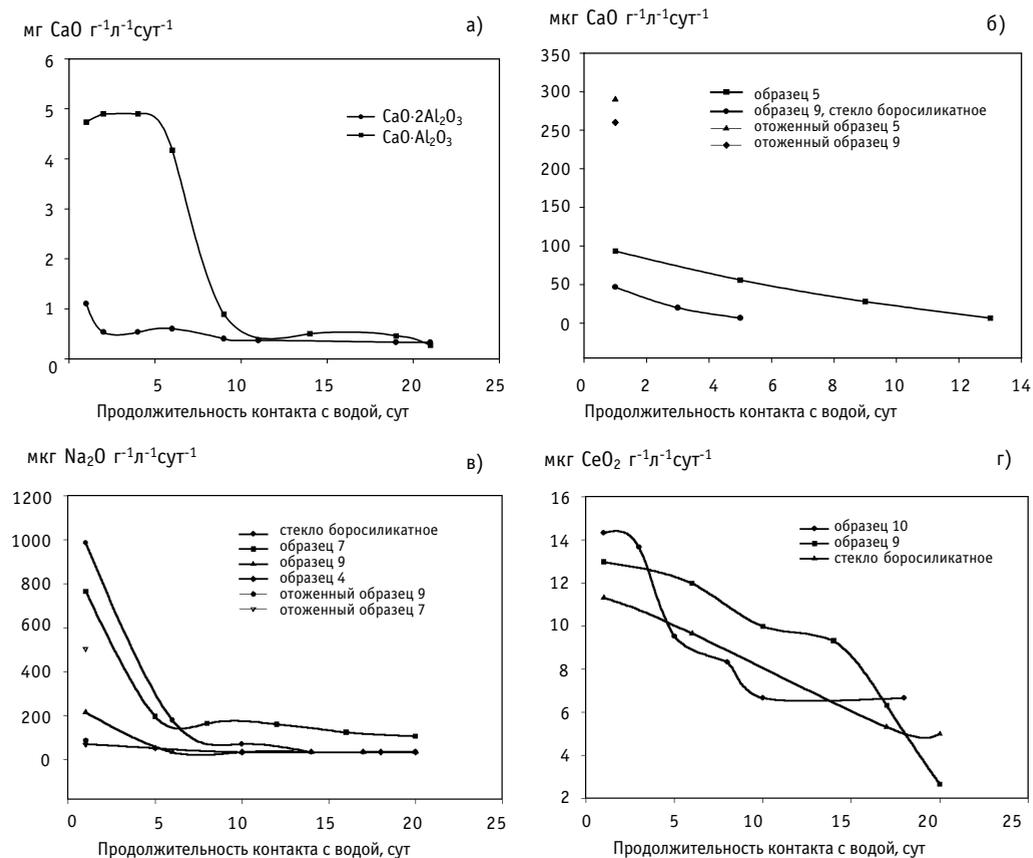


Рис.3. Кинетика выщелачивания ионов из синтезированных материалов: а) кальция из алюминатов кальция; б) кальция из алюмосиликатов; в) натрия; г) церия

алюминатом (образец 2). Столь высокие значения обусловлены способностью алюминатов кальция к гидролизу, и эта тенденция значительно возрастает у алюминатов с более высоким содержанием кальция. В результате этого происходит агломерация порошков в монолитные образования и их отверждение. Наиболее интенсивно этот процесс идет у $\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, выщелачиваемость которого через 20 суток снижается до уровня диалюмината $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$.

Наименьшими скоростями выщелачивания Ca обладают стеклянные образцы 5 и 9. В первые сутки их выщелачиваемость в два раза ниже, чем у боросиликатного образца сравнения (рис.3, б).

Скорости выщелачивания натрия представлены на рис. 3, в. В первые сутки выщелачивания исследуемые материалы можно расположить в ряд по мере увеличения их стойкости: боросиликатное стекло < образец 7 < стекло 9 < образец 4. Через 14 суток контакта с водой характеристики образцов 9, 4 и боросиликатного стекла становятся примерно равными. Наибольшую скорость выщелачивания к этому времени показывает образец 7.

Все церийсодержащие материалы показывают одинаково низкую выщелачиваемость церия, мало зависящую от времени (рис. 3, г). Содержание церия в растворах выщелачивания моноалюмината $\text{Ce}_2\text{O}_3\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ниже предела чувствительности применявшегося химического метода анализа, поэтому результаты выщелачивания для этого соединения не приводятся.

Образец 9, представляющий собой алюмосиликатное стекло и включающий в себя

весь комплекс имитаторов PAO, по выщелачиваемости Ca, Na и Ce обладает равными свойствами по сравнению с боросиликатным стеклом.

Образцы 7, 5 и 9, как указывалось выше, были подвергнуты отжигу, в результате которого произошло выделение ряда кристаллических фаз. Влияние кристаллизации этих материалов на их химическую стойкость было оценено выщелачиванием в течение одних суток, результаты которого отмечены точками на рис. 3, б, в. У отожженно-го образца 9 увеличилась скорость выщелачивания Ca (в 5 раз). Выщелачиваемость Na несколько снизилась (в 2 раза), а выщелачиваемость церия осталась на прежнем уровне. Выщелачиваемость натрия у отожженного образца 7 снизилась в 2 раза. Выщелачиваемость Ca у отожженного образца 5 повысилась в 3 раза.

Таким образом, у частично кристаллизованных стекол в результате отжига наблюдается общая тенденция: увеличение выщелачиваемости Ca, снижение выщелачиваемости Na, тогда как выщелачиваемость Ce остается постоянной.

ВЫВОДЫ

На примере оксидной системы, содержащей оксиды Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO, Na_2O , CeO_2 , имитирующих состав PAO, показана возможность синтеза соединений двух типов: двойных алюминатов $Э_xO_y \cdot ZAl_2O_3$, где Э-элемент, x, y, z-стехиометрические коэффициенты, а также соединений на алюмосиликатной основе, имеющих геохимически стабильные природные аналоги.

В этих системах получены следующие соединения: $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$, $Ce_2O_3 \cdot 11Al_2O_3$, $Ce_2O_3 \cdot Al_2O_3$, $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, $Ce_2O_3 \cdot 2SiO_2$. В системе, содержащей весь набор имитаторов, образуются стекла, после отжига которых кристаллизуются анортит $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, корунд, в незначительном количестве нефелин и дисиликат церия.

При алюминотермическом взаимодействии Fe_2O_3 и Cr_2O_3 преимущественно восстанавливаются до металла; в неметаллической фазе остается Fe до 4% и Cr_2O_3 до 10%. Также происходит частичное восстановление SiO_2 , при этом количество кремния в металле может достигать 4%.

Наибольшие скорости выщелачивания характерны для ионов Ca алюминатов кальция, подверженных интенсивному гидролизу. Алюминат $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$, силикат церия $Ce_2O_3 \cdot 2SiO_2$ и стеклообразные алюмосиликаты обладают химической стойкостью, приблизительно равной стойкости боросиликатного стекла. Содержание ионов Ce в воде при выщелачивании алюмината $Ce_2O_3 \cdot Al_2O_3$ находится ниже предела чувствительности химического анализа.

Отжиг стекол приводит к увеличению выщелачиваемости Ca и снижению выщелачиваемости Na. На выщелачиваемость Ce отжиг не влияет.

В лабораторных условиях получены металлокерамические блоки (аналогичные изображенному на рис.1), состоящие из защитной металлокерамической оболочки и сердцевины с иммобилизованными по описанному методу имитаторами PAO. Приведенные примеры показали возможность применения алюминотермической системы для синтеза минералоподобных соединений, способных быть химическими иммобилизаторами компонентов PAO.

Литература

1. Immobilization of high-level nuclear reactor waste in SYNROC: current appraisal/A.E. Ringwood, V.M. Oversby, S.E. Kesson, W.J. Sinclair, N.G. Ware, W. Hibberson, A. Mayor // Nucl. and Chem. Waste Manag. – 1981. – V.2. – P. 287-305.
2. Аллой А.С., Шашуков Е.А. Отверждение радиоактивных отходов в виде стеклометаллических и металлокерамических композиций: Обзор. – М.: ЦНИИатоминформ, 1984. – Вып.2 (9). – 34 с.

3. Пашкеев И.Ю., Сенин А.В., Дроздов В.В., Студеникин Г.В. Состояние и проблемы высокотемпературной иммобилизации высокоактивных отходов в металлокерамических материалах // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – С.16-27.

4. Пат. RU 2096844 С1, 6 G 21 F 9/30. Способ изоляции и химической иммобилизации твердых радиоактивных отходов / И.Ю. Пашкеев, А.В. Сенин, В.В. Дроздов, Г.В. Студеникин, Е.Г. Дзекун (Российская Федерация). - № 96115712 / 25; Заяв. 29.07.96.; Опубл. 20.11.97, Бюл. №32. – 20 с.

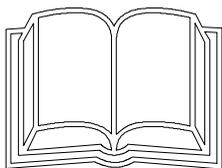
5. Pashkeev I.U., Senin A.V., Gerasimova N.V., Drozdov V.V., Studenikin G.V. The Distribution of Transuranium Elements Simulators in the Metallo-ceramic Matrixes During Immobilization // ENC'98 World Nuclear Congress (Nice, France, Oct. 25-28, 1998). Transaction. – Bern: European Nuclear Society (ENC), 1998. – v.III. – P.586-590.

6. Solid solution limits in synroc zirconolite / S.E. Kesson, W.J. Sinclair and A.E. Ringwood // Nucl. and Chem. waste Manag. – 1983. – V.4. – P.259-265.

7. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 184 с.

Поступила в редакцию 18.07.2001

ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ
НОВЫЕ КНИГИ



Информация от журнала "Ядерная энергетика"

Энергетика в России и в мире: Проблемы и перспективы: Аналит. докл. - М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001. - 136 с. 950 экз. (о) ISBN 5-7546-0070-2

Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры/Р.М. Алексахин и др.; Под ред. Л.А. Ильина, В.А. Губанова: М.: ИздАТ, 2001. - 752 с. 1500 экз. (п) ISBN 5-86656-113-1

Козлова Е.А. **Воспоминания о Чернобыле: Записки участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС: К 115-летию катастрофы:** М.: ИздАТ, 2001. - 216 с.: ил. 1000 экз (п) ISBN 5-86656-109-3

Гусев А.И., Ремпель А.А. **Нанокристаллические материалы.** - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. - 224 с. 1000 экз. (о) ISBN 5-9221-0039-4

Розанов С.И. **Общая экология: Учеб. для вузов.** - СПб.: Лань, 2001. - 288 с. (Учеб. для вузов. Спец. лит.). 5000 экз. (п) ISBN 5-8114-0350-X

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ MAGICO И QUEOS ПО ПЕРЕМЕШИВАНИЮ ОБЛАКА ЧАСТИЦ С ВОДОЙ (ПАРОВЫЕ ВЗРЫВЫ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ) С ПОМОЩЬЮ КОДА VAPEX

М.В. Давыдов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов

Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций, г.Электрогорск



Цель работы состояла в расчетном анализе с помощью теплогидравлического кода VAPEX, разработанного в ЭНИЦ ВНИИАЭС, экспериментов MAGICO и QUEOS, посвященных изучению процесса предварительного перемешивания расплава с водой. В экспериментах MAGICO и QUEOS поведение облака капель расплава моделировалось с помощью облака металлических шариков, перемешивавшихся под действием силы тяжести с водой. Были рассмотрены эксперименты как с холодными, так и с горячими частицами. Проводилось сопоставление как интегральных параметров, таких как скорость перемещения передней кромки облака, динамика уровня смеси, скорость парообразования, так и локальных значений величины паросодержания. В целом результаты моделирования кодом VAPEX-P разумно согласуются с опытными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование проблемы парового взрыва является важной составной частью общего анализа развития тяжелой аварии на ядерной энергетической установке, т.к. паровой взрыв представляет собой серьезную потенциальную угрозу целостности оборудования и сооружений АЭС. Реалистичная оценка безопасности АЭС в случае парового взрыва может быть сделана на основе глубокого качественного понимания и надежной количественной оценки явлений, сопровождающих паровой взрыв. В частности, для того, чтобы определить, какая часть расплава и воды принимает эффективное участие в процессах инициирования и распространения парового взрыва, необходимо экспериментально и теоретически изучить начальную стадию парового взрыва - стадию предварительного перемешивания расплава с водой (премиксинг). Однако экспериментальные исследования премиксинга, в основном, характеризуются существенно меньшим пространственным масштабом, нежели характерные размеры ядерной энергетической установки; при этом теории, позволяющей экстраполировать результаты маломасштабных экспериментов непосредственно на ядерную энергетическую установку, не существует. Корректное моделирование начальной стадии крупномасштабного парового взрыва в случае гипотетической тяжелой аварии на АЭС может быть проведено только расчетным путем с помощью кода, верифицированного на результатах экспериментальных исследований. Подобный расчетный код требует использования нестационарных

© М.В. Давыдов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов, 2001

многомерных и многожидкостных моделей не менее чем с тремя полями для описания фаз расплава, воды и пара. При этом код должен содержать корректные замыкающие соотношения для всех потенциально важных процессов, сопровождающих премиксинг, и быть верифицирован на максимально возможном числе доступных экспериментальных работ.

На протяжении ряда лет в ЭНИЦ ВНИИАЭС разрабатывается программный комплекс VAPEX (VAPor Explosion), предназначенный для моделирования всех стадий крупномасштабного парового взрыва в ходе развития тяжелой аварии на АЭС. Исходя из существенно различного характера протекания стадии предварительного перемешивания и взрывной стадии парового взрыва программный комплекс состоит из двух независимых программ: программы VAPEX-P (VAPor Explosion – Premixing) [1], предназначенной для моделирования стадии предварительного перемешивания, и VAPEX-D (VAPor Explosion – Detonation) [2], предназначенной для моделирования взрывной стадии.

Следует отметить, что при экспериментальном изучении процесса премиксинга крайне важно минимизировать экспериментальную неопределенность результатов ввиду многообразия процессов, которые могут существенным образом повлиять на ход процесса в целом. Так для важнейшего процесса премиксинга – фрагментации струи – до сегодняшнего дня не разработано общепризнанной модели. В то же время коллективное поведение облака частиц расплава, образовавшихся в результате фрагментации струи, также представляет сложность для моделирования. Поэтому в начале девяностых годов в ведущих международных центрах по безопасности АЭС были проведены серии экспериментов, в частности MAGICO [3] и QUEOS [4], в которых исследовалось перемешивание облака частиц с водой в широком диапазоне экспериментальных условий. В данной работе приводится анализ некоторых результатов, полученных в рамках экспериментальных программ MAGICO и QUEOS, выполненный с помощью кода VAPEX-P.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОДА VAPEX-P

Код VAPEX-P основан на трехжидкостной модели, описывающей динамику трех фаз – пара, воды и расплава – в нестационарном осесимметричном приближении. Законы сохранения массы, импульса и энергии формулируются отдельно для каждой фазы, что позволяет моделировать термодинамически и механически неравновесные системы. Процессы конденсации, испарения, межфазного трения и теплопередачи описываются источниковыми членами в уравнениях баланса.

Для описания динамики расплава в коде VAPEX-P можно использовать как лагранжев подход, так и подход Эйлера. При этом для описания динамики струи расплава, капель расплава, образовавшихся в результате фрагментации струи, и слоя расплава на дне сосуда используются различные модели. Для расчетного анализа экспериментов MAGICO и QUEOS, в которых исследовалось поведение облака частиц, содержавшего тысячи металлических шариков, было достаточно использовать лишь модель капель расплава. Описание индивидуального поведения каждой экспериментальной частицы в экспериментах MAGICO и QUEOS было крайне затруднительно ввиду значительного машинного времени, которое бы потребовал подобный расчет. Облако частиц при лагранжевом подходе моделировалось с помощью набора так называемых макрочастиц, каждая из которых могла содержать несколько экспериментальных частиц.

На сегодняшний день экспериментально установлено, что на стадии предварительного перемешивания под уровнем воды может формироваться достаточно плотная смесь капель расплава с водой. В подобном случае большой интерес представляет взаимодействие капель расплава друг с другом, т.к. данное взаимодействие определяет дополнительный обмен импульсом в системе. Для описания подобного взаимодействия в случае лагранжева подхода к описанию частиц в расчетный код VAPEX-P была введена

модель соударений.

Подход Лагранжа к описанию частиц имеет ряд преимуществ по отношению к эйлерову подходу, так, например, лагранжев подход позволяет решить проблему численной диффузии при расчетном моделировании облака частиц и вследствие этого более точно описать динамику продвижения фронта облака частиц и его форму. В то же время для описания динамики облака частиц с плотной упаковкой (в пределе сплошной струи расплава) в рамках лагранжева подхода достаточно трудно построить и реализовать модели взаимодействия между частицами для моделирования таких явлений как, скажем, столкновение струи расплава с дном сосуда и дальнейшее ее растекание. Поэтому в расчетном коде, подобном VAPEX-P, желательнее предусмотреть возможность использования эйлерова подхода к описанию фазы расплава. В данной работе эйлеров подход к описанию частиц использовался для моделирования экспериментов QUEOS, в которых плотность облака частиц была выше, нежели в экспериментах MAGICO.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ MAGICO

Моделирование экспериментов MAGICO проводилось с использованием лагранжева подхода к описанию частиц. В экспериментах MAGICO падающее облако металлических шариков перемешивалось с водой в прямоугольном сосуде высотой 200 см с поперечным сечением в виде квадрата со стороной 60 см. Специальное выпускное устройство позволяло создавать однородное облако частиц. Начальные условия экспериментов с холодными частицами (холодных пусков) представлены в табл.1.

Эксперименты моделировались в рамках осесимметричного подхода. Диаметр расчетной области определялся исходя из условия сохранения площади поперечного сечения. Динамика пара в верхней части сосуда ввиду особенностей постановки эксперимента не влияла на процесс перемешивания, поэтому в расчетах моделировалась лишь нижняя часть экспериментального сосуда (высота расчетной области 99 см). Использовалась сетка 12x34 (размер ячейки 3 см), временной шаг равнялся $5 \cdot 10^{-4}$ с. Число макрочастиц изменялось от 1500 до 2000.

Типичные результаты численного моделирования представлены на рис.1, 2. Поля скорости, объемного содержания воды (рис.1), облака частиц (рис.2) представлены через каждые 0,05 с. В расчете, как и в эксперименте, падающее облако частиц вытесняет воду из зоны смешения с образованием "воронки" за облаком частиц, в то время как на переднем фронте облака плотность упаковки частиц возрастает. По мере падения облака протяженность "воронки" за облаком частиц увеличивается и через некоторое время "воронка" схлопывается. Расчеты без учета соударения между частицами привели к нереалистично большому объемному содержанию частиц (~1), в то время как теоретический предел этой величины не превышает 0,7. Учет столкновений между частицами привел к уменьшению объемного содержания частиц вплоть до 0,4.

Важным интегральным параметром, характеризующим процесс премиксинга в целом, является скорость продвижения фронта частиц. На рис.3 представлены результаты

Таблица 1

Начальные условия холодных пусков MAGICO

Эксперимент	Материал	Диаметр, мм	Общая масса, кг	Скорость вхождения в воду, м/с	Начальное объемное содержание частиц	Соотношение длина/диаметр облака, см	Глубина бассейна, см
MA.AX	Al ₂ O ₃	1,5-2,5	5,4	5,0	0,094	43/22	60
MZ.AX	ZrO ₂	2,4-3,4	8,6	5,0	0,109	37/22	60
MZD.AX	ZrO ₂	2,4-3,4	8,6	4,0	0,109	37/22	120
MF.AX	Steel	2,4	12,2	5,0	0,133	37/20	60

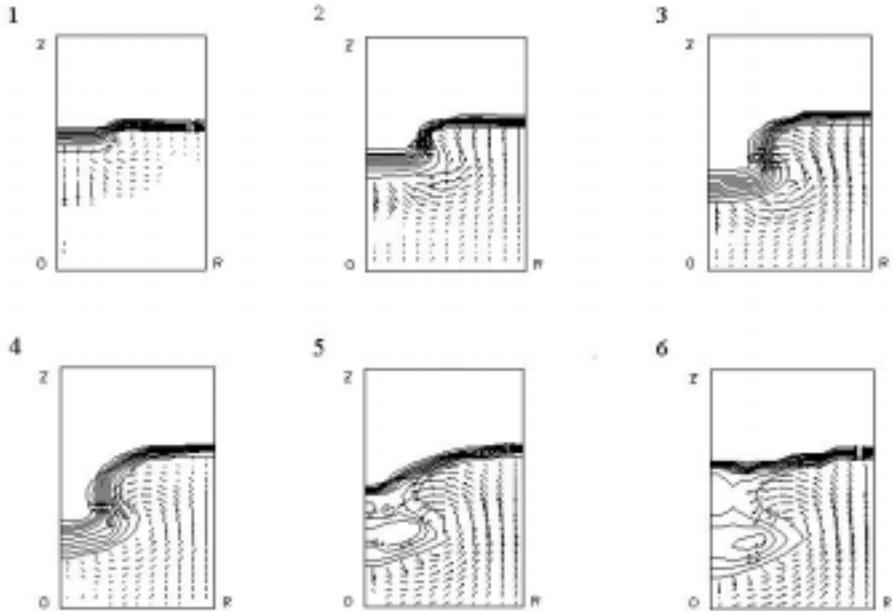


Рис. 1. Рассчитанные поля скорости воды и объемного содержания воды через каждые 0,05 с (эксперимент MAGICO - MZ.AX): 1-0,05 с, 2-0,1 с, 3-0,15 с, 4-0,2 с, 5-0,25 с, 6-0,3 с

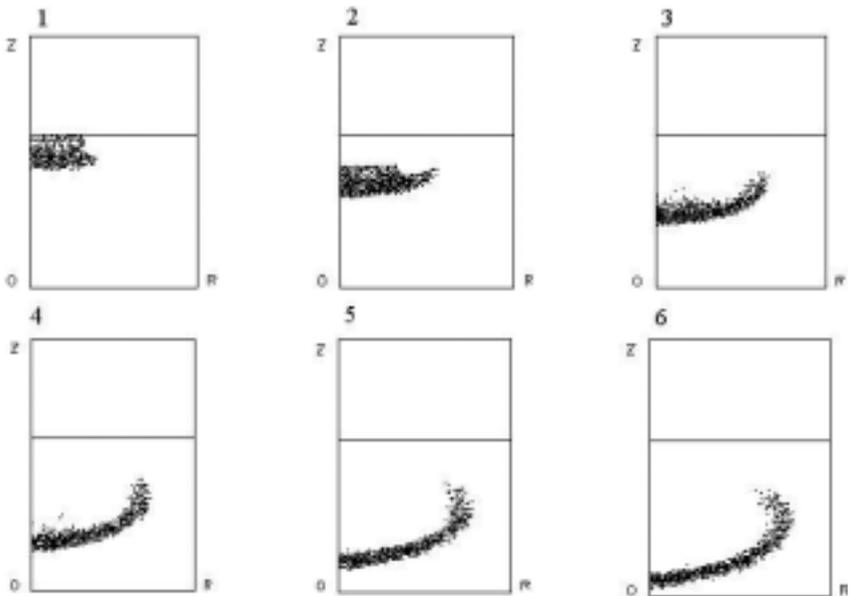


Рис. 2. Облако частиц через каждые 0,05 с (расчет эксперимента MAGICO - MZ.AX): 1- 0,05 с, 2 - 0,1 с, 3 - 0,15 с, 4-0,2 с, 5-0,25 с, 6-0,3 с

моделирования кодом VAPEX-P с учетом и без учета соударений в сопоставлении с результатами эксперимента и результатами расчета американским кодом PM-ALPHA [3]. Видно, что учет соударений несколько улучшает воспроизведение экспериментальных данных. Рассогласование между экспериментальными результатами холодных пусков и расчетными результатами связано, главным образом, с неустойчивостью фронта час-

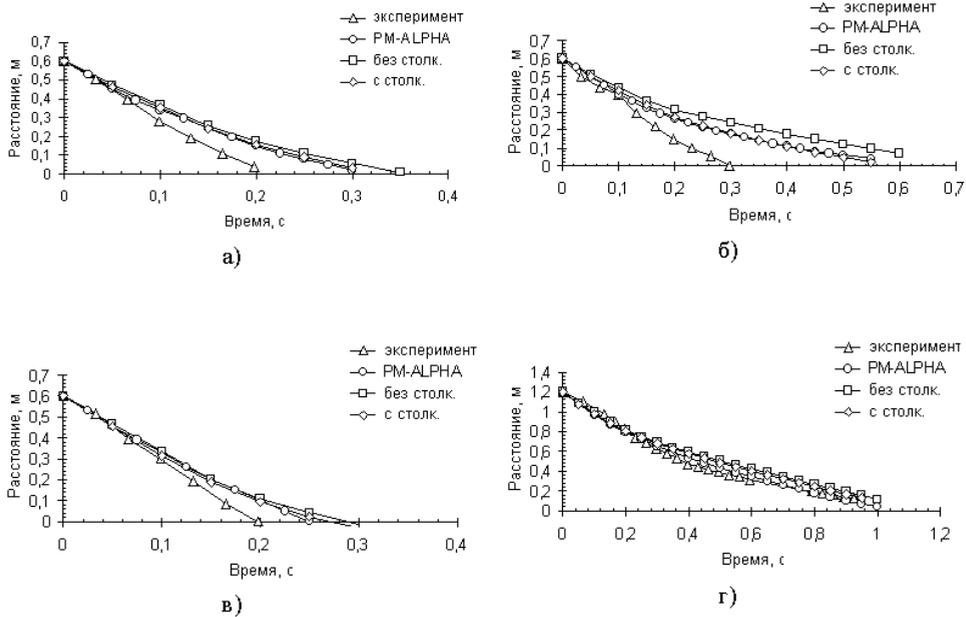


Рис. 3. Положение переднего фронта частиц: а – MZ.AX, б - MA.AX, с-MF.AX, d – MZD.AX

тиц, наблюдавшейся в данных экспериментах и не моделировавшейся в расчете.

В табл.2 приведены начальные условия экспериментов MAGICO с горячими частицами (горячие пуски). Уровень воды в горячих пусках был выше, чем в случае холодных, и равнялся 80 см, поэтому аксиальная длина расчетной области была увеличена до 120 см, размер ячеек равнялся 3х3 см. Временной шаг варьировался в диапазоне 10^{-5} – $5 \cdot 10^{-4}$ с.

Поведение облака частиц при вхождении в воду в экспериментах с горячими частицами было сходным с поведением облака в экспериментах с холодными частицами. Результаты моделирования процесса продвижения фронта частиц в горячих пусках приведены на рис.4. Как видно из рисунка, результаты моделирования кодом VAPEX-P хорошо согласуются с экспериментом.

В горячих пусках MAGICO также измерялась величина среднего паросодержания в сосуде. Измерение производилось вдоль хорды, проходившей через небольшую область экспериментального сосуда, расположенную на 15 см ниже начального уровня воды. Результаты моделирования в сопоставлении с экспериментальными данными приводятся на рис.5. Как видно, код VAPEX-P дает слегка заниженную оценку величины паросодержания, что связано, по-видимому, с ограничениями модели парообразования.

В целом результаты моделирования кодом VAPEX-P хорошо согласуются с экспериментальными результатами как для горячих, так и для холодных пусков.

Таблица 2

Начальные условия горячих пусков MAGICO

Эксперимент	Материал/размер частиц, мм	Общая масса, кг	Эквивалентный диаметр облака, см	Время вхождения в воду, с	Скорость частиц, м/с	Объемное содержание, %	Температура частиц, °C	Недогрев воды/глубина, °C/см
Z1500/0-2	ZrO ₂ /2.4	6,2	22,5	0,33	4,8	1,71	1300-1450	0/80
S1200/0-6	SiCo ₂ /1.0-4	2,85	22,5	0,33	4,8	1,46	1150-1200	0/80

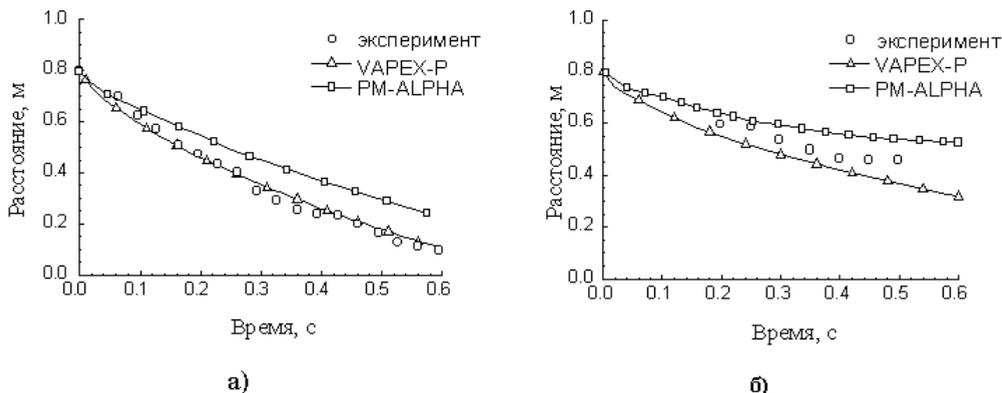


Рис. 4. Положение переднего фронта частиц: а – Z1500/0-2, б – S1200/0-6

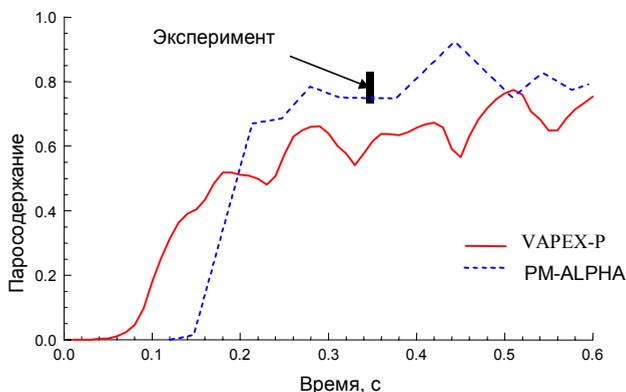


Рис. 5. Сопоставление рассчитанного и измеренного объемного паросодержания в эксперименте Z1500/0-2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ QUEOS

В экспериментах QUEOS, как и в MAGICO, исследовался процесс падения облака металлических шариков в воде; при этом характерная величина суммарной массы частиц в QUEOS совпадала с характерной величиной в экспериментах MAGICO. Основная разница состояла в более высокой плотности облака частиц (облако частиц было компактнее) и отчасти в более высоких температурах горячих пусков. Другое отличие состояло в том, что если в экспериментах MAGICO исследовалась, главным образом, внутренняя структура облака частиц, то в QUEOS особое внимание обращалось на скорость парообразования. Величина среднего паросодержания в горячих пусках QUEOS непосредственно не измерялась, и ее значение можно было оценить лишь исходя из поднятия уровня смеси в сосуде. В табл.3 приведены начальные условия двух горячих пусков Q10 и Q11, которые были выбраны для моделирования как типичные эксперименты со сред-

Таблица 3

Начальные условия экспериментов QUEOS

Эксперимент	Материал	Диаметр, мм	Масса, кг	Объем, см ³	Число частиц	Температура, К
Q6	ZrO ₂	10	7	1900	2340	300
Q10	ZrO ₂	10	6.3	1740	2100	1800
Q11	Mo	4,2	5,7	1025	13700	1800

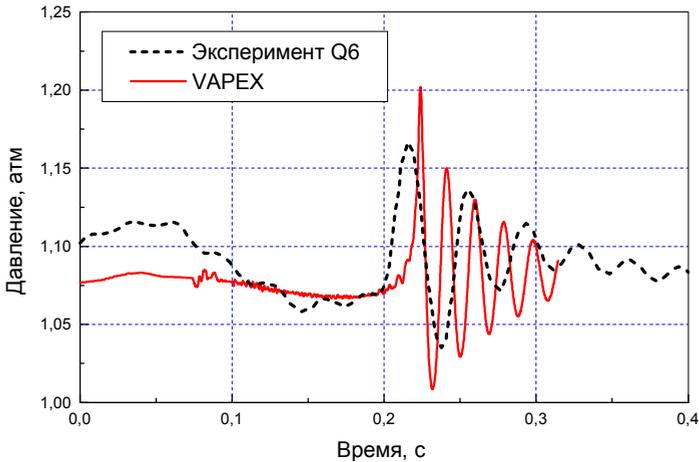


Рис. 6. Давление на дне сосуда (QUEOS – эксперимент Q6)

ней или малой скоростью парообразования и холодного пуска Q6. В расчете (в соответствии с экспериментом) моделировалось однородное облако со средним объемным содержанием частиц 17%. Экспериментальный сосуд QUEOS моделировался как цилиндр с постоянной площадью сечения (80 см в диаметре). Расчетная область разбивалась на ячейки со стороной 2,5 см, временной шаг равнялся $2 \cdot 10^{-5}$ с.

Первоначально моделирование экспериментов QUEOS осуществлялось в рамках лагранжева подхода к описанию частиц. Результаты расчетного моделирования динамики облака частиц разумно согласовывались с экспериментальными результатами, как и в случае экспериментов MAGICO. Из наиболее интересных результатов можно отметить расчетную зависимость давления на дне экспериментального сосуда, приведенную на рис.6, в сопоставлении с экспериментальной зависимостью для холодного пуска Q6. Начальный рост давления (за начальный момент времени принято время соприкосновения переднего фронта облака частиц с поверхностью воды) соответствует соударению облака частиц с поверхностью воды, а начало осцилляций давления соответствует моменту схлопывания воронки за облаком частиц. Некоторое различие в частоте осцилляций давления вызвано тем, что в расчете неконденсирующийся газ моделировался насыщенным паром.

Горячие пуски QUEOS моделировались с использованием эйлера подхода к описанию частиц. На рис.7 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости расхода пара через сбросную трубу и суммарного объема пара, образовавшегося в результате парообразования. Эти величины можно рассматривать как интегральные параметры, характеризующие взаимодействие горячих частиц с водой в экспериментах QUEOS. В целом, результаты моделирования согласуются с экспериментальными результатами. Наличие осцилляций на расчетных кривых давления связано, главным образом, с тем фактом, что парообразование в расчете шло путем образования, отрыва и всплытия более крупных пузырей пара, нежели в эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена верификация кода VAPEX-P (ЭНИЦ ВНИИАЭС), предназначенного для моделирования перемешивания высокотемпературного расплава с охладителем, на результатах экспериментов MAGICO и QUEOS, посвященных взаимодействию облака частиц с водой. Были рассмотрены эксперименты как с холодными, так и с горячими частицами. Проводилось сопоставление как интегральных параметров, таких как скорость перемещения передней кромки облака, динамика уровня смеси, скорость парооб-

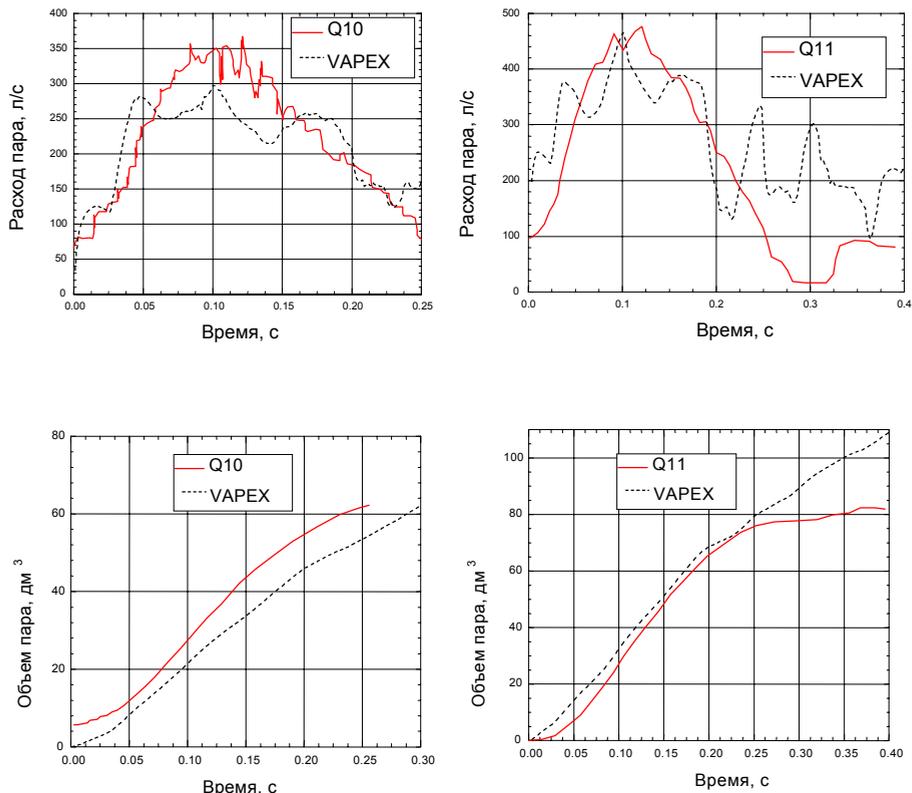


Рис. 7. Сопоставление результатов VAPEX с экспериментальными результатами горячих пусков QUEOS

разования, так и локальных значений величины паросодержания. В целом результаты моделирования кодом VAPEX-P разумно согласуются с опытными данными.

Литература

1. Davydov M.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Numerical Analysis of Multiphase Premixing of Steam Explosions // Third Int. Conference on Multiphase Flow. - ICMF 98. - Lyon. - France. - June 8-12. - 1998. - P.1-8.
2. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Sokolin A.V. Propagation of Thermal Detonation Wave with Microinteraction // Proc. Intern. Conf. on Multiphase Systems "Dynamics of Multiphase Systems" - Ufa. - Bashkortostan. - RUSSIA. - June 15-17. - 2000. - P.253-257.
3. Angelini S., Theofanous T.G., Yuen W.W. Premixing-related behavior of steam explosions // Proc. 7th Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. - NURETH-7. - Saratoga Springs. - NY. - Sept. 10-15 - V.3 - 1995. - 1754-1778.
4. Meyer L. QUEOS, an Experimental Investigation of the Premixing Phase with Hot Spheres // Proc. of the OECD/CSNI specialists meeting on fuel-coolant interactions. - Tokai-Mura. - Japan. - May 19-21. - 1997. - P.155-165.

Поступила в редакцию 07.06.2001

RELAP5 MODELING OF THE NPP VVER-1000 STEAM GENERATOR

S.A.Rouhanifard* , A. A. Kazantsev , V.V. Sergeev*****

* *NPP Division-Atomic Energy Organization of Iran*

** *Simulation System LTD (SSL), Institute of Nuclear Power Engineering,Obninsk*

*** *Institute of Physic and Power Engineering (IPPE),Obninsk*



В статье обсуждается теплопередача от первого контура ко второму и моделирование процесса испарения в парогенераторе (ПГ) ВВЭР-1000 для АЭС. RELAP5/MOD3.2 используется для моделирования гидродинамических и тепловых параметров горизонтального ПГ с U-образными обогреваемыми трубками поверхности теплообмена. Результаты стационарного режима и режима естественной циркуляции и компьютерный анализ представлены и проведено сравнение с опубликованными данными о ПГ.

INTRODUCTION

Heat transfer calculation enters the reactor analysis for two reasons of indispensable significance. Firstly, the power generation capability of the core is confined by the thermal-hydraulic parameters, which have to remain within the designed ranges. Secondly, temperature and pressure of the coolant determined the coolant density that influence on neutron field properties.

The steam generator (SG) is one of the most important components of the VVER type reactor. Thus, the ability to simulate and predict the steady state and transient thermal-hydraulic behavior is important for removing the heat from primary circuit and production of a dry saturated steam. For safety analysis of a Nuclear power plant it is important to have reliable model of SG. For transient simulation of NPP it is necessary to have a model that can perform calculations for different modes of operation. Such modes for SG include forced convection at nominal mode and natural circulation in primary circuit at shut down mode.

The RELAP5 is a widely used computer code for steady state or transient calculations of thermal-hydraulic system. The task of reactor thermal-hydraulic is to assess safe, reliable and economical heat transfer systems. The RELAP5 code was already used for the calculation of vertical type SG [5].

This paper summarized the results of the RELAP5/MOD3.2 analysis related to the SG modeling, which aim at evaluation of cod's ability to predict the VVER-1000 SG behavior and to investigate the primary to secondary heat transfer.

RELAP5 CODE DESCRIPTION

The RELAP5 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) is best estimate code, developed for transient simulation of a light water reactor coolant system. It uses one dimensional, two fluid, non-equilibrium transient model of steam water mixture flow with the possibility to take into account the vapor phase containing a non-condensable

component, and the liquid phase containing a non-volatile solutes, that are derived from the basic thermal-hydraulic laws.

The model consists of two-phase continuity equations, two-phase momentum equations, and two-phase energy equations. The system of six basic partial differential equations with non-constant coefficients is closed with semi-empirical correlations for interface drag, wall friction, mass and heat transfer between phases, fluid to wall heat transfer, and it has a number of special process models (e.g. radiation heat transfer and so on).

The solution of six basic equations for six primary independent variables and some other variables (pressure, internal energies, velocities, non-condensable gas and boron density) is determined by partially implicit numerical scheme. Thermal dynamic quantities are computed in the middle of each cell of the discretization scheme and volume averaged for each phase. Thus, the results may depend on the discretization scheme.

THE VVER-1000 STEAM GENERATOR AND ITS MODEL DESCRIPTION

The VVER-1000 SG is a horizontal U-tube type (Fig. 1, 2 and 3) and is used as the heat sink of the primary circuit. The primary side collector is intended for coolant distribution along the horizontal heat exchanger tubes, coolant collection and removal.

Heat from primary circuit is transferred via tubes into the secondary circuit. The feed-water, which is normally introduced into the secondary side, removes heat from U-tube and warms up to saturation temperature, and finally evaporates in the multiple natural circulation loop formed by tube packets and gaps between this packets (see fig. 3). Further on a water-steam mixture flows upward through the U-tube packets to the moisture separator area. The separated liquid is moved by natural circulation through the down chamber and back to the packet inlet at the lower part of the tube. Dry steam, however, leaves the SG top through perforated plate and separator to steam collector. For detail description of circulation see [1,2].

A detailed nodalization and corresponding RELAP5/MOD 3.2 input model have been developed for the VVER-1000 SG (Fig. 4, 5). The actual physical dimensions are used to describe the flow areas, volumes, hydraulic diameters, elevations, heat transfer area and heat structure masses.

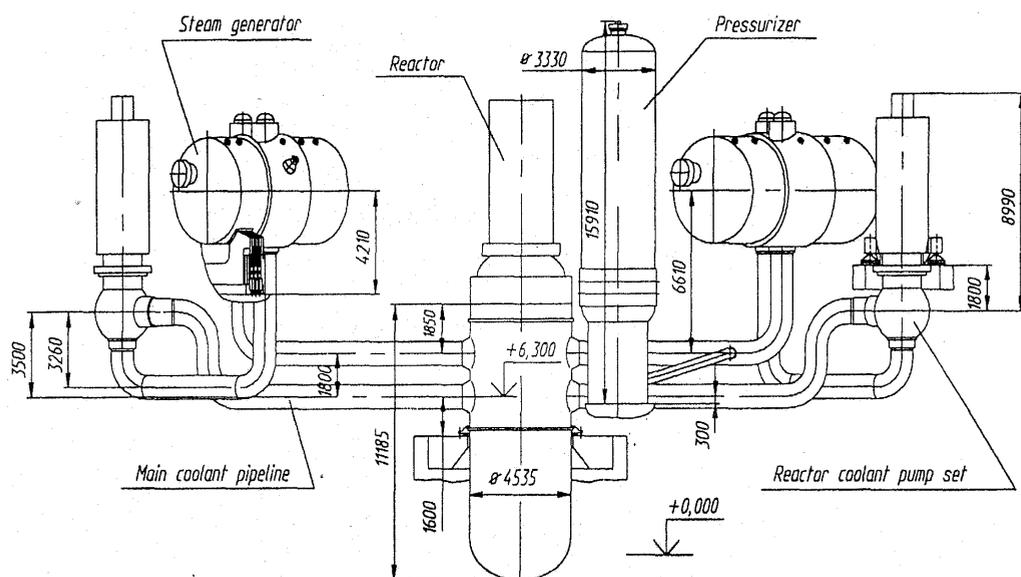


Fig.1. VVER-1000 - Scheme of primary side

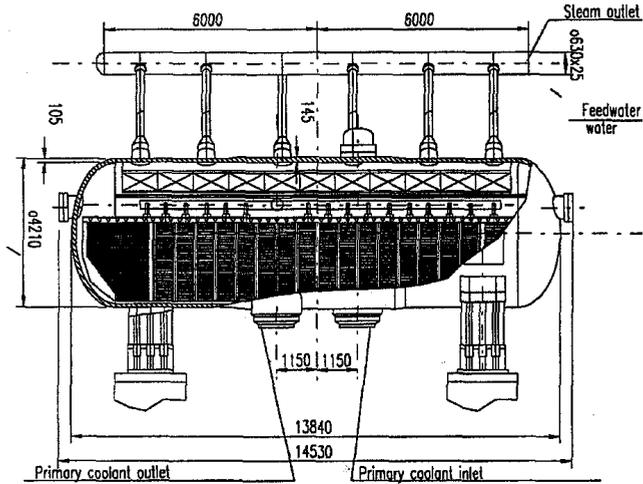


Fig.2. VVER-1000 - Steam Generator

The description of the nodalization scheme for one circulation loop of I and II circuits

1. The scheme of I circuit

- 1.1. Reactor (hydraulic volumes and fuel rod assembly).
- 1.2. Cold/Hot Leg pipe lines.
- 1.3. Reactor Coolant Pump (RCP) of I circuit.
- 1.4. Steam generator (steam generating tubes and collectors of I circuit)
- 1.5. Pressurizer.
- 1.6. Tank of emergency core cooling system (high-pressure safety injection system)
- 1.7. Pipeline of I circuit "Break" (leakage from the pressurizer)
- 1.8. System of valves for the introduction of the leakage scenario.

2. The scheme of II circuit

- 2.1. Feed water pump (inlet boundary condition).

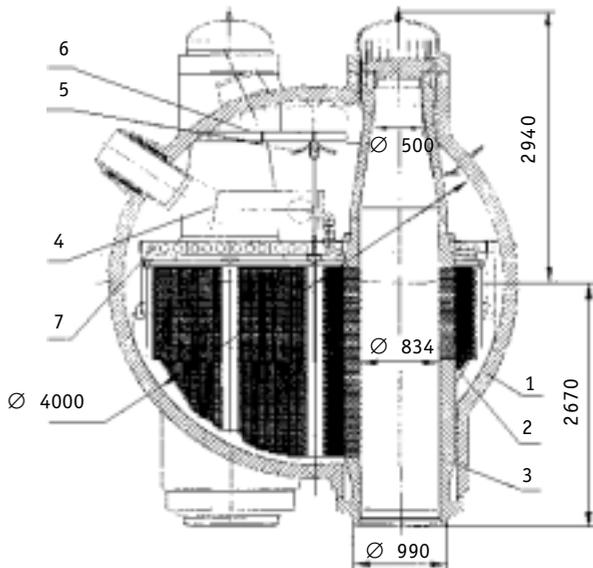


Fig. 3 VVER-1000 - Steam Generator of PGV-1000 type cross section: 1-vessel, 2-tube packet, 3 - collector, 4 - feedwater inlet, 5-separator plates, 7-perforated plates

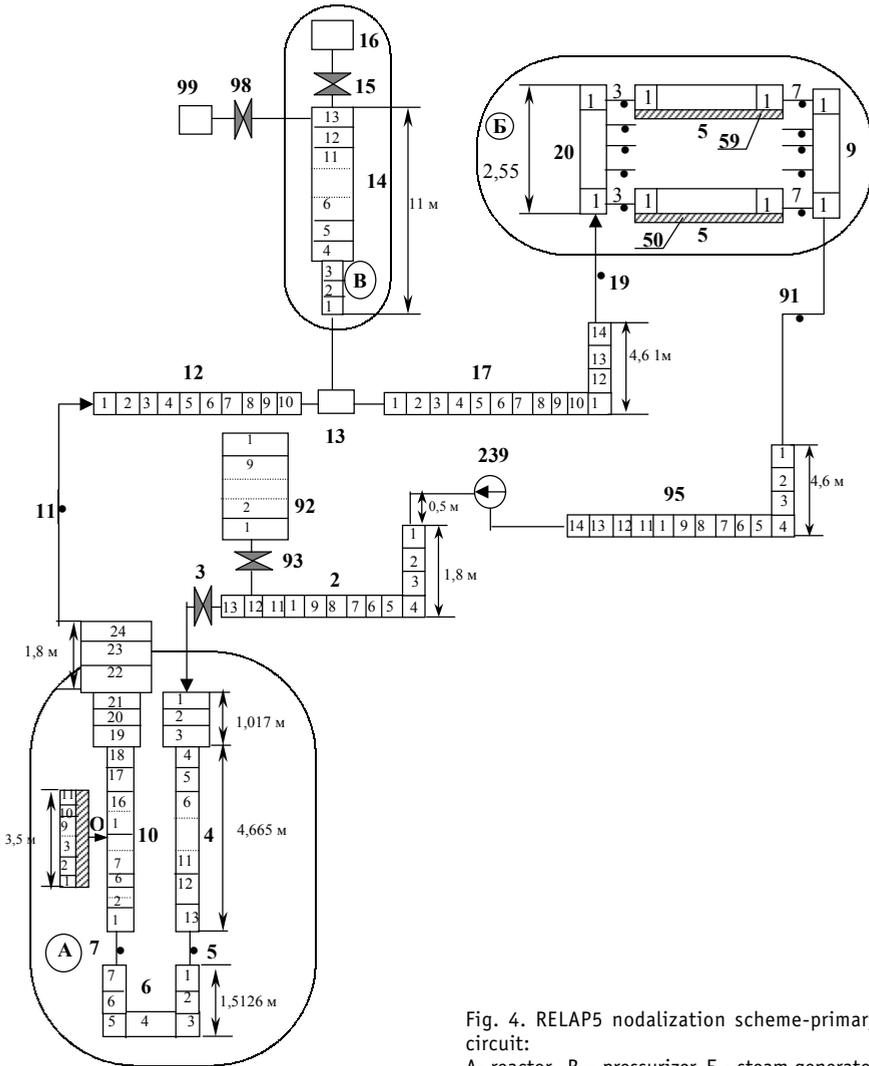


Fig. 4. RELAP5 nodalization scheme-primary circuit:
A- reactor, B – pressurizer, Б - steam generator

2.2. SG (hydraulic volumes of II circuits, separator).

2.3. Main steam lines volume (as outlet boundary condition).

The II circuit scheme is created as a linear one (without turbine, main condenser, high and low-pressure regenerative reheaters).

The fluid hydraulic of the reactor is presented as one fuel rod assembly of average power. Gap flow between fuel rod assemblies is not simulated.

The SG is presented as semi-two dimensional model. It is considered 10 groups of tubes along of SG altitude and 2 collectors in I circuit. The group of tubes describes 11000 U-tubes heat exchanger situated horizontally from hot to cold collector. The II circuit is considered as 10 segments with the natural circulation up-flow for volume between the tubes of steam generator shell. In summary, SG shell is simulated as the systems of vertical pipes and horizontal junctions (10x9 of connections are simulated for cross-flow). It includes only volumes arranged in tank between tubes with predominantly up-flow mode. Each segment is presented for heat transfer on 10 cells in accordance with subdivision of I circuit. Separator and bypass down-flow line close circuit of a multiple natural circulation in SG bulk of II circuits. Down-flow pipelines integrate volumes in central and side gaps between

Table 1

List abbreviation for Fig. 4

№ of element	Type of element in RELAP5	Designation
2,95	PIPE	“Cold” leg
239	PUMP	RCP
4	PIPE	Downcomer “annular gap”
6	PIPE	Lower Plenum
10	PIPE	Core
12,17	PIPE	“Hot” leg
13	BRANCH	Three way pipe
14	PIPE	Pressurizer(PRZ)
16	TMDPVOL	Boundary Condition for P in PRZ
20,90	PIPE	Inlet and Outlet SG Collector
50÷59	PIPE	Internal Space of SG tubes
92	PIPE	Vessel of HPSI
99	TMDPVOL	Boundary Condition for P in atmosphere
3,15,93,98	VALVE	Motor Operated Valves
101	HS	Fuel Rods of Core
501÷591	HS	SG Pipes
Other	SNGLJUN	Junctions

tube bundles with predominantly down-flow by flow of coolant and are simulated by pipe with decreasing area from top to bottom.

RESULTS OF SIMULATION

The following modes of operation were considered:

- Steady state on 100 % of power. Check of the hydraulic characteristics in I circuit at design values of nominal flow and pressure drop.

- Steady state on 10 % of power at natural circulation in I circuit with switch off RCP. The mode of an emergency heat removal through a steam generator was simulated (shutdown mode).

Table 3 shows the main parameters of VVER-1000 steam generator and calculation results after stabilization.

Pressure drop in the steam generator

The following correlations are especially important in the RELAP5 for predictions of SG heat transfer:

- Dittus-Boelter correlation for single-phase liquid convection;
- Two Chen correlations for subcooled and saturated nucleate boiling heat transfer.

The natural circulation into SG bulk has a non-regular character and is described in [1,2]. Inside SG shell there exists a mode of non-organized natural circulation, which is very complicated and difficult to predict.

There exist some methods of SG characteristic improvement. One of them is to insert baffle in the shell side. The baffles make natural circulation in the shell as organized one

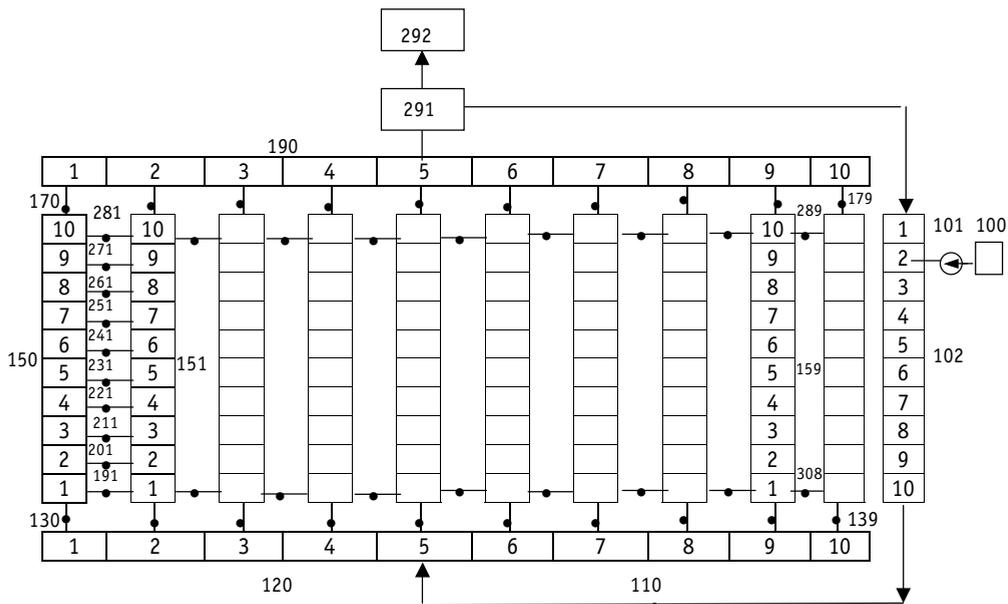


Fig. 5. RELAP5 nodalization scheme (secondary circuit- steam generator)

Table 2

List abbreviation for Fig. 5

№ of element	Type of element in RELAP5	Designation
120	PIPE	Lower Plenum
150÷159	PIPE	Shell space inside SG U-tube bundles
190	PIPE	Upper Plenum
102	PIPE	Shell space in gaps between U-tube bundles
191	SEPARATR	Shell Separator
192	TMDPVOL	Main Steam Line Boundary Condition(BC)
100	TMDPVOL	Feedwater BC
101	TMDPJUN	Feedwater Pump
130÷139, 170÷179	SNGLJUN	Shell Bottom/Top Junction
191÷289	SNGLJUN	Shell side 2D Cross flow Junction

and improve it, and moving force at baffles operation will be also increased. The results of 2 cases (non-organized and organized circulation with baffles that is without cross flow junctions) are compared for pressure and void fraction distribution in Fig. 6,7 and 8,9 respectively.

According to nodalization along x-axes there presented numbers of tube and after “-” number of cell in tube at simulation (see numbering in Fig. 4 for details). Hot collector is to the left and the cold one is to the right from the plot.

The results of pressure calculations in 10 sections of SG bulk from hot to cold collector are presented in Fig. 6. First 10 points go down due to decreasing of water-steam column.

Pressure distribution along the tube is presented in Fig. 11 and 12 for both sides. There exists horizontal almost constant distribution of pressure. Void fraction distributions

Table 3

Main design parameters of SG-1000

Parameter	Design value	Calculation
Thermal power, MW	750	750
Steam capacity (t/h)	1470	1466
Outlet steam pressure (MPa)	6.27	6.24
Primary coolant pressure at the SG inlet (MPa)	15.7	15.7
Primary coolant inlet temperature (°C)	321	326.7
Primary coolant outlet temperature (°C)	291	295
Feedwater temperature (°C)	220	220
Steam temperature (°C)	278.5	278.4
Steam humidity at the SG outlet, %	0.2	0.2

demonstrate presence of some vortexes in SG bulk. More accurate 3D-model data presented in Fig. 10 shows the same maximal values of void fraction.

Fig. 7 corresponds to organized natural circulation case with baffles. The results of calculations in 10 sections of SG bulk from hot to cold collector are presented in Fig. 7 for pressure. First 6 columns are similar to Fig. 6 but pressure drop from bottom to top is higher. Last 4 mixture columns in right bottom of Fig. 7 have 3 points with almost constant pressure due to steam column, rgh value is small at SG top near cold collector with down-flow (water goes down but steam goes up in this place). There is no horizontal constant distribution of pressure due to the influence of baffles. At the hot collector there exist up-flow movement and near cold collector there is down-flow

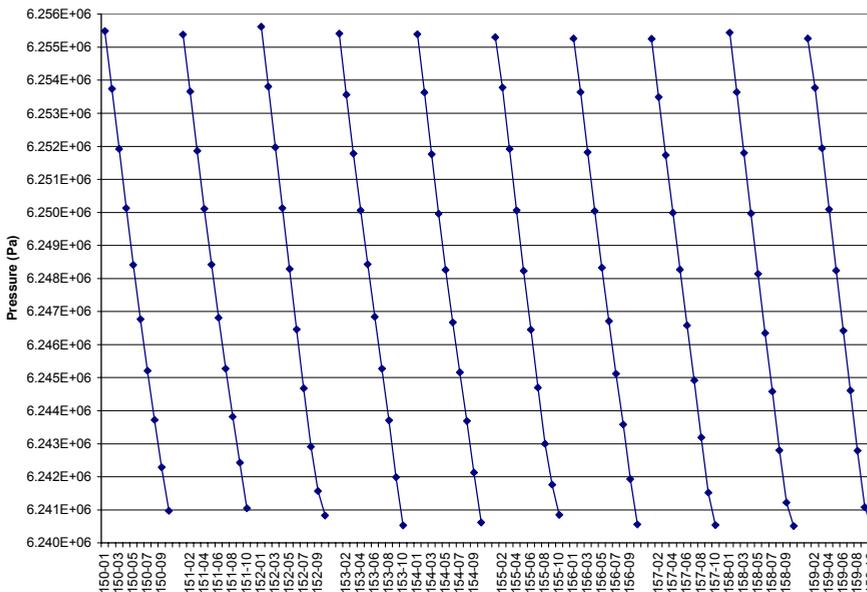


Fig. 6. Pressure distribution along the altitude of II side SG in up-flow 10 zones (for 2-dimensional case with horizontal junctions 191-289)

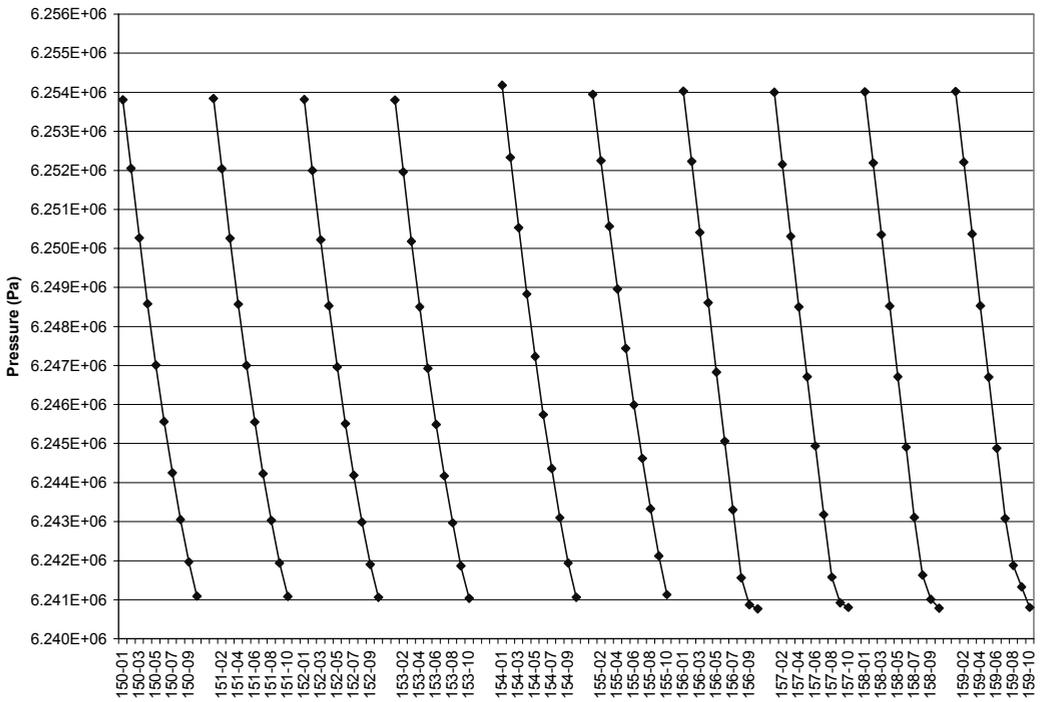


Fig. 7. Pressure distribution along the altitude of II side SG in up-flow 10 zones (for 2-dimensional case without horizontal junctions, organized circulation)

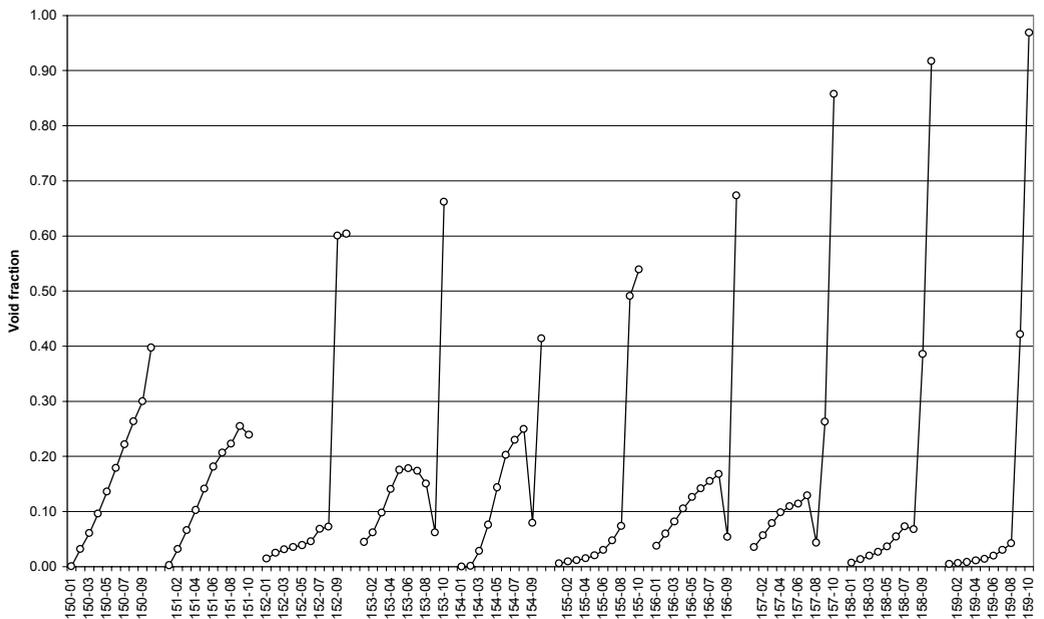


Fig. 8. Void fraction distribution along the altitude of II side SG in 10 zones (for 2-dimensional case with horizontal junctions 191-289)

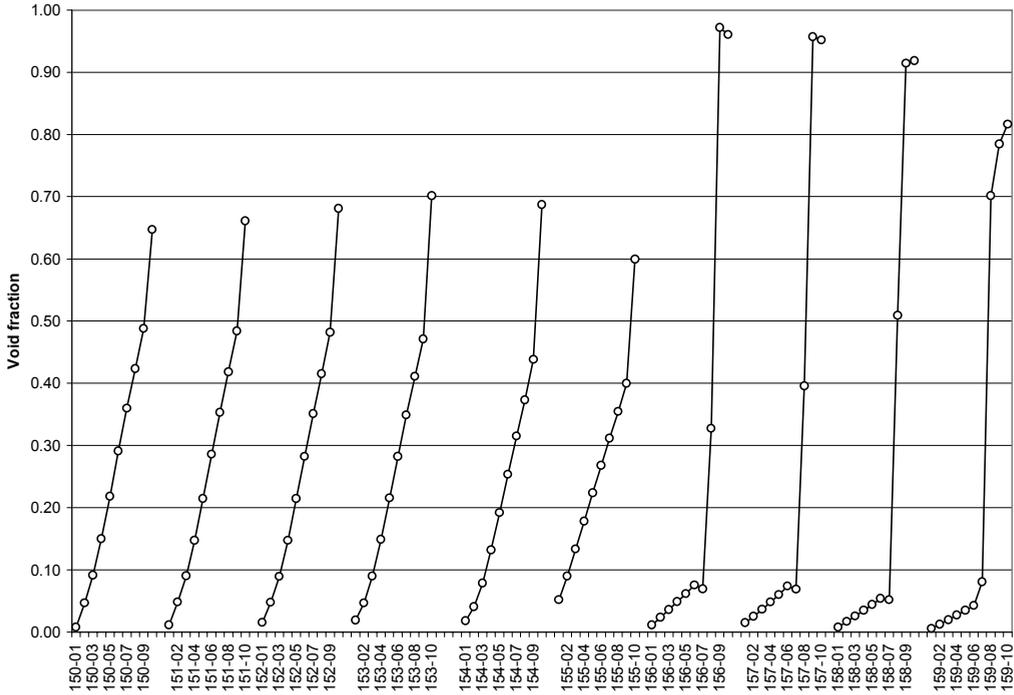


Fig. 9. Void fraction distribution along the altitude of II side SG in 10 zones (for 2-dimensional case without horizontal junctions, organized circulation)

movement. Void fraction distribution demonstrates presence of only one organized vortex in all SG bulks instead of numerical vortexes for non-organized circulation case.

Natural circulation during shut-down mode

Paper [6] presents distribution of flow rate in steam generator in modes of its natural circulation is presented. Our calculation in this mode is presented in Fig 13. This figure shows the non-uniform velocity distribution due to the gravity force action along the altitude of SG. The results are coincide with data [6]. The results that the bottom tube group has negative velocity in comparison with nominal flow direction also coincide.

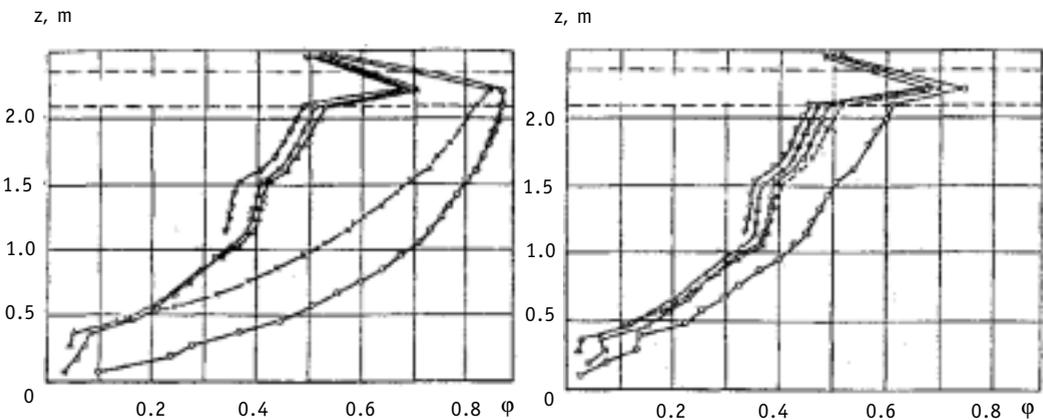


Fig. 10. Distribution of void fraction along altitude (counting from the lower series of tubes of the main packet) from [1]

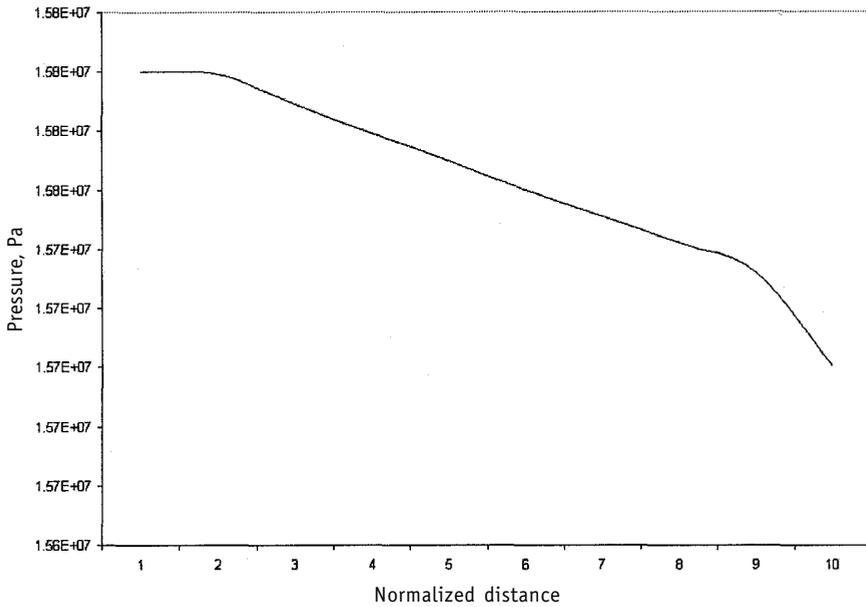


Fig. 11. Pressure distribution along the primary side SG

On the basis of schemes introduced in a Fig. 4,5 the file of INPUT data is prepared and debugged. It is valid for codes RELAP5/MOD3.1, RELAP5/MOD3.2. A volume of the INPUT file is near 120 kilobyte.

The problem was decided as non-steady, at first system came in a stable state during 200 seconds, then either the solution of a received steady-state problem was analyzed, or the emergency (leak) was simulated (due to limited volume of paper the results of leak scenario are not presented). The computer debugging of a problem was conducted in comparison to steady-state parameters with the design data from OKB "Hydropres" for nominal modes, and also matching with the data, published in the literature, on

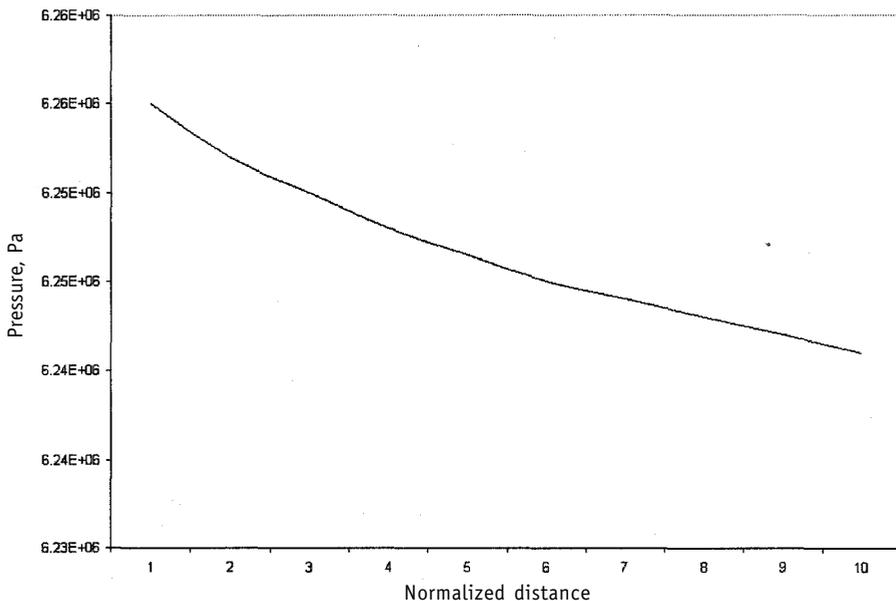


Fig. 12. Pressure distribution along the secondary side SG

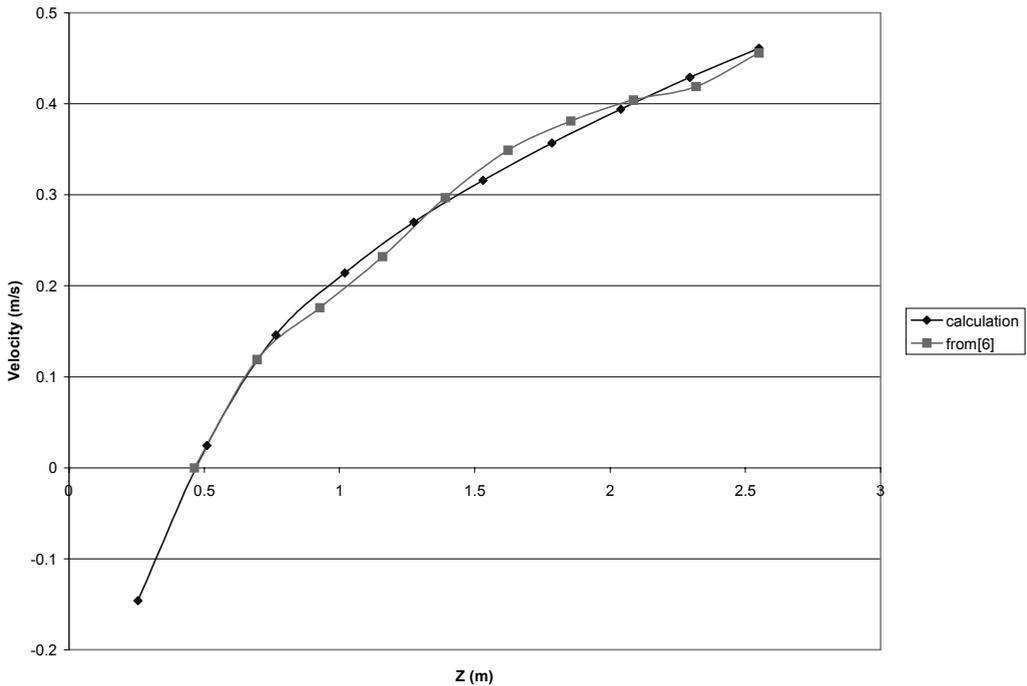


Fig. 13. Velocity distribution in the I circuit SG due to natural circulation

distributions of fields of speeds and void fraction.

The consumed computer time for problems described above is within the limits 30 minutes for one calculated variant at computer Pentium III 700 MHz.

ACKNOWLEDGMENTS

This problem has been carried out as part of international IAEA postgraduate training (fellowship) at Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering (INPE). The authors are thankful to Dr. V.I. Belozеров for the invitation to participate in this work. Also thanks to Prof. Yu.S. Yuriev for the fruitful discussion on this subject.

References

1. Горбуров В.И., Зорин В.М. Моделирование на ЭВМ гидродинамики водяного объема парогенератора ПГВ-1000//Теплоэнергетика. – 1994. - №5. - С. 22-29.
2. Юрьев Ю.С., Лукьянов А.А., Канухина С.В., Смыков В.Б. Трехмерные расчеты переноса и осаждения продуктов коррозии в горизонтальном парогенераторе ВВЭР: Препринт ФЭИ – 2823. - Обнинск, 2000. – С. 41.
3. Технический отчет “Парогенератор ПГВ-1000М Расчет теплогидравлический”. - 1979. – 40 с.
4. RELAP5/MOD3.2 Code Manual
5. Mavko B., Petelin S., Gortnar O. RELAP5 modeling of the Westinghouse model D4 steam generator//Journal of Nuclear Technology. – 1993. – V. 101. – P. 181-192.
6. Благовещенский А.Я., Леонтьева В.Л., Митрюхин А.Г. Распределение расхода теплоносителя в парогенераторе в режимах его естественной циркуляции //Атомная Энергия. – 1997. - Т. 83. - Вып. 3. - С. 169-174.
7. Bushehr NPP – Preliminary Safety Analysis Report (PSAR), Atomic Energy Organization of Iran, 2000 (Eng).

Поступила в редакцию 18.06.2001

УДК 543.52+615.849

РАЗРАБОТКА ТЕХНИКО-МЕТОДИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАДИОЙОДТЕРАПИИ

Ю.М. Бакун*, А.С. Апян*, Н.Н. Лянной*, Е.С. Матусевич*,
Н.Г. Шишканов**, Р.А. Розиев***

* *Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*

** *Медицинский радиологический научный центр РАМН, г. Обнинск*

*** *НПП "Медбиофарм", г. Обнинск*



В данной работе описана установка для измерения диагностических и терапевтических активностей радионуклида ^{131}I и представлены методические разработки, позволяющие обеспечивать достоверность и высокую точность результатов измерений активностей ^{131}I в щитовидной железе (ЩЖ) при диагностическом исследовании и терапии.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивный йод ^{131}I уже более 50 лет используют для лечения такой патологии щитовидной железы как диффузный токсический зоб (ДТЗ), а также некоторых форм дифференцированного рака щитовидной железы. В последнее время индивидуальное дозиметрическое планирование радиойодтерапии ДТЗ рассматривается как наиболее оптимальный подход для назначения активностей ^{131}I [1]. Значение активности в каждом конкретном случае определяется по поглощенной ЩЖ дозе излучения. Именно дозиметрическое планирование позволяет учитывать влияние таких параметров как масса ЩЖ, величина накопления и скорость выведения ^{131}I из исследуемого органа, что и предопределяет высокую эффективность лечения.

Однако широкое распространение данного метода в клинической практике сдерживается рядом факторов. Основной из них – отсутствие соответствующего технико-методического обеспечения для изучения кинетики РФП в исследуемом органе. Для исследования кинетики диагностических активностей ^{131}I в пределах 300–900 кБк, вводимых с целью оценки функционального состояния ЩЖ, сегодня существует достаточно широкий арсенал оборудования [2] и стандартизованные методики измерений [3]. Но для изучения поведения лечебного количества радиойода (от 0,03 до 1,1 ГБк) такое обеспечение отсутствует.

© Ю.М. Бакун, А.С. Апян, Н.Н. Лянной, Е.С. Матусевич, Н.Г. Шишканов,
Р.А. Розиев, 2001

Для исследования кинетики диагностических и терапевтических активностей ^{131}I , вводимых при лечения ДТЗ, была сконструирована установка из стандартных блоков технического назначения, допущенных к применению в медицинских лабораториях. Основные требования, предъявляемые к прибору, – это стабильность работы в области больших активностей и соответствие всем требованиям техники безопасности для пациентов и обслуживающего персонала (устойчивость штативов и стоек, на которых закреплены блоки детектирования, минимальные дозы облучения персонала, возможность дезактивации, заземление, помехозащищенность и т.д.). В работе представлено описание сконструированного прибора и методические разработки по определению активностей ^{131}I , локализованных в ЩЖ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установка для исследования кинетики вводимых активностей РФП собрана на базе модулей системы “Вектор”, широко используемой в ядерной медицине[4]. Блочный принцип построения, характерный для системы “Вектор”, позволяет применять стандартный набор комплектующих и легко “модифицировать” его в соответствии с задачами исследования. Установка, изображенная на рис.1, выполнена на базе многоканального анализатора АМА-03Ф, спектрометрического тракта с двумя усилителями типа БУИ-3К и двумя коллимированными блоками детектирования типа БДЭГ-2-22 и 6931-17 (кристаллы NaI, активированные Tl, размерами $\varnothing 40 \times 40$ и $\varnothing 25 \times 25$). Коллимированные детекторы, закрепленные на штативе типа NZ-268 (фирма “Гамма”, Венгрия), с помощью механических приводов легко перемещаются в направлении трех координатных осей при ориентации на необходимую область измерения. Канал 1 предназначен для измерения диагностических активностей радионуклида, канал 2 – для измерения лечебных активностей. Для регистрации “полезного” гамма-излучения, исходящего только из ЩЖ, использовали коллиматоры типа NZ-136 (фирма “Гамма”, Венгрия). Конструкция коллиматора в терапевтическом канале дополнительно снабжена вставкой, частично перекрывающей входную поверхность сцинтиллятора и уменьшающей тем самым его чувствительный объем.

После первоначальной настройки прибора проведены тестовые измерения, а полученные при этом исходные показатели рассматривались в качестве эталонных для контроля работы прибора в дальнейшем. В работе изучены следующие эксплуатационные характеристики установки, представляющие интерес с точки зрения медицинской практики: энергетическое разрешение, линейность по энергии, просчеты и смещение фото-

пика при больших нагрузках. Исследованы также чувствительность детекторов в рабочем поле зрения (карты изосчетных зон коллиматоров).

В качестве средств измерения параметров установки использовали источники ^{137}Cs и раствор Na^{131}I заданных активностей. Для имитации ЩЖ водный раствор Na^{131}I помещался в тканезквивалентном фантоме (фирмы “Гамма”), по форме и структуре являющемся аналогом шеи стандартного человека (рис.2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Непосредственное измерение терапевтических активностей на стандартном диагностическом оборудовании – гамматиреорадиометре (ГТРМ-01ц), дистанционном сцинтилляционном устройстве (ДСУ)

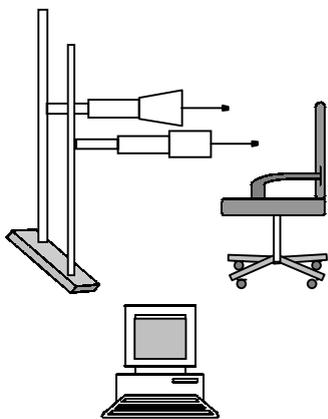


Рис. 1. Схематическое изображение установки

или аналогичной аппаратуре, конструктивно выполненной на базе сцинтилляционного датчика и одноканального анализатора импульсов, невозможно, поскольку вводимые при лечебных процедурах активности на два и более порядка превышают значения диагностических. Анализ имеющихся литературных источников позволил предложить ряд способов решения этой проблемы. Самый простой с точки зрения технической реализации способ – экранирование блока детектирования стандартной радиодиагностической установки свинцовыми пластинами [5]. Снижение скорости счета из-за наличия свинцовой защиты детектора неизбежно увеличит долю рассеянных гамма-квантов, регистрируемых детектором, и как следствие, приведет к ухудшению энергетического разрешения прибора, а при больших нагрузках – к просчетам и дрейфу пика полного поглощения.

Снижение загрузки измерительного тракта установки путем удаления детектора от источника излучения, которым в данном случае является пациент, также имеет свои негативные стороны. С увеличением расстояния растет поле обзора детектора, а значит, и доля рассеянного излучения, поступающего из участков тела, которые находятся вне исследуемой области (т.е. вне ЩЖ). Дополнительным коллимированием блока детектирования можно добиться снижения вклада регистрируемого рассеянного излучения, но в этом случае точность фиксации поглощения ЩЖ может оказаться недостаточной.

Использование второго канала – менее чувствительного сцинтилляционного датчика – с целью детектирования терапевтических активностей позволяет избежать этих недостатков. В работе [6] приведены основные характеристики сконструированного по такому принципу прибора – радиометра больших активностей (РБА) для измерения диагностических и лечебных активностей в щитовидной железе и в суставах (или других локализациях). Предложенный в [6] метод является удовлетворительным решением технико-методической проблемы, возникающей при дозиметрическом подходе, и позволяет с достаточной точностью определять активности ^{131}I , вводимые с целью лучевого воздействия на ткань ЩЖ.

Аналогичный подход реализован авторами данной работы при создании собственной установки для исследования кинетики активностей РФП в организме пациента. Однако с появлением и широким внедрением в клиническую практику многоканальных анализаторов импульсов в данных установках предпочтительнее использовать такие анализаторы, а не одноканальные, как в работе [6]. Это обусловлено, прежде всего, недостатками последних – невозможностью оперативного слежения за смещением пика полного поглощения и положением окна амплитудного анализатора относительно пика. В связи с тем, что предполагается внедрение сконструированных по такому принципу приборов и в других лабораториях, в настоящем исследовании подробно описана экспериментальная часть работы и приведены технические характеристики прибора.

Тестовые испытания прибора включали в себя изучение 1) рабочих характеристик детекторов – зависимости скорости счета гамма-квантов от высокого напря-

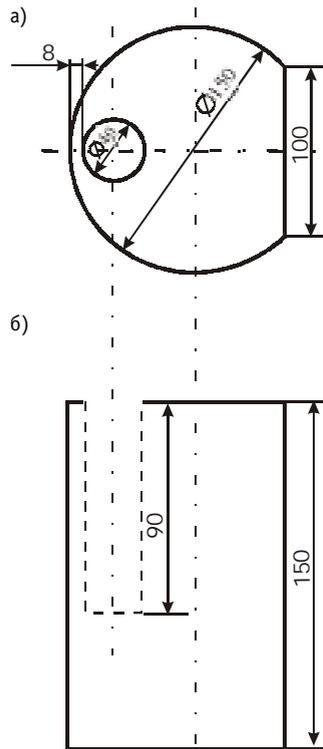


Рис.2. Фантом ЩЖ в проекциях: а) фронтальная и б) профильная

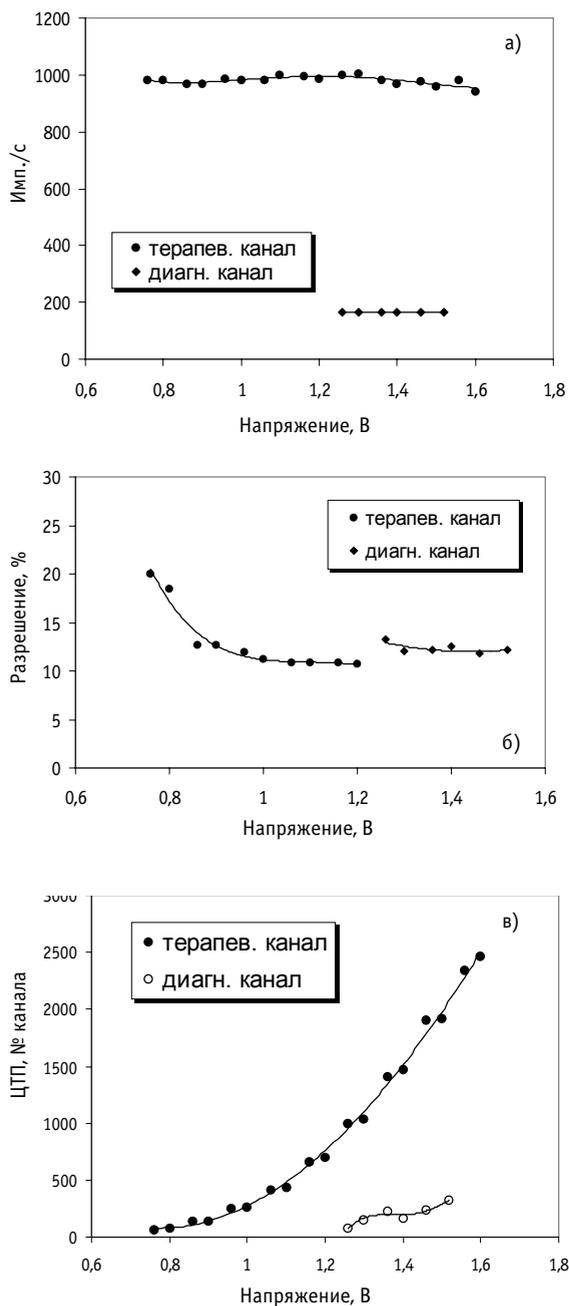


Рис. 3. Изменение скорости счета гамма-квантов (а), разрешения (б), положения центра тяжести пика (в) от напряжения $U_{\text{вых}}$ детекторов

жения $U_{\text{вых}}$ подаваемого для питания фотозлектронного умножителя (рис. 3а); 2) изменения от напряжения $U_{\text{вых}}$ энергетического разрешения (рис. 3б), положения центра тяжести пика (рис. 3в) и отношения площади пика к площади фона.

Основные технические параметры каналов прибора представлены в табл. 1.

Тестовые измерения показали, что прибор работает стабильно в рабочих диапазонах активности. При больших нагрузках, когда мертвое время амплитудного анализатора достигает 14-15% от времени измерения, смещение пика полного поглощения не превышает $\pm 0,1\%$ и -2% за 30 с работы соответственно диагностического и терапевтического каналов. Что касается максимального смещения пика активности ЩЖ при больших нагрузках, то оно не превышает $\pm 1\%$ и -12% за время набора спектра соответствующим каналом в течение 7 мин. Калибровка шкалы энергии амплитудного анализатора по 3 пикам спектра излучения ^{131}I ($E_{\gamma}=284$ кэВ, 364 кэВ, 637 кэВ) и по пику спектра излучения ^{137}Cs (с энергией $E_{\gamma}=662$ кэВ) показала линейную зависимость между делениями шкалы анализатора и энергией регистрируемых гамма-квантов в широком диапазоне изменения напряжения $U_{\text{вых}}$.

Еще одним показателем, характеризующим эффективность работы прибора, являются потери счета в области больших активностей. На рис.4 представлена кривая просчетов для терапевтического канала радиометра. Нелинейное возрас-

тание скорости счета при увеличении активности в поле зрения терапевтического детектора обусловлено его внутренними свойствами - временем разрешения, а также высокой вероятностью регистрации одновременно двух и более гамма-квантов. Снижение же скорости счета из-за мертвого времени многоканального анализатора компенсируется настройками последнего - заданием времени экспози-

Таблица 1

Основные технические параметры каналов установки

Характеристики прибора	Каналы регистрации	
	диагностический	терапевтический
Размеры кристалла NaI (Тl), мм	∅ 40x40	∅ 25x25
Расстояние от кристалла до торца коллиматора, мм	50	255
Диапазон измерения активности, МБк	0,037÷3,7	3,7÷740
Энергетическое разрешение по гамма-линиям ¹³⁷ Cs, %	9	
¹³¹ I, %	11	11
Чувствительность, имп/(сек*Бк)	2,2x10 ⁻⁴	9,0 x10 ⁻⁶

ции по реальному и живому времени.

С целью уменьшения нагрузки измерительного тракта терапевтического канала в данной установке использовали, во-первых, менее чувствительный детектор (с малым эффективным сечением кристалла и небольшой толщиной) и конструкцию коллиматора с диафрагмой, частично перекрывающей входную поверхность сцинтиллятора. Снижение просчетов в области больших активностей также достигалось за счет минимального времени формирования фронта импульса ($\tau=1\text{мкс}$), которое позволяет устанавливать импульсный блок усиления (БУИ-ЗК). Это, во-вторых. В-третьих, геометрия измерений выбиралась таким образом, чтобы счет в поле зрения детектора в плоскости, перпендикулярной оси детектора, оставался практически неизменным, а потери счета на данном расстоянии не превышали 10%. Поэтому, измерения проводились на расстоянии от торца коллиматора до источника излучения, равном 30 см.

Методика определения активностей радионуклидов предполагает измерение во времени активности ¹³¹I, накопленной тканью ЩЖ. Для определения значений активностей радионуклидов, захватываемых ЩЖ, пользовались относительным методом – сравнением скорости счета гамма-квантов от человека со скоростью счета гамма-квантов от фантома ЩЖ, куда помещался источник известной активности. Поэтому вторая часть экспериментальных работ, проводимых на сконструированном приборе, включала в себя фантомные измерения. Чувствительность диагностического и терапевтического каналов

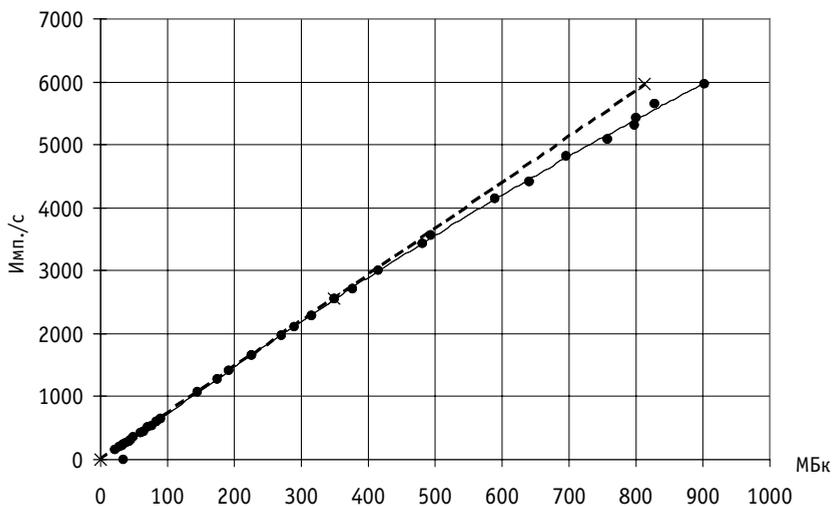


Рис. 4. Кривая просчетов терапевтического детектора

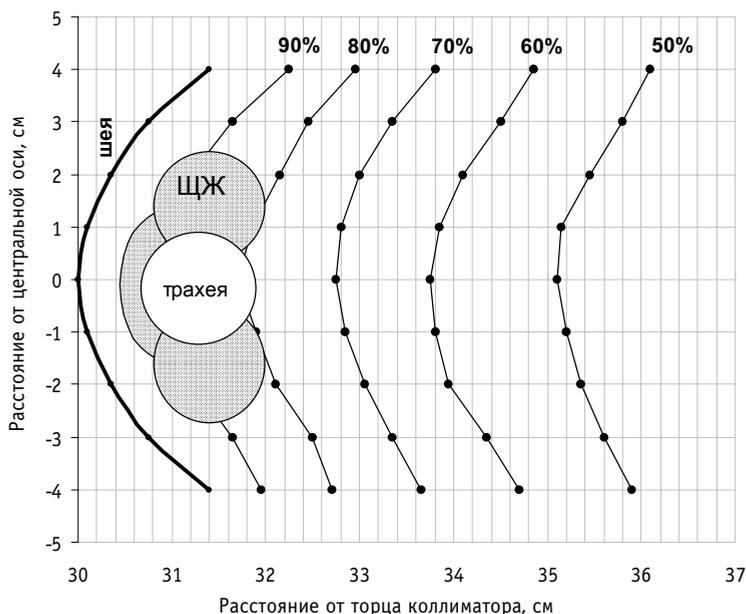


Рис. 5. Карта изосчетных зон терапевтического детектора

установки, определяемая как отношение скорости счета импульсов от фантома ЩЖ к активности этого же фантома, представлена в табл. 1.

В силу анатомических особенностей строения тела конкретного фантома, размеры и расположение ЩЖ могут отличаться от параметров стандартного фантома, имитирующего ЩЖ, было исследовано изменение скорости счета в рабочем поле зрения детекторов при удалении точечного источника от точки измерения, расположенной на расстоянии 30 см от торца коллиматора по оси детектора. Точечный источник ($Na^{131}I$) передвигался в горизонтальной плоскости, проходящей через ось детектора: по оси X откладывали удаление источника от оси детектора (что соответствовало ширине долей ЩЖ), а по оси Y – удаление по оси детектора (этим имитировали изменение глубины долей ЩЖ). Для получения данных, близких к клинической ситуации, карты изосчетных зон коллиматоров составляли в тканезквивалентной среде – воде. Согласно карте, которая представлена на рис.5, изменение скорости счета в пределах объема ЩЖ, обусловленное поглощением ионизирующего излучения в мягких тканях ЩЖ, не превышает 10-15 %. На рис. 5 также представлено схематическое изображение щитовидной железы, состоящей из двух долей и перешейка, прилегающего к трахее.

Погрешность методики измерения локализованных в ЩЖ активностей ^{131}I складывается из следующих составляющих:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{калибр}} + \delta_{\text{поглощ}}}$$

где $\delta_{\text{калибр}}$ – относительная погрешность калибровки прибора, 20%; $\delta_{\text{поглощ}}$ – относительная погрешность, связанная с изменением скорости счета в пределах ЩЖ, 15%.

Остальные погрешности ввиду малости их значений не принимались во внимание. В целом конечная погрешность методики измерения активностей ^{131}I в ЩЖ не превышает 25%.

ВЫВОДЫ

Создан прибор для измерения локализованных в ЩЖ диагностических и терапевтических активностей открытых радионуклидов ^{131}I , применяемых при радиойодтерапии

диффузного токсического зоба ЩЖ. Показано, что прибор удовлетворяет поставленным задачам - стабильно работает при больших нагрузках. Предложенная методика измерения накапливаемых ЩЖ активностей ^{131}I позволяет определять значения активностей радионуклидов с погрешностью не более 25%.

Литература

1. Алян А.С., Розиев Р.А. Применение ^{131}I для лечения диффузного токсического зоба // Известия вузов. Ядерная Энергетика. - 2000. - №2. - С. 127-133.
2. Приборы для радиоизотопной диагностики в медицине / Под редакцией Л.С. Горн - М.: Атомиздат, 1978.
3. Стандартизованные методики радиоизотопной диагностики: Методические рекомендации. - Обнинск, 1987.
4. Курочкин С.С. Системы КАМАК-ВЕКТОР. - М., 1981.
5. Bockish A., Jamitzky T., Derwanz R., Biersack H. Optimized dose planning of radioiodine therapy of benign thyroidal diseases // J. Nucl. Med. - 1993. - №34. - P. 1632-1638.
6. Денисенко О.Н., Иванов В.И., Дроздовский Б.Я., Ю.Н. Никулин и др. Техничко-методические аспекты клинической дозиметрии при радионуклидной терапии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 1990. - Т. 35. - №2. - С. 48-52.

Поступила в редакцию 9.07.2001

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 681.5:621.165

Electronic System of Erosion Forecasting of Turbine Rotor Blade of Nuclear Power Plants | K.V. Dergachev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 10 pages, 4 illustrations, 1 table. - References - 9 titles.

The structure, functional scheme and characteristics of calculating complex intended for prediction of erosion of NPP turbine rotor blade are considered in this paper.

УДК 681.332

Designing of Ultrasonic Defectoscop SK26 Core on the basis of Multiprocessor System | S.V. Michailov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 4 tables. - References - 5 titles

Method of the ultrasonic defectoscop SK26 core designing by way of multiprocessor system on the basis of digital signal processors ADSP-21XX has been presented. Local bus classification of multiprocessor system has been proposed.

УДК 621.039.586 : 536.42

Calculation Model of Pin Meltdown subject to Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident / G.N. Vlasichev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 6 illustrations, 1 table. - References, 10 titles.

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. Meltdown times of pin cladding and fuel on height of separate fuel pin, complete or partial blocking of the channel by a freezing material, and also repeated meltdown of the solidified layer are determined as a result of calculations. Testing of the developed programs of account of fuel pin melting and molten cladding moving TRAMS-TWEL and MOTE according to numerical results of techniques similar used in given programs is executed. The accounts of fuel pin cladding melting, cladding melt moving and freezing in not heated sections, taking place above and below active part of FFTF pin, and also in the most active part are executed. As a whole, received as a result of accounts a configuration, the lengths of layers from the solidified steel are higher and below heated site satisfactorily correspond to the data of R-5 experiment on TREAT reactor.

УДК 621.311:621.039

Temporary Closing-down of Condensate-feed Channel and Steam Generators of Power Units with the using of Octadecylamine | E.B. Gromov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 3 tables. - References - 4 titles.

Results of development, improvement and assay of technology of the temporary closing-down of heat-and-power engineering equipment with using of film-forming amines and, in particular, octadecylamine

УДК 621.039.519

Measurement of radionuclide yields produced in 2.6 GeV proton irradiated nat-W | Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, B.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, C.V. Kvasova, D.V. Fischenko; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 13 pages, 2 illustrations, 2 table. - References - 23 titles.

Radionuclide yields are measured in natural tungsten thin target irradiated with 2.6 GeV protons. The measurements were carried out using direct gamma-spectrometry of samples irradiated via U10 ITEP synchrotron. In total, 129 yields were defined, including 10 independent, 9 independent

metastable, 6 summed independent metastable plus ground, and 104 cumulative yields of radionuclide products. The experimental data were compared with theoretical yields predicted via 7 simulation codes: CEM95, CEM2k, LAHET, CASCADE, HETC, INUCL, YIELDX. Results are analyzed from a point of formation of secondary products that may be of large ecological and technological hazard.

УДК 621.039.51

Ballslayer as a core for the fast reactor \G.B. Usynin, S.G. Usynina; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 6 illustrations, 2 tables. - References - 5 titles.

The analysis of pebbly bed conception for the fast reactor is carried out. Balls medley from plutonium oxide and depleted uranium carbide are considered. The neutronic and hydraulic characteristics of such core is given. The opportunities deep burnout of heavy nuclei are discussed in the paper.

УДК 502.3

Geoinformation System of Radioactive Contaminated Territories \B.I. Yatsalo I.A. Pichugina, G.V. Kozmin, O.A. Mirzeabassov, I.V. Okhrimenko, M.F. Kanevsky, E.A. Savelieva; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 5 pages, 2 illustrations, 1 table. - References - 8 titles.

Description of Geographic Information System as a part of the Decision Support System PRANA for rehabilitation of radioactive contaminated territory of Bryansk region is presented. Developed vector electronic maps and databases of attributive information are pointed out.

УДК 621.039.75

Immobilization of Radioactive Waste in Ceramet Materials by the Method of Self-propagating High Temperature Synthesis \E.N. Ilyin, I.Yu. Pashkeev, A.V. Senin; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 9 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References - 7 titles.

For the immobilization of solid high-level waste (HLW) to use self-propagating high temperature synthesis (SPHTS) is proposed, which allowing to raise the temperature of the reaction mixture from 1500 to 4000°C due to the heat-evolution of the chemical reactions. As a initial reaction mixture thermite mixture Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al, SiO_2 , CaO, Na_2O and CeO_2 , which imitating composition of HLW is being considered. As a result of SPHTS, ceramet block is formed. Ceramet block consist of corrosion-proof iron-chromium metal matrix and ceramic matrix based on aluminates, silicates and alumosilicates. The estimation of chemical resistance of material-immobilizators, obtained by means of leaching in water has revealed their preference for the conventional borosilicate glass.

УДК 532.529

Analysis of the MAGICO and QUEOS experiments on the premixing of the clouds of particles with water with the VAPEX code \M.V. Davydov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, I.V. Parfenov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 3 tables, 7 illustrations. - References, 4 titles.

The objective of the investigation was to simulate the MAGICO and QUEOS experiments devoted to the study of the melt-water premixing with the thermohydraulic code VAPEX developed at the EREC VNIIAES. The behavior of the melt drops cloud was simulated in the MAGICO and QUEOS experiments by the cloud of the metal spheres, mixing with the water under gravitational force. Both, the experiments with cold and hot particles were considered. The integral parameters, such as the velocity of the leading edge of the cloud, the mixture level dynamic, the rate of the vaporization and local values of the void fraction were compared with the experimental results. Generally, the calculation results are in a reasonable agreement with the experimental ones.

УДК 621.039.517

Relap5 Modeling of the NPP VVER-1000 Steam Generator \S.A. Rouhanifard, A.A. Kazantsev, V.V. Sergeev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 13 illustrations, 3 tables. - References - 7 titles.

This paper deals with the application of primary to secondary heat transfer and secondary coolant vaporization process in the WWER-1000 Steam Generator for the Nuclear Power Plant. The RELAP5/MOD3.2 computer code is used for simulation of hydrodynamic and thermal parameters of the horizontal Steam Generator with U-tube heating surface. The results of steady state and natural circulation of computational analysis are presented and compared with known Steam Generator data.

УДК 543.52+615.849

Development of Technicmethodical Means for Radiometric Investigations and Dosimetric Design of Radioiodine Therapy \ Yu. M. Bakun, A. S. Aryan, N. N. Lyannoy, E. S. Matusevich, N. G. Shishkanov, R. A. Roziev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 7 pages, 5 illustrations, 1 table. - References - 6 titles.

The measuring tracer and treatment radionuclide (^{131}I) activities device and method to ensure reliable and high accuracy of measuring results of iodine activity in the thyroid in courses of tracer research and therapy is presented in this paper.

НАШИ АВТОРЫ

Апян А.С. – аспирантка кафедры ядерной физики Обнинского института атомной энергетики (ОИАТЭ). Закончила ОИАТЭ в 1998. Область научных интересов: медицинская физика.

Бакун Ю.М. – аспирантка кафедры ядерной физики ОИАТЭ.

Власичев Г.Н. – к.т.н., ведущий научный сотрудник кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» физико-технического факультета Нижегородского государственного технического университета. Область научных интересов: тяжелые аварии с расплавлением активной зоны ядерного реактора, тепло- и массообмен.

Давыдов М.В. – научный сотрудник Электрогорского научно-исследовательского центра по безопасности атомных электростанций.

Дергачев К.В. – аспирант Брянского государственного технического университета.

Ильин Е.Н. – инженер кафедры физической химии Южно-Уральского государственного университета.

Казанцев А.А. – к.т.н., доцент. В 1981 г. окончил ОФ МИФИ. Занимается разработкой моделей основного технологического оборудования и моделированием двухфазных потоков для тренажеров АЭС. В настоящее время работает с.н.с. в ЭНИМЦ «Моделирующие системы».

Лянной Н.Н. – заведующий лабораториями кафедры ядерной физики, ОИАТЭ. Область научных интересов: радиометрия и дозиметрия

Матусевич Е.С. – д.ф.-м.н., профессор ОИАТЭ, в 1956 г. закончил Ленинградский политехнический институт. Область научных интересов: экспериментальная реакторная физика, физические методы анализа радиационных загрязнений.

Мелихов В.И. – к.ф.-м.н., начальник лаборатории вычислительной гидродинамики Электрогорского научно-исследовательского

центра по безопасности атомных электростанций.

Мелихов О.И. – д.ф.-м.н., начальник теплофизического отделения Электрогорского научно-исследовательского центра по безопасности атомных электростанций.

Михайлов С.В. – ст. преподаватель кафедры «Компьютерные сети, системы и технологии» ОИАТЭ, закончил ОИАТЭ в 1998 г. Область научных интересов: многопроцессорные системы высокой производительности.

Парфенов Ю.В. – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Электрогорского научно-исследовательского центра по безопасности атомных электростанций.

Пашкеев И.Ю. – к.т.н., доцент кафедры физической химии Южно-Уральского государственного университета.

Розиев Р.А. – к.м.н., с.н.с. Медицинского радиологического научного центра Российской Академии медицинских наук, директор НПП «Медбиофарм». В 1984 году закончил Киргизский Государственный медицинский институт. Область научных интересов: заболевания щитовидной железы, радионуклидная терапия, радиофармацевтика

Сенин А.В. – к.х.н., доцент кафедры физической химии Южно-Уральского государственного университета.

Сергеев В.В. – к.т.н., с.н.с. Государственного научного центра Российской Федерации – Физико-энергетического института (ГНЦ РФ-ФЭИ). В 1980 г. окончил ОФ МИФИ. Область научных интересов: интегральное моделирование процессов тепломассопереноса в контурах ЯЭУ.

Шишканов Н.Г. – н.с. Медицинского радиологического научного центра Российской Академии медицинских наук.

OUR AUTHORS

Apyan A.S. – post-graduated student in the nuclear physics department of the Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering (OINPE), graduated from the OINPE in 1998. Scientific interests: medical physics.

Bakun Yu.M. – post-graduated student in the nuclear physics department of the OINPE.

Davydov M.V. – researcher of the Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP safety.

Dergachev K.V. – postgraduate student of the Bryansk State Technical University.

Ilyin E.N. – engineer of physical-chemistry department of the South-Ural State University

Kazantsev A.A. – Cand.Sci.(Engineering), associated professor. Graduated from the Obninsk branch of Moscow Engineering Physics Institute in 1981. Engaged in the modeling of main engineering equipment and simulation of two phase flows for NPP simulators. Now works in “Simulation System Ltd.” as Senior researcher.

Lyannoy N.N. – head of nuclear physic department laboratories of the OINPE. Scientific interests: radiometry and dozimetry.

Matusevich E.S. – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the OINPE, graduated from the Leningrad Polytechnical Institute in 1956. Scientific interests: experimental reactor physics, physical methods of radioactive contamination analysis.

Melikhov O.I. – Dr.Sci.(Phys.-Math.), head of thermohydraulic division of the Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP safety.

Melikhov V.I. – Cand.Sci.(Phys.-Math.), head of computational fluid dynamics laboratory of the Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP safety.

Michailov S.V. – senior lecture of the computer nets, system and technology department of the

Obninsk INPE, graduated from the OINPE in 1998. Scientific interest: high-speed multiprocessor systems.

Parfenov I.V. – Cand.Sci.(Phys.-Math.), senior scientist of the Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP safety.

Pashkeev I.Yu. – Cand.Sci.(Engineering), associated professor of the physical-chemistry department of the South-Ural State University

Roziev R.A. – Cand.Sci. (Med.), senior researcher of the radiosurgical treatment using unsealed radionuclides of Medical Radiological Research Center RAMS, director of RPE “Medbiopharm”. Graduated from Kirghiz State Medical Institute in 1984. Scientific interests: thyroid diseases, radionuclide therapy, radiopharmaceutics.

Senin A.V. – Cand.Sci.(Chemistry), associated professor of physical-chemistry department of the South-Ural State University.

Sergeev V.V. – Cand.Sci.(Engineering), senior researcher of the State Scientific Centre of Russian Federation – Institute of Physics and Power Engineering (SSC RF-IPPE). Graduated from the Obninsk branch of Moscow Engineering Physics Institute in 1980. Candidate of Engineering. Engaged in the integral modeling of heat and mass transfer processes in the circuits of NPP.

Shishkanov N.G. – senior researcher of the Medical Radiological Research Center Russian Academy of Medical Sciences.

Vlasichev G.N. – Cand.Sci. (Engineering), leading researcher of the Nuclear Reactors and Power Plants Chair, Physical-Technical Department, Nizhny Novgorod State Technical University. Scientific interests: severe accidents with nuclear reactors core meltdown, heat- and mass-transfer.