

## CFD-РАСЧЕТЫ В ОБОСНОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МЕДИЦИНСКОГО РЕАКТОРА МАРС

**А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян**

*ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск*



Специализированный медицинский реактор МАРС предназначен для нейтронозахватной терапии. Представлены результаты вычислений полного гидравлического сопротивления реактора МАРС между входным и выходным патрубками, полученные с использованием CFD-кода для интервала расходов. Представлен расчет аварии с выбросом одного стержня управления из реактора. Переходный процесс аварии был рассчитан до достижения нового безопасного устойчивого состояния.

**Ключевые слова:** теплофизическое обоснование безопасности реактора; медицинский реактор МАРС; вычислительная гидродинамика; OpenFOAM; пакет с открытым исходным кодом; сопряженный теплообмен; решатель chtMultiRegionFoam.

**Keywords:** safety analysis of reactor; medical reactor MARS; Neutron capture therapy; CFD (Computational Fluid Dynamic); OpenFOAM (Open source File Operation And Manipulation); conjugated heat transfer; Solver chtMultiRegionFoam.

В соответствии с перечнем перспективных научных исследований и критических технологий, сформулированных Министерством науки и образования Российской Федерации, ядерные технологии в настоящий момент имеют приоритетное значение.

В настоящее время существует ежегодная потребность лечения 50-ти тысяч онкологических больных методами лучевой терапии, в то время как имеющиеся мощности позволяют лечить не более двух тысяч больных в год. Имеются две разновидности лучевой нейтронной терапии: нейтронозахватная терапия (НЗТ) и нейтроносоударная терапия (НСТ). Выживаемость при лучевой терапии составляет порядка 5% спустя пять лет после лечения, а при лечении методом НЗТ выживаемость – от 30 до 40% (по сообщению С.Е. Ульяненко, МРНЦ РАМН). Методом НЗТ за счет введения боросодержащих препаратов возможно использование эффекта резонансного поглощения тепловых нейтронов в больных тканях, что позволяет получить максимальный терапевтический эффект при минимальном вреде для окружающих здоровых тканей и критических органов с высокой чувствительностью к излучению [1,4].

В работах группы под руководством Ю.А. Казанского решены оптимизационная нейтронно-физическая и дозиметрическая задачи по выбору параметров медицинского реактора, коллимационного устройства и фильтров с целью получения наилучшего терапевтического эффекта с учетом ограничения времени облучения пациента и минимизации мощности реактора [2, 3, 5, 6].

Высокая эффективность нейтронозахватной терапии обеспечивается двумя компонентами. Первый компонент – туморотропный препарат, доставляющий в опухолевую клетку химический элемент (например, бор-10) с высоким (резонансным) сечением захвата эпитепловых нейтронов, и второй компонент – система фильтров, дающая оптимизированный по спектру пучок нейтронов.

В настоящее время для нейтронозахватной терапии приспособляются многоцелевые исследовательские реакторы, расположенные вдали от клиник; необходима транспортировка тяжелых больных от клиники до реактора. Медикам важно, чтобы установка располагалась на площадке клиники, что удовлетворяло бы всем медицинским требованиям и требованиям ядерной, радиационной и экологической безопасности. В настоящее время лучевая терапия является одним из многих инструментов современной медицины, компонентом пакета медицинских услуг.

Для этого проект специализированного медицинского реактора MAPC должен быть таким, чтобы при любых обстоятельствах его конструкция за счет естественных причин не допускала бы возникновения аварии с выбросом радиоактивности и иных исходных событий, приводящих к последующему облучению персонала и населения. За счет малой мощности и импульсного режима работы реактора в нем практически не накапливаются продукты деления, поэтому в любых проектных и запроектных авариях полностью исключаются выбросы активности, превышающие допустимые уровни, включая полное разрушение реактора в случае гипотетического террористического акта.

Предметом исследования является проблема математического моделирования нестационарного трехмерного турбулентного теплопереноса при выполнении расчетов кодом вычислительной гидродинамики в объеме, необходимом для обоснования безопасности реакторов.

В работе представлены результаты моделирования процессов теплообмена в новом медицинском специализированном реакторе, выполненные на стадии предпроектных проработок в целях обоснования безопасности РУ MAPC. Они являются частью совместной работы многих групп экспертов.

Эта работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Тематика исследований находится в русле приоритетных направлений науки технологий и техники РФ (от 21.05.06 пункт «Безопасность атомной энергетики»).

Конструкция и уникальность параметров реактора обусловлены следующими положениями:

- 1) обеспечение медицинских требований к нейтронным пучкам в полном объеме;
- 2) возможность установки на площадке клиники и эксплуатации при минимуме затрат и минимальном штате;
- 3) принципиальная невозможность аварии, приводящей к необходимости эвакуации персонала клиники и больных;
- 4) не выходящее за пределы установленных норм воздействие на население при максимальной аварии любого масштаба.

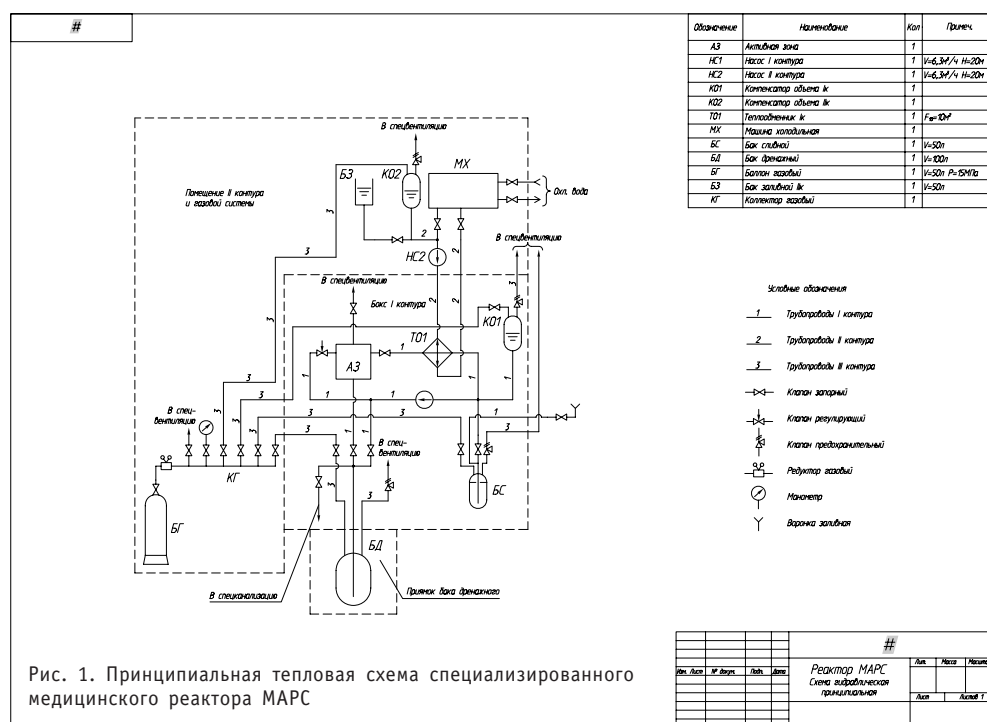
Все перечисленные выше положения обуславливают актуальность реактора MAPC с точки зрения безопасности.

В конструкции установки используются детали и материалы, которые уже давно применяются в реакторных установках, но при более высоких параметрах эксплуатации, что обеспечивает большие (более чем десятикратные) запасы и повышенную надежность реакторной установки. С технологической и экономической точек зрения очень важно, что оборудование, материалы и топливо, принятые в проекте, в настоящее время выпускаются промышленностью.

РУ МАРС имеет ряд особенностей, которые обеспечивают безопасность установки и возможность расположения в клинике:

- низкая мощность во время работы (не более 10 кВт) и старт-стопный режим эксплуатации обеспечивают минимально возможную активность топлива и гарантируют непревышение требуемых нормативами уровней радиации при любой возможной аварии;
- минимальные изменения технологических параметров при любых режимах реактора обеспечивают его работу в течение 20-ти лет с запасом реактивности не более 0,7 от доли запаздывающих нейтронов  $\beta$ , что исключает физическую возможность каких-либо реактивных аварий;
- низкий средний годовой уровень мощности (менее 700 Вт) и соответственно низкая активность продуктов деления в активной зоне;
- отрицательность всех коэффициентов реактивности во всех режимах работы;
- низкий подогрев теплоносителя около 2,5°C, практическое отсутствие аккумулированного тепла в конструкциях реактора.

Принципиальная тепловая схема медицинской реакторной установки МАРС приведена на рис. 1.



### Основные характеристики реактора:

- уран-водный реактор малого размера и критического радиуса 176×435×550 мм;
- мощность порядка 10 кВт (одна загрузка на весь срок работы);
- оптимальная доля воды в активной зоне 78% (большой относительный шаг между твэлами) ;
- твэл – аналог твэла БН-600 с обогащением по U-235 17%;
- давление в корпусе реактора ~ 0.15 МПа;
- максимальная температура стенки твэла не более 100°C, отсутствие кипения в номинальном и большинстве аварийных режимов (что позволило успешно использовать CFD-код);

- Для теплового расчета РУ МАРС (рис. 2) использовались проектные данные при ее работе на номинальной мощности. Тепловая мощность реактора  $Q = 10$  кВт. Расход теплоносителя первого контура  $G_f = 1.0$  кг/с. Температура теплоносителя на входе в реактор  $t_f = 24^\circ\text{C}$ .



Для решения задачи моделирования теплогидравлических процессов в корпусе и активной зоне реакторной установки (РУ) был выбран код OpenFOAM [7,8]. Так как в коде OpenFoam в сопряженном решателе chtMultiRegionFOAM не имелось стандартных свойств воды, в код была добавлена библиотека MCF [9], в которой для свойств воды используется международный стандарт IF-97 [10].

Математическая постановка задачи, система уравнений и замыкающие соотношения приведены в [11]. Проведено тестирование кода, часть результатов которого представлены в двух статьях авторов [11,12].

С использованием OpenFoam версии 1.6 [7,8] и модифицированного авторами расчетного модуля (называемого решателем), получившего название *vagChtMultiRegionFOAM*, были выполнены вариантыные расчеты для исследования полного сопротивления между входным и выходным патрубками активной зоны МАРС при изменении расхода в первом контуре. Обработка всей серии расчетов дана на рис. 3. Получены обобщающие расчеты формулы.

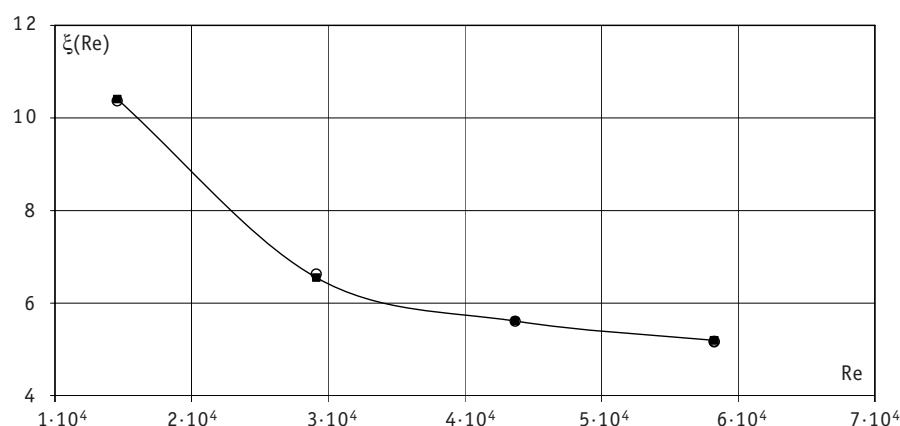


Рис. 3. Результаты серии расчетов при изменении расхода через корпус реактора МАРС, обобщенные в виде зависимости  $\xi(Re)$  коэффициента сопротивления корпуса реактора от числа  $Re$ :  $\circ$  –  $\xi$ ;  $\blacksquare$  – формула

Для номинального режима задавалось энерговыделение во всех твэлах реактора, причем удельное энерговыделение получено из нейтронно-физических расчетов [6]. Постпроцессор OpenFOAM для сопряженной задачи теплообмена обрабатывает отдельно теплоноситель и твердые конструкции корпуса. На рисунке 4 представлено поле давления в корпусе реактора МАРС. Показан водный объем активной зоны РУ МАРС и часть входного и выходного патрубков. Моделирование проводилось с учетом детальных особенностей конструкции корпуса, всех твэлов (384 шт.) и четырех различных по диаметру стержней СКУЗ. Дистанционирование коротких твэлов беспроволочное – при помощи верхней и нижней плит.

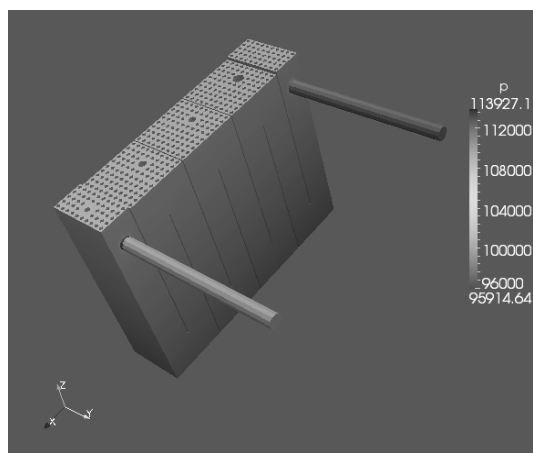


Рис. 4. Поле давления [Па] в теплоносителе внутри корпуса реактора МАРС (расчет при номинальном расходе через корпус)

Активная зона имеет большой относительный шаг расположения твэлов в коридорном пучке, равный двум.

При обработке результатов определяющими величинами приняты средняя скорость на входе во входной патрубок и диаметр патрубков на входе и выходе из корпуса реактора.

Обобщение серии расчетов в интервале чисел  $Re = 1,46E+4 - 5,82E+4$  выражено формулой

$$\xi(Re) = \exp(13499/Re + 1.4156). \quad (1)$$

Среднеквадратичная погрешность 1,76%. Максимальное отклонение 7,48%.

Более точное описание серии экспериментальных данных дает несколько более громоздкая формула

$$\xi(Re) = \frac{1}{0,084611 \cdot \ln(Re) - 6,26E - 12 \cdot Re^2 - 0,71352}. \quad (2)$$

Среднеквадратичная погрешность 0,231%. Максимальное отклонение 0,727%.

На рисунке 5 представлено температурное поле оболочек твэлов. Видно, что сложная гидродинамика течения внутри корпуса реактора приводит к появлению ряда периодических неравномерностей поля температуры. Балансный подогрев в реакторе с высокой точностью совпадает с расчетным значением.

Неравномерности температурного поля температур объясняется особенностями

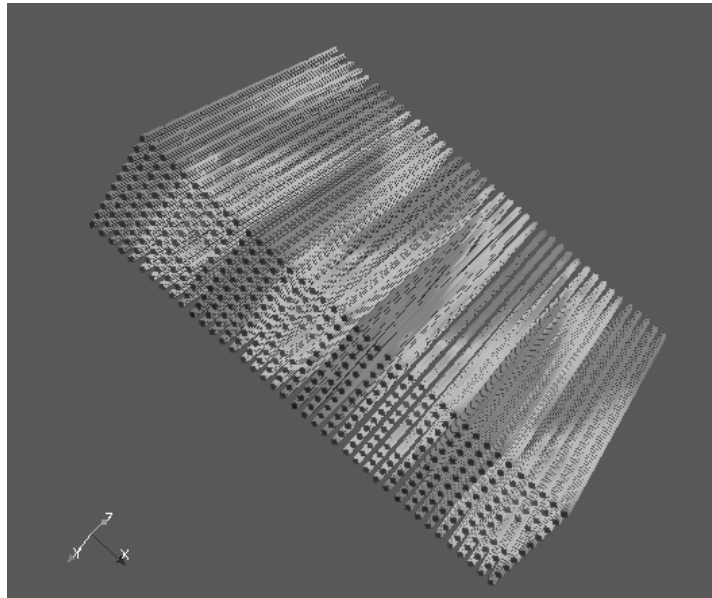


Рис. 5. Температурные поля оболочек твэлов реактора MAPS

ми поля полной скорости. Течение имеет достаточно сложный характер.

Принятая сопряженная постановка позволяет рассчитывать некоторые аварийные режимы (без кипения) из списка исходных событий для обоснования безопасности реакторов. Используются результаты нейтронно-физических расчетов в виде тепловой мощности реактора (для групп твэлов).

В уравнение энергии сопряженного решателя chtMultiRegionFoam добавлен источник энергии, удельное энерговыделение было получено в результате нейтронно-физических расчетов [6]. На рисунке 6 представлено температурное поле при расчете аварии с выбросом самого тяжелого стержня системы управления реактором.

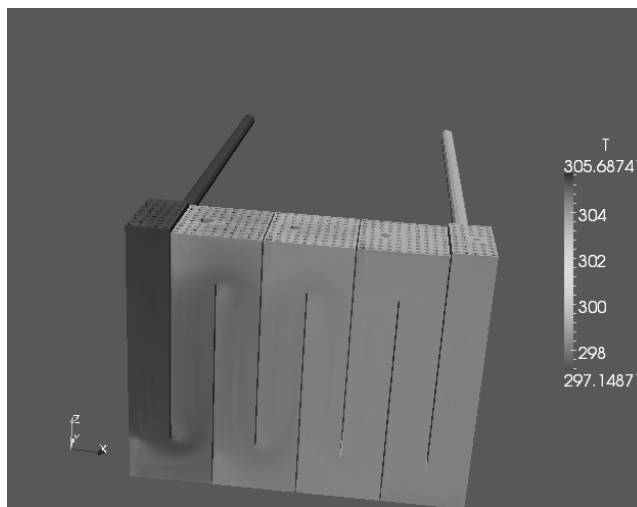


Рис. 6. Расчетное поле температур в переходном процессе в гипотетической аварии с выбросом стержня регулирования из медицинского реактора MAPC

В активной зоне реактора MAPC имеется четыре стержня СУЗ; выброс одного регулирующего стержня приводит к переходному процессу в реакторе, в финале которого все отрицательные обратные связи останавливают рост реактивности на новом стабилизированном уровне мощности в 4,25 раза больше номинального. Поскольку номинальный подогрев в реакторе невелик (2,5 градуса), то оказалось, что новое устойчивое состояние реактора достигается при подогреве около 10,6°C, что согласуется с результатами расчета температурного поля кодом OpenFOAM (рис. 6). При решении динамической задачи температура на стенках не достигала линии насыщения во всем переходном процессе с большим запасом.

## ВЫВОДЫ

Все представленные расчеты сопряженных задач теплообмена и гидродинамики были выполнены с помощью кода OpenFOAM. Потребовалось ввести две модификации решателя для сопряженного теплообмена кода OpenFOAM. Добавлен источник компонент уравнения энергии для тепловыделения в твердом теле, а также введены свойства стандартной воды, в результате получен новый решатель `vagChtMultiRegionFOAM`. Решатель тестировался для разных теплоносителей, включая имеющиеся в библиотеке MCF [9] воздух, воду, натрий, свинцово-висмутовый сплав. Лицензия GNU открытого кода (в отличие от коммерческих кодов) позволяет решать задачи в новой постановке, которые всегда возникают при проектировании новых ЯЭУ.

Для специализированного медицинского реактора MAPC выполнен цикл расчетов полного гидравлического сопротивления между входным и выходным патрубками для интервала расходов. Результаты расчетов обобщены в виде простых инженерных формул.

Представлены расчеты аварии с выбросом одного стержня управления из реактора. Вследствие отрицательных коэффициентов реактивности аварийный процесс заканчивается достижением нового безопасного устойчивого стабилизированного состояния, при этом достигнутый при аварии уровень температуры воды составил 35°C.

Полученные с использованием модифицированного CFD-кода OpenFOAM результаты подтверждают правильность принятых конструкторских решений в проекте



реактора МАРС и возможность применения CFD-кода OpenFOAM для решения некоторых задач, возникающих при обосновании безопасности ЯЭУ.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$Q$  – тепловая мощность реактора;  $\beta$  – доля запаздывающих нейтронов;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $Re$  – число Рейнольдса;  $t_f$  – средние значения температуры воды первого контура на входе в реактор;  $G_f$  – массовый расход теплоносителя первого контура.

CFD (Computation Fluid Dynamic) – вычислительная гидродинамика; MCF (Models Constructor Framework) – открытый набор библиотек для OpenFOAM [9]; OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation [8]) – зарегистрированная торговая марка компании OpenCFD Ltd.

АЗ – активная зона; АС, АЭС – атомная электростанция; БН-600 – быстрый натриевый реактор 600 МВт; МРНЦ РАМН – Медицинский радиологический научный центр Российской Академии медицинских наук (бывший ИМР – Институт медицинской радиологии); МАРС – проект реактора для НЗТ и НСТ; НЗТ – нейтронозахватная терапия; НСТ – нейтроноударная терапия; РУ – реакторная установка; СКУЗ – система контроля управления и защиты; ЭНИМЦ «МС» – Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы».

## Литература

1. Цыба Ф., Ульянов С.Е., Мардынский Ю.С. и др. Нейтроны в лечении злокачественных новообразований: Научно-методическое пособие. – Обнинск: БИСТ, 2003. – 112 с.
2. Левченко В.А. Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор МАРС/В.А. Левченко, И.П. Балакин, В.А. Белугин, С.Л. Дорохович, Ю.А. Казанский, Ю.А. Кураченко, А.В. Левченко, Е.С. Матусевич, И. Ронен, А.А. Уваров, Ю.С. Юрьев//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 72-82.
3. Кураченко Ю.А. Вывод нейтронных пучков и защита медицинского реактора МАРС/Ю.А. Кураченко, Ю.А. Казанский, А.В. Левченко, Е.С. Матусевич//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 36-48.
4. Гулидов И.А., Мардынский Ю.С., Цыба Ф., Сысоев А.С. Нейтроны ядерных реакторов в лечении злокачественных новообразований. – Обнинск: МРНЦ РАМН, 2001. – 132 с.
5. Кураченко Ю. А. Реакторные пучки для лучевой терапии: дис. на соискание уч. ст. д-ра физ.-мат. наук: 26.12.05 Обнинск, 2008. – 344 с.
6. Левченко А.В. Выбор топливной композиции для специализированного медицинского реактора/А.В. Левченко, В.А. Баршевцев, Ю.А. Казанский//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 113-120.
7. OpenFOAM User Guide Version 1.6. 2009.
8. OpenFOAM – [www.open CFD.co.uk](http://www.open CFD.co.uk) (дата обращения: 25.06.2010).
9. [www.os-cfd.ru](http://www.os-cfd.ru) (дата обращения: 22.06.2010).
10. Александров А.А. Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. Службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98 М.: Издательство МЭИ. 1999. 168 с.
11. Казанцев А.А. Тестирование CFD кода OpenFOAM/А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010 (в печати).
12. Казанцев А.А. Моделирование 3D-течения CFD-кодом OpenFOAM/А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010 (в печати).

Поступила в редакцию 23.06.2010



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.548

*The System of Irradiated Fuel Elements Nondestructive Examination for Inspection and Reconstitution Stand of WWER Assemblies* \S.V. Pavlov, S.S. Sagalov, S.V. Amosov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 8 illustrations. – References, 6 titles.

The description of the nondestructive diagnostic system of irradiated fuel elements, enclosed to inspection and reconstitution stand of WWER-1000 assemblies, is presented. Principles, as well as technique and programmable realization of ultrasound leakage test and pulsed eddy current defectoscopy of fuel elements are considered.

### УДК 621.039.58

*Probability Estimation of Hydrogen Ignition and Detonation in the Containment Vessel* \Yu.S. Yur'ev, N.M. Vitushkina, A.A. Zaitsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The Shapiro diagram is used for finding of ignition and detonation areas of hydrogen mixtures. The area boundaries and process trajectory are presented as the bands instead of the lines. This approach enables to determine the probability of these processes during the hydrogen filling of the containment vessel.

### УДК 621.039.51

*The Use of Supercritical Water Reactors in a Close Fuel Cycle* \Yu.D. Baranaev, A.P. Glebov, A.V. Klushin, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 7 titles.

Specifics of neutronics, thermal hydraulics and construction of the supercritical water reactors with thermal and fast neutron spectrum were investigated.

It is proved that reactors with thermal spectrum have conversion ratio about  $CR \approx 0,7$  and that natural Uranium consumption in such a reactors could be decreased about 2 times (compared convention WWER-1000).

In the reactor with a fast spectrum this ratio is rather higher and will be reach to  $CR = 0,9-0,95$ . So, supercritical water reactor can operate by fuel self supply and future nuclear electricity power become more effective. The Thorium can be used in a supercritical water reactors with thermal and fast spectrum as in a Plutonium-Thorium or Uranium-Thorium fuel cycles without any fuel element construction changes. The problems of nuclear safety and fuel efficiency can be also solved in these fuel cycles.

### УДК 621.039.534

*Thermal Hydraulic Calculation of Medical Reactor MARS* \A.A. Kazantsev, V.R. Anisovyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 12 titles.

The specialized medical reactor MARS is under design for neutron-capture therapy. Results of calculations of total hydraulic resistance of a reactor MARS between inlet and outlet pipes by CFD- code are presented for range of flow rates. Calculation of the accident with removing of one control rod from reactor is presented. Accident transient was calculated up to new safe steady state condition.

### УДК 621.039.51

*Principal Physical Advantages from Applying Radiogenic Lead as a Coolant of Nuclear Reactors* \G.G. Kulikov, A.N. Shmelev, V.A. Apse, V.V. Artisyuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 16 titles.

The paper presents preliminary analysis of some advantages, which could be attained from the use of radiogenic lead, i.e. lead extracted from uranium and thorium ores, as a coolant of power nuclear reactors. The paper highlights that radiogenic lead can be used to improve operation safety and intensify breeding fuel. In addition, nuclear reactors cooled by radiogenic lead could be successfully used for hydrogen (or some other artificial fuel types) production, for generation of high-temperature technological heat and for neutron transmutation of radioactive wastes with low neutron capture cross-sections.