

ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ТОРИЙСОДЕРЖАЩИХ РАЗМНОЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЕМ ОТНОШЕНИЯ ОБЪЕМОВ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ И ТОПЛИВА

И.В. Шаманин, А.В. Годовых, П.А. Селезнев

Томский политехнический университет, г. Томск



Приведены результаты численных экспериментов, определяющие границы области значений отношения $V_{\text{зам}}/V_{\text{топ}}$ (объем замедлителя/объем топлива), в которой наблюдается аномалия в ходе зависимости резонансного поглощения. Ее существование доказывает физические преимущества Th^{232} по сравнению с U^{238} в случае использования в качестве воспроизводящего материала в составе ядерного топлива при определенных значениях отношения $V_{\text{зам}}/V_{\text{топ}}$.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Концепции торий-уранового ядерного топливного цикла уже несколько десятков лет. Потеря интереса к ней практически на старте исследований вызвана двумя причинами:

- высокой радиоактивностью ториевого концентрата, которая обусловлена наличием в нем изотопа Th^{228} и цепочкой радиоактивных превращений, начинающейся с него;
- образованием изотопа U^{232} при облучении торийсодержащего топлива, наличие которого в облученном топливе также является началом цепочки радиоактивных превращений, в ходе которых образуются «жесткие» гамма-излучатели.

Сам же сырьевой изотоп Th^{232} , из которого образуется делящийся U^{233} , не представляет большой радиологической опасности. Он альфа-активен, но период его полураспада (α -распад) составляет 13,9 миллиардов лет [1]. Возраст планеты Земля в настоящее время считается равным около 4,5 миллиардов лет, если основываться на скоростях радиоактивного распада урана и тория [2]. Период полураспада U^{238} , играющего определяющую роль в уран-плутониевом ядерном топливном цикле, составляет 4,47 миллиарда лет [1], т.е. его значение близко к возрасту Земли, а значение периода полураспада Th^{232} значительно превосходит возраст Земли. Вообще говоря, торий – один из немногих радиоактивных элементов, открытых задолго до появления самого понятия «радиоактивность». Обнаружил оксид тория Берцелиус, исследуя редкий минерал, который теперь называют торитом

(ThSiO_4). Торит содержит до 77% оксида тория ThO_2 . По сравнению с очень многими актиноидами и с учетом выше отмеченного Th^{232} можно считать практически стабильным, что объясняет тот факт, что его содержание в земной коре в 5 раз больше, чем урана.

Возобновление интереса к использованию тория в ядерном топливном цикле вызвано двумя причинами:

- беспокойством за стабильность сырьевой базы ядерной энергетики [3] и необходимостью утилизации значительных излишков урана и плутония, имеющих «оружейную кондицию» [4, 5];
- обнаружением серьезных преимуществ Th^{232} по сравнению с U^{238} при их использовании в традиционном качестве – как воспроизводящих нуклидов в ядерном топливном цикле. Эти преимущества обусловлены особенностями и отличиями их ядерно-физических свойств на уровне элементарных процессов взаимодействия нейтронов с их ядрами [6].

Было обнаружено, что структура резонансной области в зависимости сечения поглощения нейтронов от энергии последних для сырьевого четно-четного нуклида Th^{232} обеспечивает ему неоспоримые преимущества по сравнению с U^{238} в части обеспечения безопасности ядерных реакторов на тепловых нейтронах, топливом которых являются торийсодержащие композиции. Преимущества обусловлены тем, что торий как резонансный поглотитель обеспечивает большие значения отрицательных температурных коэффициентов реактивности и позволяет пересмотреть привычные и общепринятые подходы при конструировании тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок ядерных реакторов. В частности, возможность увеличения отношения объема замедлителя к объему топлива создает предпосылки для создания активных зон, тепловая инерция которых значительно выше привычных значений. Большая тепловая инерция кроме повышения безопасности активной зоны в теплотехническом отношении нивелирует действие быстрого положительного мощностного эффекта реактивности при резких сбросах нейтронной мощности. Ядерные реакторы с топливом, в состав которого входит Th^{232} как сырьевой нуклид, являются более безопасными по сравнению с реакторами, активная зона которых загружена урановым топливом.

Требуются практически значимые результаты, которые позволяют перейти к рассмотрению физики размножающих систем с конкретным материальным составом и геометрическими параметрами составляющих их элементов периодичности.

В настоящей работе приведены результаты численных экспериментов, выполненных с целью определения материальных и геометрических параметров структуры размножающей среды, сочетание которых обеспечивает возможность создания тепловыделяющих элементов ядерных реакторов повышенной безопасности.

ПОСТАНОВКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Моноэнергетический поток нейтронов с энергией 4,65 кэВ, что соответствует верхней границе интервала энергий, в котором находятся сильные резонансы как для U^{238} , так и для Th^{232} , падает на многослойную систему: замедлитель (з) – слой резонансного поглотителя (т)–з–т–з–т. Всего шесть слоев, как это показано на рис. 1.

Процесс прохождения нейтронов через систему моделируется в координатах (X, Y, Z) методом статистических испытаний [7]. Используется предположение постоянства сечений взаимодействия нейтронов с ядрами среды на отрезке траектории и в пределах энергетической группы. Значения сечений взаимодействия задаются в соответствии с библиотекой констант JENDL 3.2 [8]. Разработанный

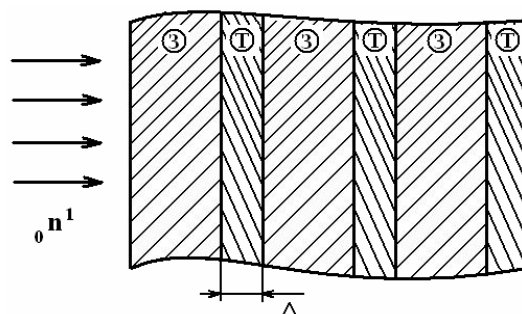


Рис. 1. Структура многослойной системы

алгоритм с использованием метода статистических испытаний для определения параметров траектории нейтронов отличается от стандартного [9] и имеет структуру, подробно изложенную в работе [10]. Хотя в библиотеке оцененных ядерных данных JENDL для описания рассеяния медленных нейтронов хранятся законы рассеяния, из которых с использованием программ обработки можно получить сечения рассеяния, в данном алгоритме при определении энергии нейтрона до и после неупругого рассеяния использовались аналитические зависимости, в которых учитывалось возбуждение только первого уровня ядра. Ранее [10] этот алгоритм был использован только для определения «времени торможения» и конечной энергии изначально быстрого нейтрона в тяжелой замедляющей среде, поэтому его работоспособность для решения поставленной задачи проверялась путем сравнения с точными аналитическими решениями, полученными для тепловых нейтронов. В частности, с помощью разработанного алгоритма была решена задача определения дифференциального и интегрального альбеда мононаправленного потока тепловых нейтронов, падающих на полубесконечные мишени из урана и из тория. В численном эксперименте значение интегрального альбеда составило 0,264 для мишени из урана и 0,168 для мишени из тория. Значение интегрального альбеда, рассчитанное по формулам Чандрасекара [11], составило 0,268 для мишени из урана и 0,169 для мишени из тория. Согласно результатов достаточно хорошее. В рассматриваемой задаче при моделировании контролируются значения вероятности прохождения нейтронов через систему p_{pass} , вероятности отражения от системы (альбеда) p_{refl} и вероятности поглощения в системе p_{abs} , а также выполнение условия $p_{pass} + p_{refl} + p_{abs} = 1$. Количество моделируемых траекторий обеспечивает статистическую погрешность в интервале 0,1–0,2%.

Толщина каждого слоя резонансного поглотителя в численном эксперименте остается неизменной, а толщина каждого слоя замедлителя увеличивается (с одинаковой кратностью). При этом отношение толщины слоя замедлителя к слою резонансного поглотителя увеличивается от 1 до 100. В результате моделируются практически интересные случаи, в которых отношение объема замедлителя к объему топлива в размножающей системе увеличивается от 1 до 100 при постоянном объеме топлива.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе численных экспериментов установлены границы области значений отношения $V_{зам}/V_{топ}$ (объем замедлителя/объем топлива), в которой наблюдается аномалия, обнаруженная ранее в работах [12, 13] и указывающая на преимущества Th^{232} по сравнению с U^{238} при использовании в качестве воспроизводящего материала.

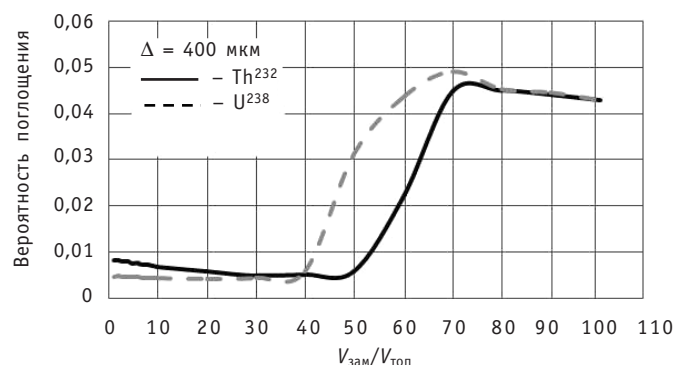


Рис. 2. Аномалия в зависимости резонансного поглощения в системе

Если толщина слоя резонансного поглотителя составляет $\Delta=400$ мкм, что соответствует размеру топливного зерна дисперсионного ядерного топлива, а замедлителем является графит, то аномально низкое поглощение нейтронов в системе, содержащей Th^{232} , по сравнению со случаем U^{238} наблюдается при $40 < V_{зам}/V_{топ} < 70$. На рис. 2 приведена зависимость вероятности резонансного поглощения в системе от значения $V_{зам}/V_{топ}$ для $\Delta = 400$ мкм.

При $V_{зам}/V_{топ} \approx 50$ резонансное поглощение в урансодержащей системе превосходит таковое в торийсодержащей системе в 6 раз. В интервале $40 < V_{зам}/V_{топ} < 50$ вероятность резонансного поглощения в торийсодержащей системе составляет около $5 \cdot 10^{-3}$ и меняется незначительно, в то время как в урансодержащей системе она возрастает от $5 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$. В работе [13] показано, что оптимальные параметры размножающей решетки, содержащей Th^{232} , достигаются при значительно больших отношениях $V_{зам}/V_{топ}$ по сравнению со случаем U^{238} для легководного замедлителя (в 2–5 раз). В рассмотренном выше случае вероятность избежать резонансного захвата ($1 - p_{abs}$) составляет 0,97 при $V_{зам}/V_{топ} \approx 50$ для уран-графитовой решетки и при $V_{зам}/V_{топ} \approx 65$ для торий-графитовой решетки. Вероятность избежать захвата, равная 0,98, достигается при $V_{зам}/V_{топ} \approx 45$ для уран-графитовой решетки и при $V_{зам}/V_{топ} \approx 60$ для торий-графитовой решетки.

При увеличении толщины слоя резонансного поглотителя до значения $\Delta = 600$ мкм (1,6 мм) на качественном уровне в зависимости, приведенной выше, значительных изменений не происходит. Сильно изменяются границы интервала значений $V_{зам}/V_{топ}$, в котором резонансное поглощение в торийсодержащей системе существенно ниже поглощения в урансодержащей системе. Так для $\Delta = 600$ мкм интер-

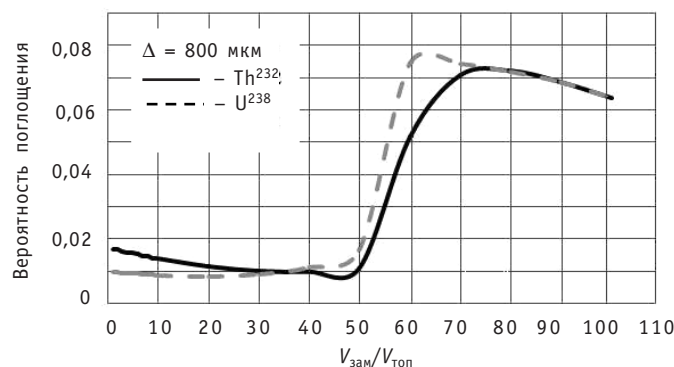
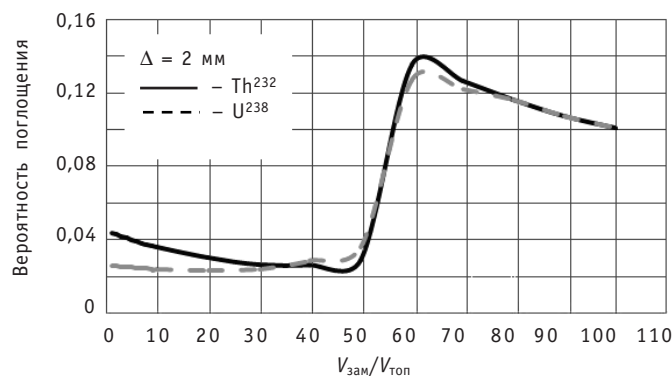


Рис. 3. Зависимость резонансного поглощения в системе от значения $V_{зам}/V_{топ}$

Рис. 4. «Исчезновение» преимуществ Th^{232} при увеличении толщины топливного слоя

вал находится в пределах $50 < V_{зам}/V_{топ} < 70$. Для $\Delta = 800$ мкм границы интервала практически те же, что и для $\Delta = 400$ мкм (см. рис. 3), но внутри этого интервала зависимости резонансного поглощения в торийсодержащей и урансодержащей системах становятся ближе.

Для $\Delta = 1600$ мкм интервал значений, обеспечивающих преимущество тория, находится в пределах $40 < V_{зам}/V_{топ} < 60$, а при $\Delta = 2000$ мкм (2 мм) преимуществ у тория нет. Остается лишь резкий рост резонансного поглощения в интервале $50 < V_{зам}/V_{топ} < 60$ как в торийсодержащей, так и в урансодержащей системах (см. рис. 4).

Естественно, что с ростом толщины слоя резонансного поглотителя резонансное поглощение возрастает.

Для Th^{232} в энергетических интервалах 4,65–10 эВ и 10–21,5 эВ в зависимости сечения поглощения нейтронов от энергии последних резонансы отсутствуют. Для U^{238} в этих интервалах находятся два мощных резонансных уровня с амплитудными значениями сечений 11000 и 8000 барн. Отсутствие резонансов приводит к тому, что при замедлении нейтронов в торийсодержащей среде возрастает значение плотности замедления нейтронов в энергетическом интервале, соответствующем сумме интервалов этих групп. Следовательно, возрастает плотность потока нейтронов с энергиями ниже 4,65 эВ вплоть до тепловой энергии. Увеличение отношения концентрации ядер замедлителя к концентрации ядер топлива, в состав которого входит и сырьевой нуклид, вместе с отмеченным эффектом должно еще больше увеличить плотность потока нейтронов, имеющих энергию ниже 4,65 эВ, по сравнению с U^{238} . По-существу, в размножающей среде для нейтронов увеличивается вероятность избежать резонансного захвата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженная аномалия в зависимости резонансного поглощения в размножающей среде от отношения «объем замедлителя/объем топлива», вызванная заменой сырьевого нуклида U^{238} на сырьевой нуклид Th^{232} , указывает на целесообразность пересмотра традиционных конструктивных решений, которые приняты для «размножающих решеток». Например, в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах [14] «рабочие» значения отношения количества ядер графита (замедлителя) к количеству ядер тяжелых элементов в твэле (сырьевой и делящийся нуклиды вместе) находятся в интервале от 200 до 600. Твэл представляет собой графитовый шар диаметром около 6 см, в объеме которого равномерно распределены (диспергированы) микротвэлы. Обогащение по U^{235} при этом составляет от 6,5 до 10% (остальное – ядра U^{238}), диаметр кернов микротвэлов составляет от

400 до 700 мкм. КERN микровэла выполнен из диоксида урана. В каждом шаровом твэле содержится около 6 г урана. Отношение «объем замедлителя/объем топлива», таким образом, значительно превышает 100. При таких значениях отношения (см. рис. 2) резонансное поглощение в микровэлах, содержащих сырьевой U^{238} , не будет заметно изменяться при его замене на Th^{232} . Если же изменить значение отношения до 50, заменив при этом U^{238} на Th^{232} , то резонансное поглощение уменьшится почти в 6 раз. Замена будет состоять в увеличении количества микровэлеов, равномерно рассредоточенных по объему шарового твэла. На первый взгляд, это влечет за собой увеличение количества делящегося U^{235} в каждом шаровом твэле, что нецелесообразно. Но поскольку вероятность избежать резонансного поглощения стала существенно выше, количество делящегося U^{235} в каждом микровэле можно значительно уменьшить. Более того, U^{235} можно заменить на плутоний оружейной кондиции. Небольшие количества делящегося тепловыми нейтронами U^{235} или Pu^{239} будут выполнять функцию «запала», при выгорании которого из Th^{232} будет нарабатываться делящийся U^{233} . Схема такого плутоний-ториевого ядерного топливного цикла подробно рассмотрена в работе [6].

Если говорить о водо-водяных реакторах, то принятое на сегодня значение отношения «объем замедлителя/объем топлива» в них значительно меньше 10. В случае легководного замедлителя аномалия в зависимости резонансного поглощения от отношения «объем замедлителя/объем топлива», вызванная заменой сырьевого нуклида U^{238} на сырьевой нуклид Th^{232} , наблюдается при значениях около 10. Это было установлено в численных экспериментах, проведенных для тепло-выделяющих сборок с плутоний-ториевыми топливными композициями [6]. Причина в том, что замедляющая способность воды ($\approx 1,50$) несоизмеримо больше замедляющей способности графита ($\approx 0,063$). Даже если принять во внимание то, что коэффициент замедления для графита (≈ 170) превосходит таковой для воды (≈ 69), оптимальные по значению коэффициента размножения параметры решетки с топливом, содержащим сырьевой Th^{232} и делящийся U^{235} или плутоний оружейной кондиции, обеспечивают широкие возможности для пересмотра конструкции тепловыделяющих сборок. Простая замена U^{238} на Th^{232} при значении отношения в пределах от 1,2 до 2,1 не дает выигрыша. Увеличение отношения до 8–10 при одновременном увеличении количества U^{235} или плутония в торийсодержащем топливе делает такую замену очень эффективной. Например, если объем активной зоны и диаметр тепловыделяющих элементов оставить неизменными, то при содержании делящегося нуклида 10–12% (U^{235} или оружейный плутоний) в ториевом топливе количество топлива в активной зоне можно уменьшить в 3–4 раза. Тепловая мощность ядерной энергетической установки при этом останется той же. Техническая реализация такого изменения будет состоять в уменьшении количества тепловыделяющих элементов в каждой тепловыделяющей сборке. Если уран-водные решетки относятся к «тесным решеткам», то торий-водные решетки должны быть «разреженными».

Таким образом, можно предположить, что техническая реализация концепции плутоний-ториевого ядерного топливного цикла не будет сопряжена с большими трудностями, а замена в ядерном топливе сырьевого U^{238} на сырьевой Th^{232} не только расширит сырьевую базу ядерной энергетики, но и сделает менее напряженной проблему обращения с облученным ядерным топливом.

Литература

1. Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.Д. Справочник по ядерно-физическим константам для расчетов реакторов. – М.: Атомиздат, 1960. – 280 с.
2. Frederic B. Jueneman Secular Catastrophism//Industrial Research and Development. – 1982. – V. 24. – № 6. – Р. 21.
3. Мурогов В.М., Троянов М.Ф., Шмелев А.Н. Использование тория в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
4. Пономарев-Степной Н.Н., Лунин Г.Л., Морозов А.Г. и др. Ториевый реактор ВВЭР-Т//Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – № 4. – С. 263-277.
5. Шаманин И.В., Ухов А.А., Рюттен Г.-И., Хаас К., Шерер В. Результаты моделирования параметров топливного цикла для водо-водяного энергетического реактора//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 4. – С. 53-64.
6. Shamanin I.V., Ukhov A.A., Rutten H.-J., Haas K., Sherer W. The Use of (Th, U, Pu)₂O₃ Fuel in a Water Water Energy Reactor (WWER-1000): Physics and Fuel Cycle Simulation by means of the V.S.O.P.(97) Computer Code, FZJ-ISR-IB-1/99. – Forschungszentrum, Julich, 1999. – 40 p.
7. Золотухин В.Г., Майоров Л.В. Оценка параметров критичности реакторов методом Монте-Карло. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
8. JENDL, version 3.2. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), 1997.
9. Spanier J., Gelbard E.M. Monte-Carlo Principles and Neutron Transport Problems. – Addison-Wesley Publishing Company, 1972. – 272 pp.
10. Шидловский В.В., Гаврилов П.М., Шаманин И.В. и др. Нейтронно-физические аспекты обращения с уран-ториевыми и плутоний-ториевыми сплавами//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 4. – С. 9-17.
11. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. Изд. 2. – М.: Атомиздат, 1972. – 312 с.
12. Шаманин И.В., Годовых А.В. Структура резонансной области поглощения ядер ²³⁸U и ²³²Th и зависимости ее параметров от температуры//Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 49-56.
13. Шаманин И.В. Следствия, вызванные отличиями структур резонансной области поглощения ядер ²³⁸U и ²³²Th//Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11 (43). – С. 47-53.
14. Карпов В.А. Топливные циклы и физические особенности высокотемпературных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.

Поступила в редакцию 17.10.2008

Are developed methodical, algorithmic and the software of calculation of speed propagation of waves of pressure (SPWP) in the coolant of reactor core of boiling reactors. Results of calculation of SPWP in technological channels of reactor RBMK-1000 in various modes of operation are resulted.

УДК 621.039.58

The results of the Development of the Experts Questioning Methods and based on them the Estimation of the NPP Staff Reliability Indices \Yu. V. Volkov, D. S. Samokhin, A. V. Sobolev, M. Y. Kanishev, S. L. Lichakov, S. N. Slinev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.

The paper deals with the methods for estimation the NPP staff reliability indices based on the experts questioning data. Four types of staff errors have been chosen and possibility of the estimation of the given errors frequency has been considered. The results of the opinions two different experts groups are presented and the analysis on the coincidence of these results has been made. The results of the data comparison of the experts questioning and the results of the data processing for the NPP incidents have been made. The recommendations how to use the drawn conclusions to estimate the efficiency of NPP engineers safety activities are given.

УДК 621.039.58

The problem of Level Optimization for Disorder Detection in Observed Random Process \A. V. Igitov, O. M. Gulina, N. L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.

The equipment state diagnostics connects with detection of irregular situations in its operation. There is formulated optimization problem for level intersection number, suggested the calculation method for optimization problem solving. There is performed also the algorithm of model parameters asymptotical estimation and developed the applied soft. Calculations are performed and nomographs are pictured by means of Delphi and Mathcad technologies.

УДК 621.039.52.034.3: 532.546

Geometrical and Hydrodynamic Features of the Radial Coolant Distribution HTGR \V. A. Klimova, V. M. Pahaluev, S. Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The pebble bed reactor core with radial gas flow geometric parameters depending on the demanded energy and construction characteristics analysis results are given. The comparison with the reactor with axial gas flow is carried out. The experimental hydraulic resistance coefficients ratio received contains the dependency on the reactor core inner and outer radius, besides Reynolds number and pebble bed diameter, and can be recommended for the reactor pressure loss calculations for considerable pebble bed thickness. A significant difference of such flows from the cases of flat gas flows in pebble bed is the decrease of the flow pressure pulsations rate from the periphery to the centre.

УДК 621.039.547.5

Features of Resonant Absorption of Neutrons in Thorium Containing Multiply Systems, Caused by Change in Ratio of Moderator Volume and Fuel Volume \I. V. Shamanin, A. V. Godovich, P. A. Seleznev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.

The results of numerical experiments defining borders of area of values of ratio V_{mod}/V_f (volume of moderator/volume of fuel) in which anomaly during dependence of resonant absorption is observed are resulted. Its existence proves physical advantages Th^{232} in comparison with U^{238} in case of use as a reproducing material in structure of nuclear fuel at the certain values of ratio V_{mod}/V_f .