

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] позволяют, 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 $6,9 \pm 0,4$ 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

$$\bar{\rho}_i = \alpha \frac{1}{z_3 - z_0} \int_{z_0}^{z_3} \rho_{i3}(z) dz + (1 - \alpha) \frac{1}{z_c - z_0} \int_{z_0}^{z_c} \rho_{ic}(z) dz, \quad (2)$$

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 одnogрупповыми 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.

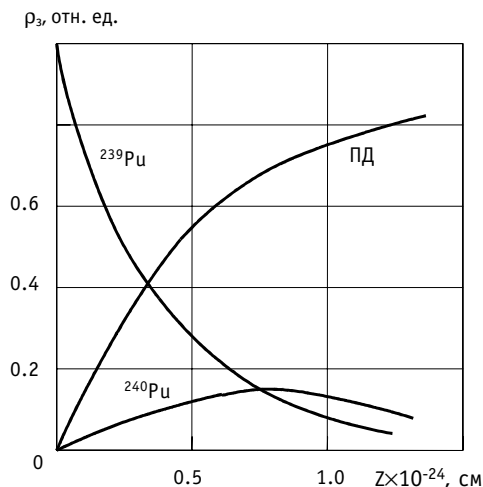


Рис.1. Накопление плутония и продуктов деления в запальных твэлах

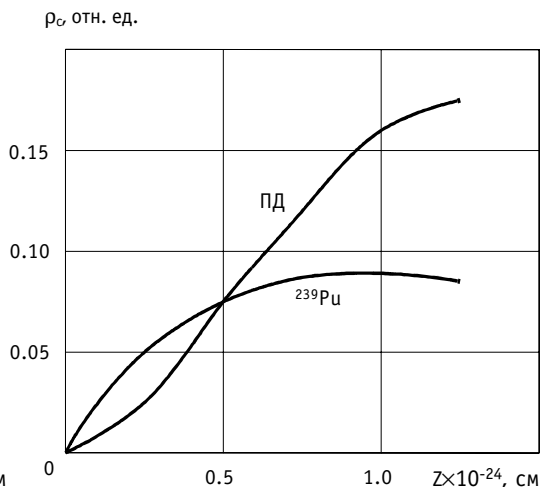


Рис.2. Накопление плутония и продуктов деления в сырьевых твэлах

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, $\Delta R_5=60$ 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.

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% ^{239}Pu 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-

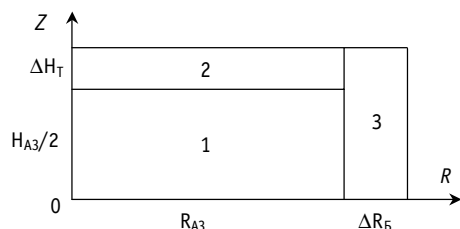


Рис.3. Расчетная схема насыпного реактора в R - Z -геометрии: 1 - активная зона; 2 - верхний (нижний) экран: 80%-Na, 20%- сталь; 3 - боковой экран: 20%-Na, 80%- сталь

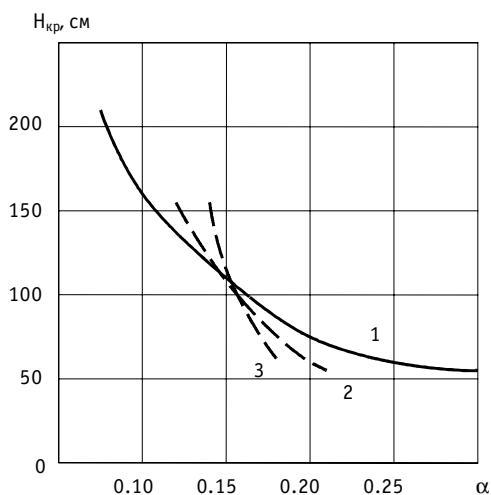


Рис.4. Зависимость критической высоты шарового слоя от доли запальных твэлов: 1 - $z = 0,85$ - основной вариант; 2 - $z = 0,6$; 3 - $z = 0,4$ - дополнительные варианты

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 3–4 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

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

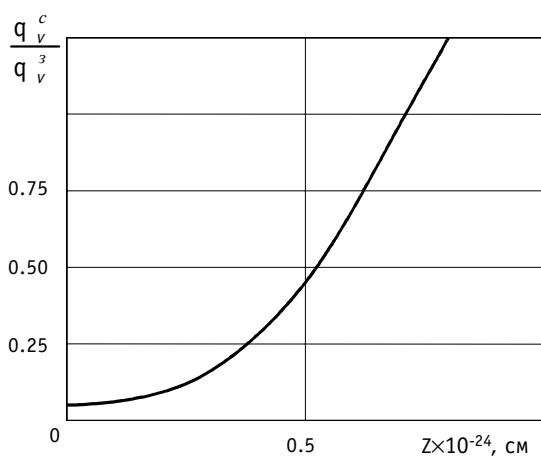


Рис.5. Отношение мощностей запального и сырьевого твэлов в зависимости от набранного флюенса

Отношение $\frac{\sigma_c}{\sigma_f}$ 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

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

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

$$\xi_{ш} = \frac{0,54}{\varepsilon_{Na}^4} = const. \quad (4)$$

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.

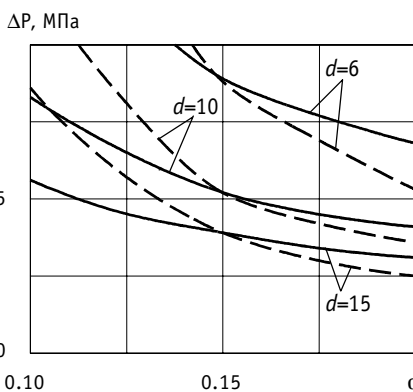


Рис.6. Гидравлическое сопротивление шарового слоя: — $z = 0,85$; - - - $z = 0,6$

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

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.