

ОСОБЕННОСТИ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА РАБОТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БН-1200

И.В. Малышева, А.Н. Царапкина, В.А. Елисеев, А.В. Егоров
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.Лейпунского, Обнинск



Представлены различные способы подавления избыточной реактивности в начальной загрузке активной зоны и связанные с ними переходные режимы до установившегося режима равномерно-частичных перегрузок ТВС. Анализируются различные способы компенсации избыточной реактивности. Показано, что возможны два способа компенсации избыточной реактивности, в которых не нарушаются проектные ограничения по теплонапряженности твэлов: с комбинированными (карбид бора + сталь) и урановыми постоянными компенсаторами реактивности.

Ключевые слова: реактор, активная зона, запас реактивности.

Keywords: reactor, core, reactivity margin.

Особенностью начальной загрузки любой активной зоны является отсутствие в топливе продуктов деления. Следствием этого является большая избыточная реактивность, которая для БН-1200 [1–3] составляет $\sim 3\% \Delta k/k$. Для подавления этой реактивности необходимы постоянные компенсаторы реактивности (ПКР), которые при перегрузке извлекаются из активной зоны [4], или какие-то иные меры. Так в БН-600 в качестве ПКР использовались ТВС, загруженные двуокисью обедненного урана, в БН-800 предполагается установка ПКР с карбидом естественно-го бора. Возможны и другие меры компенсации избыточной реактивности, например, старт реактора на топливе пониженного обогащения. В этом случае ПКР вообще не требуется.

Наряду с исследованием начальной загрузки проводилось расчетное моделирование перегрузок активной зоны в течение первых семи микрокампаний до полного установления режима равномерно-частичных перегрузок. При проведении расчетов предполагалось, что в конце каждой микрокампании при полностью извлеченных стержнях КС реактор должен быть критичен (с учетом оперативного запаса реактивности 0,2%).

На начальном этапе для БН-1200 рассматривается четырехкратная перегрузка активной зоны, поэтому при каждой перегрузке четвертая часть ТВС в активной зоне заменялась свежими. Временные перемещения частично выгоревших ТВС в хранилище и их последующий возврат в активную зону на дожигание не рассматриваются.

СТАРТОВАЯ ЗАГРУЗКА АКТИВНОЙ ЗОНЫ БЕЗ ПКР

Такой способ организации стартовой загрузки возможен, если начальное обогащение топлива снизить на 5% отн. Никаких ПКР в этом случае не требуется, соот-

© *И.В. Малышева, А.Н. Царапкина, В.А. Елисеев, А.В. Егоров, 2013*

ветственно исключается и сама причина нарушений выравнивания поля тепловыделения. Управление реактивностью реактора в этом случае производится с помощью вариации обогащения топлива в каждой перегрузке (в этом случае временно нарушается принцип постоянства обогащения по всей активной зоне). Иллюстрация расположения ТВС и стержней СУЗ в такой активной зоне представлена на рис. 1 (боковая зона воспроизводства не показана).

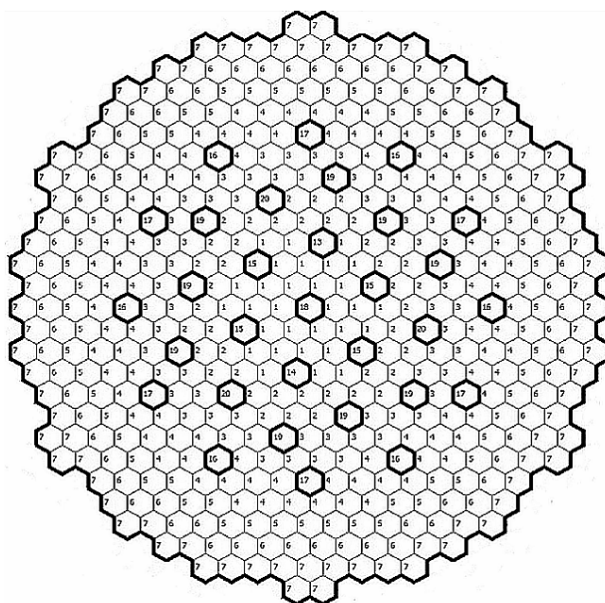


Рис. 1. Картограмма расположения ТВС и стержней СУЗ в активной зоне без ПКР

При такой стартовой загрузке потеря реактивности от выгорания топлива в полтора раза меньше, чем в установившемся режиме работы, но во второй микрокампании (МК) реактор будет иметь дефицит реактивности $\sim 1,1\% \Delta k/k$. Для обеспечения критичности обогащение догружаемой во второй микрокампании партии топлива должно быть повышено на 7% отн. Соответственно на те же 7% повысится и тепловыделение в свежезагруженном топливе, существенно (на 6%) превысив допустимый уровень. Для последующих перегрузок значимо корректировать обогащение догружаемого топлива уже не требуется. Но небольшое превышение тепловыделения над допустимым сохранится в третьей микрокампании (как отголосок от второй микрокампании). В дальнейшем реактор входит в установившийся режим равномерно-частичных перегрузок.

Итак, стартовая загрузка со сниженным обогащением топлива (без ПКР) не позволяет реактору пройти переходный режим без превышения допустимого уровня тепловыделения, потребуются снижение мощности установки. В то же время несомненным достоинством такой загрузки является меньшая потеря реактивности от выгорания и больший запас эффективности стержней СУЗ.

ПОДАВЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ РЕАКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПКР

ПКР любого типа позволяют скомпенсировать избыточную реактивность стартовой загрузки, однако они приводят к нарушению выравнивания поля тепловыделения и (за счет интерференции) к снижению эффективности стержней СУЗ.

При трехкратной перегрузке ТВС, как это было при пуске БН-600 и плани-

руется в БН-800, средней является вторая микрокампания, поэтому по окончании первой микрокампании все ПКР должны быть извлечены. Для начального этапа работы БН-1200 предполагается четырехкратная перегрузка, поэтому «средним» будет интервал от середины второй микрокампании до середины третьей. В этом случае часть ПКР должна перейти на вторую микрокампанию, чтобы скомпенсировать оставшуюся часть избыточной реактивности.

Другим отличием активной зоны БН-1200 от БН-600 или БН-800 является существенно больший диаметр активной зоны при меньшей ее высоте и, следовательно, высокая чувствительность поля тепловыделения к возмущениям. Поэтому, чтобы исключить локальные всплески тепловыделения и обеспечить приемлемое выравнивание, к количеству и расположению ПКР в активной зоне предъявляются жесткие требования. В частности, ПКР должны располагаться кольцами, причем это относится и к первой, и ко второй микрокампаниям (т. е. количество переходящих на вторую микрокампанию ПКР должно составлять четыре или шесть).

ПКР на основе карбида бора, по конструкции аналогичные сборкам борной защиты, для БН-1200 не подходят: для компенсации избыточной реактивности достаточно шести таких ПКР, при этом на вторую микрокампанию должны перейти два ПКР. В этом случае и в первой, и во второй микрокампаниях возникают серьезные всплески тепловыделения. Поэтому такие «тяжелые» сборки в качестве ПКР в данной активной зоне использовать нельзя. Здесь могут использоваться более «легкие» сборки – комбинированные (карбид бора со сталью), сборки с обедненным ураном или стальные (типа сборок стальной защиты).

Комбинированные ПКР по конструкции аналогичны борным, но 3/4 борных пэлов в них заменены стальными прутьями. Оптимальное количество таких ПКР – 10 шт., что составляет ~ 2% от всех ТВС, т.е. даже при самом удачном расположении ПКР тепловыделение в оставшихся ТВС возрастет на те же 2%. Иллюстрация изменений максимального тепловыделения в переходном режиме при стартовой загрузке реактора с комбинированными ПКР представлена в табл. 1. Видно, что в первой микрокампании допустимое тепловыделение (48 кВт/м) превышено на 2%, и никакой оптимизацией расстановки ПКР устранить это не удалось.

Таблица 1

Изменение максимального тепловыделения в переходном режиме при использовании комбинированных ПКР

№ микрокампании	1	2	3	4	5	6	7
Количество ПКР, шт.	10	4	–	–	–	–	–
$Q_{i, \text{ макс}}$, кВт/м	49	47	48	48	48	46	45

Особо отметим, что все представленные в этой таблице максимальные тепловыделения достигаются в начале соответствующих микрокампаний. К их концу максимальные тепловыделения снижаются на 2–3% за счет перераспределения тепловыделения из активной зоны в боковой и нижней торцевой экраны.

В то же время известен способ устранения этого превышения – разделение функций внутреннего и наружного колец стержней КС. Этот способ используется в БН-600 (центральный стержень КС работает независимо от других) и предус-

мотрен в БН-800 (четыре стержня КС внутреннего кольца работают в режиме компенсации температурно-мощностных эффектов и при выходе реактора на мощность полностью извлекаются). Такое решение следует применить и в БН-1200, переключив внутреннюю четверку стержней КС в режим температурных компенсаторов. Компенсация потери реактивности от выгорания топлива будет осуществляться 12-ю стержнями КС внешнего кольца. При этом максимальное тепловыделение в начале первой микрокампании снизится до 48,1 кВт/м, что на 0,1 кВт/м превышает допустимое. Это превышение самоустраняется в процессе энергетического пуска реактора, который всегда сопровождается достаточно длительным (до одного года) периодом опытной эксплуатации на пониженной мощности. Именно за это время максимальные тепловыделения снизятся. В результате при использовании комбинированных ПКР и переключении функций внутренней четверки стержней КС переходной режим можно пройти без превышений допустимого тепловыделения и без вынужденного снижения мощности установки.

Урановые ПКР по конструкции могут быть полностью идентичны ТВС, с той разницей, что вместо МОКС-топлива в твэлы загружается двуокись обедненного урана. Такие ПКР гораздо «мягче» воздействуют на поле тепловыделения и тем самым исключают превышение максимального тепловыделения в первых микрокампаниях. В четвертой и пятой микрокампаниях наблюдаются небольшие превышения максимально допустимого тепловыделения, но их можно устранить за счет независимого управления внешним и внутренним кольцами стержней КС. В стартовой загрузке активной зоны должно быть установлено 14 таких ПКР, а при первой перегрузке должно быть извлечено восемь ПКР (шесть из внешнего и два из внутреннего колец). При второй перегрузке извлекаются оставшиеся шесть ПКР внешнего кольца. Схема расстановки ПКР в активной зоне показана на рис. 2. Следует отметить, что с урановыми ПКР запас реактивности на выгорание в первой микрокампании снижен примерно на 0,2% $\Delta k/k$, что позволяет несколько снизить требования к точности изготовления топлива первой загрузки.

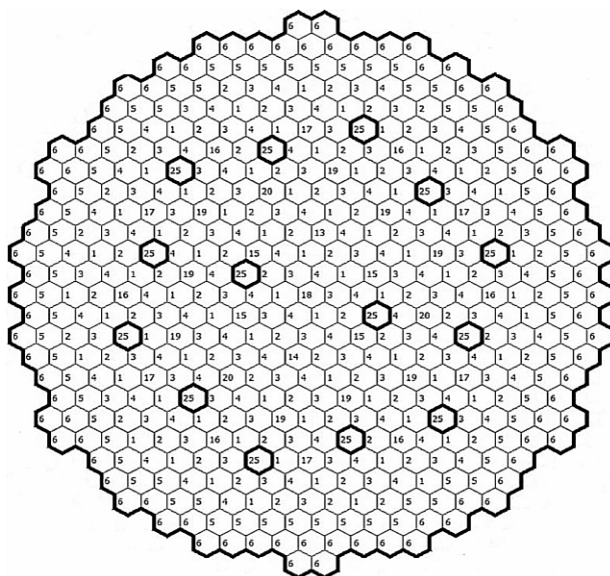


Рис. 2. Схема расстановки урановых ПКР

Стальные ПКР. Эффективность стальных ПКР невелика, поэтому для компенсации избыточной реактивности стартовой загрузки необходимо 18 ПКР, что составляет по-

что 5% от всех ТВС активной зоны. Такое количество ПКР, в которых практически отсутствует тепловыделение, приводит к росту тепловыделения в оставшихся ТВС активной зоны на те же 5%. Поэтому максимальное тепловыделение в первой микрокампании превышает допустимый уровень. Оптимизация по улучшению выравнивания поля тепловыделения в стартовой активной зоне показала, что для лучшего выравнивания поля тепловыделения ПКР следует располагать неравномерно с учетом двух полупогруженных стержней AP, которые находятся выше и ниже центра активной зоны. При оптимальном расположении ПКР максимальное тепловыделение в первой микрокампании будет составлять ~ 49 кВт/м (превышение 2%). Во второй микрокампании превышения вообще не будет. Схема оптимального расположения стальных ПКР дана на рис. 3.

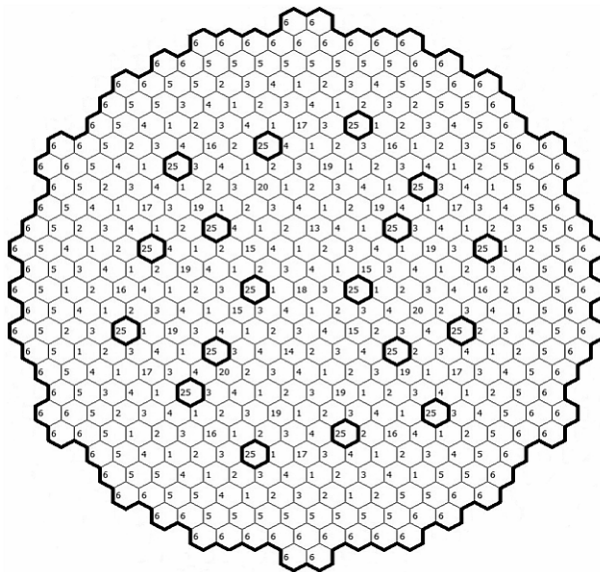


Рис. 3. Схема расстановки стальных ПКР

Особенностью активной зоны с большим количеством стальных ПКР является превышение максимально допустимых тепловыделений в четвертой и пятой микрокампаниях (примерно до 50 кВт/м), когда уже никаких ПКР в активной зоне нет. Это может быть связано с несогласованностью перегрузок ТВС в ячейках из-под ПКР и ТВС в штатных ячейках (на место выгруженных ПКР в расчетах всегда «устанавливались» свежие ТВС). Такая особенность приводит к временному нарушению регулярности расположения ТВС по группам перегрузки и образованию «островков», состоящих только из свежих ТВС. Проблема уже проявлялась в случае с урановыми ТВС, но из-за меньшего числа ПКР она была значительно слабее. В принципе, эту проблему можно решить, если в ячейки из-под ПКР устанавливать частично выгоревшие ТВС, выгружаемые после первой и второй перегрузок. Здесь требуются дополнительные оптимизационные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что с точки зрения непревышения максимально допустимых тепловыделений возможны два способа организации стартовой загрузки и переходного режима активной зоны БН-1200: с комбинированными ПКР (из карбида бора и стали) и урановыми ПКР. При первой и второй перегрузках эти ПКР извлекаются из активной зоны. Однако в обоих случаях для исключения превышения максимально допустимых тепловыделений необходимо раздел-

ное управление наружным и внутренним кольцами стержней КС (по аналогии с проектом БН-800). Такой вариант позволит исключить необходимость временного снижения мощности установки в процессе переходного режима.

В выполненных исследованиях был принят ряд упрощений:

- не учитывались индивидуальные истории облучения каждой ТВС (составы ТВС усреднялись в пределах перегрузочной группы);
- для двух последних рядов ТВС принималась четырехкратная перегрузка вместо пяти- и шестикратной, предусмотренных проектом;
- не учитывалась перегрузка с возвратом части недогоревших ТВС из ВРХ в активную зону на дожигание (начиная с первой перегрузки все перегружаемые ТВС заменялись свежими).

Эти упрощения планируется исключить в ходе дальнейших исследований.

Литература

1. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, вып. 4. – С. 201–206.
2. Поплавский В.М., Цибуля А.М., Хомяков Ю.С. и др. Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, вып. 4. – С. 206–211.
3. Поплавский В.М., Матвеев В.И., Елисеев В.А. и др. Исследование влияния пустотного эффекта реактивности на технико-экономические характеристики и безопасность перспективного быстрого реактора // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, вып. 4. – С. 230.
4. Васильев Б.А., Тимофеев А.В., Любимов М.А., Будыльский А.Д. Компонировочные и конструктивные решения системы перегрузки перспективного быстрого реактора // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, вып. 4. – С. 246–249.

Поступила в редакцию 16.01.2013

presented. It is shown that efficiency of the direct conversion of the nuclear reactor thermal energy into the energy of directional flow light radiation can be high enough (80–90%).

УДК 629.039.58+331.44+316.6

Methodological principles of industrial enterprises personnels psychological education for work in high-risk conditions \ V.N. Abramova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 1 illustration. – References, 3 titles.

Traditionally at universities industrial enterprise workers competence is mainly developed in the sphere of professional knowledge and skills.

Professionally important personal qualities are paid less attention to whereas these qualities, motives, and relations not in the less predetermine specialists success or failure. Persons psychological training for professional knowledge application in high-risk conditions is particularly important. Psychological training methodology contains approaches, scientific methods, and methodology of functional and structural activity analysis, psychology of developing professionally important skills including professional motivation and mental attitude toward high culture safety and organizational culture.

УДК 621.039.543.6

Computational studies of global nuclear energy development under the assumption of the worlds heterogeneous development \ A.F. Egorov, V.V. Korobeynikov, E.V. Poplavskaya, G.A. Fesenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 tables, 3 illustrations. – References, 4 titles.

We study the mathematical model of Global nuclear energy development until the end of this century. For comparative scenarios analysis of transition to sustainable nuclear energy systems, we use models of heterogeneous world with an allowance for specific national development. Selected models are closely to real picture of the World of the future, according to international experts. Global Model Scenarios by end of 2100 yr are interdependent and formulated in such a way that the total capacity of Nuclear Energy development in all scenarios was constant and equal. There are two options in this scenarios: 5000 GW for high and 2,500 GW for moderate by the end of 2100 yr.

УДК 621.039.526:621.039.59

Minor actinides incineration in neutron spectra of uranium-235 or plutonium fission \ G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 10 titles.

In the paper with the aim to incinerate minor actinides (neptunium, americium and curium) the possible ways of increasing the mean energy of neutrons in nuclear power installations are considered. These ways may be following: the usage of slow moderating coolant from lead–208 in innovative fast reactors, optimization of core dimensions in critical and subcritical reactors, the usage of high enriched fuel and at last considering the possibility of minor actinides incineration in neutron spectra of uranium-235 or plutonium fission.

УДК 621.039.526:621.039.51

Special aspects of the initial fuel loading phase in BN-1200 reactor core \ I.V. Malysheva, A.N. Tsarapkina, V.A. Eliseev, A.V. Egorov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 6 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 4 titles.

Different methods are presented for excess reactivity reduction in the initial fuel loading

phase as well as associated transients before the stable state of regular partial reloadings. Different techniques for compensating excess reactivity are being analysed. Two ways of compensating excess reactivity have been shown possible, which do not violate design constraints on FE specific power: with combined (boron carbide + steel) and uranium regular reactivity compensators.

УДК 621.039.526

Calculational-experimental research of irradiation heat rate in the BOR-60 side shield \ A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 8 titles.

The improved method was used to calculate irradiation heat rate in components of an experimental rig located in the first row of the BOR-60 side shield. It is shown that the computed values correlate satisfactorily with the experimental ones. Some causes of discrepancy are given as well as the ways of their elimination.

УДК 621.039.526

Increasing maximum neutron flux in the core of MBIR reactor \ V.A. Cherny, L.A. Kotchetkov, I.V. Burevsky, V.Yu. Stogov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

The information is presented on theoretical search for technical decisions with their application for the core of the MBIR installation under design for essential increase (approximately by a factor of two) of maximum neutron flux up to $1 \cdot 10^{16}$ n/cm²s.

It is shown that the increas of thermal capacity of the reactor from 150 MWt to 280 MWt with simultaneous reduction of fuel pin diameter in the core from 6.0 mm to 4.1 mm would resultin maximum neutron flux of about $1 \cdot 10^{16}$ n/cm²s.