

- 2793, 1993. (См. также: Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я. Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет многосекционной структуры blankets. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 71—77.)
2. Гребенкин К.Ф. Об одной возможности улучшения параметров электроядерного реактора: Препринт ВНИИТФ 41, 1993.
 3. Колесов В.Ф., Штарев С.К., Хоружий В.Х., Житник А.К. Эффективность электроядерного устройства с blanketом на расплавленных солях и нептуниевой размножающей мишенью. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 1, с. 40—45.
 4. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Кинетика двухсекционного бустер-реактора с асимметричной нейтронной связью секций. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 10—23.
 5. Павловский А.И., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К). — Там же, 1992, вып. 3, с. 3—11.
 6. Griffin P., Miller J., Harms G. e.a. Design trade-off study for a large volume short pulse neutron assembly. — In: Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors. Proc. Intern. Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors. Washington, Nov. 13—17, 1994, p. 292—299.
 7. Воинов А.М., Воинов М.А., Воронцов С.В. и др. Расчетно-теоретическая и конструкторская проработка физического макета двухкаскадного blankets для электроядерного реактора. — В сб.: Второй научный семинар памяти В.П.Саранцева. Дубна, 23—24 сентября 1997 г. Дубна, Д9-98-153, 1998, с. 69—76.
 8. Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 5, с. 327—337.
 9. Кочуров Б.П., Шведов О.В., Конев В.Н., Кварацхели А.Ю. Основные параметры демонстрационной электроядерной установки. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1998, вып. 3, с. 40—43.
 10. Барзилов А.П., Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф. и др. Подкритическая реакторная система с каскадным умножением нейтронов. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 1997, № 2, с. 59—66.
 11. Селиверстов В.В. Умножение нейтронов внешнего источника в каскадных подкритических системах с односторонней нейтронной связью. — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 5, с. 378—390.
 12. Барашенков В.С., Шелаев И.А. Электроядерные усилители энергии с низкоэнергетическими пучками протонов. — Там же, 1998, т. 85, вып. 5, с. 409—411.
 13. Bowman C., Toevs J., Arthur E. e.a. ABC Concept Presentations. The Los Alamos Accelerator Based Conversion Concept for Plutonium Disposition (ABC). JANSON Review, La Jolla, CA, January 18, 1994.

Поступила в Редакцию 18.02.2000

УДК 621.039.555

РЕАКТОРНО-ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС «СТЕНД Б»

*Дьяченко П.П., Еловский О.А., Прохоров Ю.А., Фокин Г.Н., Якубов П.А.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им А.И.Лейпунского),
Снопков А.А. (РФЯЦ — ВНИИТФ)*

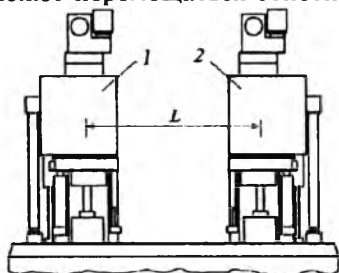
Реакторно-лазерный комплекс «Стенд Б», оснащенный оборудованием для исследования генерации лазерного излучения с прямой ядерной накачкой [1] и импульсным двухзонным быстрым реактором аperiodического действия БАРС-6 в качестве нейтронного источника для облучения лазерно-активных элементов, эксплуатируется в ФЭИ с 1996 г.

Начало работ по созданию в СССР импульсных самогасящихся быстрых реакторов аperiodического действия типа БАРС относится к 1961 г. [2]. В 1964 г. был получен первый импульс делений на реакторе БАРС-1 в ВНИИТФ. Описываемый здесь реактор является шестой модификацией. В него по сравнению с предшествующими внесены усовершенствования, направленные на повышение безопасности при эксплуатации и расширение экспериментальных возможностей.

На стенде ведутся исследования [3, 4] с лазерно-активными средами и с разными по конструкции лазерно-активными элементами, в том числе и с их нейтронно-физическими имитаторами, собранными в лазерный блок [5, 6]. Кроме того, проводятся радиационно-химические и медико-биологические исследования [7], требующие об-

лучения образцов и объектов импульсными потоками нейтронов и γ -квантов. В работах [7, 8], выполненных по результатам экспериментов на реакторе БАРС-6, упоминались некоторые его параметры, однако сведения о реакторе не носили системного характера. Настоящая статья восполняет этот пробел, давая более подробную информацию.

Нейтронно-физические характеристики реактора. Реактор БАРС-6 имеет две активные зоны, которые расположены на платформе, передвигающейся по рельсам к одному из двух рабочих мест или к биологической защите, куда их помещают во время подготовки экспериментов. В свою очередь, одна из активных зон подвижная и может перемещаться относительно другой так, что расстояние между их осями изменяется в интервале 340—1500 мм (рис. 1). Каждая активная зона набрана из кольцевых топливных элементов, изготовленных из уран-молибденового сплава с антикоррозионным покрытием. Обогащение по ^{235}U 90%, общее его количество в каждой активной зоне 105 кг. Между топливными элементами выполнены пазы и зазоры, по которым может подаваться воздух для ускорения их охлаждения после генерации импульса. Для снижения влияния на реактивность реактора соседствующих с ним предметов активные зоны окружены экраном из аморфного ^{10}B толщиной 5 мм, заключенного в тонкостенную стальную оболочку.



Р и с. 1. Расположение подвижной (1) и неподвижной активной зоны (2) на платформе (L — расстояние между активными зонами)

Каждая активная зона набрана из кольцевых топливных элементов, изготовленных из уран-молибденового сплава с антикоррозионным покрытием. Обогащение по ^{235}U 90%, общее его количество в каждой активной зоне 105 кг. Между топливными элементами выполнены пазы и зазоры, по которым может подаваться воздух для ускорения их охлаждения после генерации импульса. Для снижения влияния на реактивность реактора соседствующих с ним предметов активные зоны окружены экраном из аморфного ^{10}B толщиной 5 мм, заключенного в тонкостенную стальную оболочку.

В каждой активной зоне предусмотрены следующие органы воздействия на реактивность:

1. Блок безопасности, выполняющий функции аварийной защиты, перевода реактора в подкритическое состояние и компенсации реактивности. Он имеет форму полого цилиндра, располагается в центральном канале активной зоны, удерживаясь в верхнем положении электромагнитом, и при сбросе может вводить в активную зону отрицательную реактивность до $15 \beta_{эф}$ со скоростью до $200 \beta_{эф}/с$. Материал блока безопасности аналогичен материалу топливных элементов. Здесь и далее, когда говорится об эффективности органа СУЗ, имеется в виду его эффективность в однозонном реакторе (все органы СУЗ другой активной зоны находятся в нижнем положении).

2. Стоп-стержень, являющийся вторым органом защиты. Он удерживается в верхнем положении сжатым воздухом и при сбросе может вводить в активную зону отрицательную реактивность $2,1 \beta_{эф}$ со скоростью $40 \beta_{эф}/с$. Стоп-стержень выполнен из уран-молибденового сплава в виде кольца и располагается под активной зоной.

3. Стержень тонкой регулировки эффективностью $2,4 \beta_{эф}$, выполняющий функцию регулирования реактивности на запаздывающих нейтронах. Он выполнен также из уран-молибденового сплава в виде кольца и располагается снаружи стоп-стержня. Когда оба стержня находятся в верхнем положении, они составляют нижнее топливное кольцо.

4. Импульсный стержень, выполняющий функцию эталона реактивности, которая может быть установлена с погрешностью не более $0,001 \beta_{эф}$. Он представляет собой медную прямоугольную изогнутую пластину размером 130×90 мм, огибающую часть наружной поверхности активной зоны. Его эффективность $1,3 \beta_{эф}$.

5. Регулятор реактивности, предназначенный для ввода при генерации импульса положительной реактивности с заданной скоростью в интервале $15—200 \beta_{эф}/с$. Он представляет собой цилиндр, заполненный композицией из ^{10}B и замедлителя. В стартовой позиции регулятор реактивности удерживается в определенном положении внутри опорной трубы и при генерации импульса «выстреливается» под действием мощных пружин в верхнее строго фиксированное положение.

Возможность перемещать одну активную зону относительно другой позволяет в определенных пределах оптимизировать аксиальное распределение потока нейтронов, падающего на облучаемый объект, в зависимости от его длины (рис. 2). При сближении активных зон увеличивается связь по быстрым нейтронам, в результате чего запас реактивности реактора возрастает (рис. 3). Поскольку активные зоны не имеют отражателей, реактор чувствителен и к приближению к нему экспериментальных устройств. Размещение каких-либо материалов между активными зонами снижает взаимодействие между ними. Так, блок борированного (3% карбида бора) полиэтилена размером $300 \times 300 \times 340$ мм, помещенный между активными зонами, снижает коэффициент связи примерно в 10 раз по сравнению с коэффициентом связи, когда между активными зонами не располагаются какие-либо материалы.

Кинетика реактора на мгновенных нейтронах во многом определяется средним временем жизни мгновенных нейтронов ($l_{\text{мгн}}$). Оно измерено по декременту затухания потока после инъекции в реактор нейтронов от импульсного генератора (см. таблицу).

Параметры системы реактор—лазерный блок

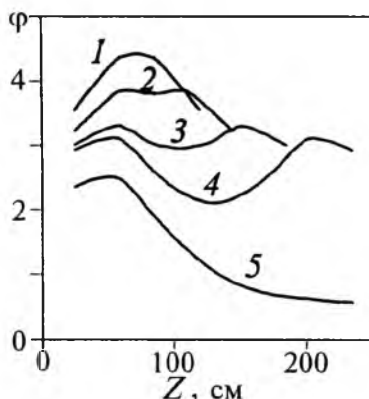
Система	$\Delta k_{\text{сис}}, \beta_{\text{эф}}$	$k_{\text{св}}, \beta_{\text{эф}}$	$l_{\text{мгн}}, \text{мкс}$	k_r	k_z	$E_{\text{л.б.}}/E_p$
Без лазерного блока	1,3	0,3	0,014	—	—	—
Лазерный блок без отражателя	3,3	0,4	0,1	1,25	1,36	0,26
Лазерный блок с отражателем	4,0	0,9	5,0	1,17	1,22	0,54

В режиме генерации импульсов мощности число делений в импульсе может варьироваться в зависимости от значений и скорости ввода реактивности на мгновенных нейтронах. При номинальном импульсе $2 \cdot 10^{17}$ дел. в активной зоне на боковой поверхности ее борного экрана флюенс быстрых нейтронов составляет $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, доза γ -излучения — 200 Гр (рис. 4).

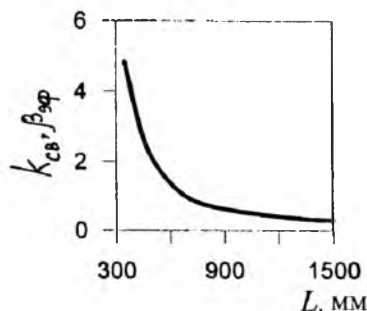
На первом рабочем месте реактор используется для облучения импульсным потоком нейтронов и γ -квантов образцов и устройств и в первую очередь устройств с лазерно-активными элементами с разными газовыми и конденсированными средами.

На втором рабочем месте с помощью реактора облучаются лазерно-активные элементы, собранные в лазерный блок (рис. 5).

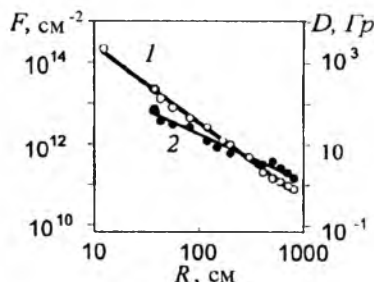
Нейтронно-физические характеристики системы реактор—лазерный блок. Лазерный блок представляет собой цилиндрическую конструкцию, собранную на двух трубных досках из лазерно-активных элементов и их нейтронно-физических имитаторов (рис. 6), а также



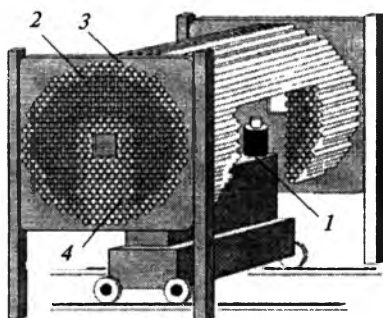
Р и с. 2. Плотность делений ^{235}U (отн. ед.) вдоль экспериментального устройства, расположенного сбоку от активных зон: 1—4 — расстояние между центрами активных зон 350, 600, 1000, 1500 мм соответственно; 5 — при работе одной активной зоны



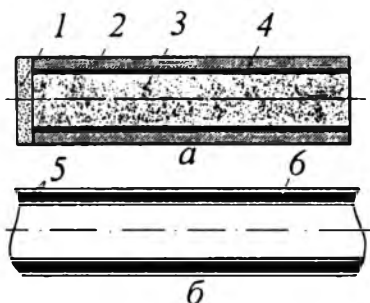
Р и с. 3. Зависимость коэффициента связи между активными зонами от расстояния между ними



Р и с. 4. Флюенс быстрых нейтронов (1) и доза γ -излучения (2) при номинальном импульсе в зависимости от расстояния до центра активной зоны



Р и с. 5. Расположение реактора и лазерного блока: 1 — активная зона; 2 — лазерно-активные элементы; 3, 4 — наружный и внутренний отражатель соответственно



Р и с. 6. Конструкция лазерно-активного элемента (а) и его имитатора (б): 1 — оптическое окно; 2 — лазерно-активная среда; 3 — стальная труба; 4 — металлический ^{235}U ; 5 — алюминиевые трубы; 6 — диоксид ^{235}U

ная реактивность, переводящая реактор в надкритическое на мгновенных нейтронах состояние. При $S_{\text{вн}} / l_{\text{мгн}} \gg 1$ гарантируется детерминированное развитие цепного процесса [10, 11] и обеспечивается безопасная работа реактора. Большая скорость ввода реактивности необходима для того, чтобы импульс успел развиваться по времени до разогрева активных зон и снижения реактивности за счет температурного эффекта.

Генерация импульса требует задания с высокой точностью нужной надкритичности реактора на мгновенных нейтронах и необходимой скорости ее ввода. Опуская описание процедуры определения этих параметров, отметим лишь, что по окончании подготовки к генерации импульса «выстрелом» регулятора реактивности в активную зону вводится нужная положительная реактивность. Необходимая скорость ее ввода определяется стартовой координатой регулятора реактивности, с которой проводится его «выстрел». Реактор становится надкритичным на мгновенных нейтронах, и происходит быстрое нарастание его мощности. За счет отрицательного температурного эффекта реактивности он переводится в подкритическое на мгновенных нейтронах состояние, сбросом органов СУЗ гасится «хвост» импульса, и реактор переводится в подкритическое состояние и на запаздывающих нейтронах. По форме импульсов может быть определен [12] коэффициент теплового гашения, который определяется по формуле [10] $\gamma = \rho / E_{1/2} = l_{\text{мгн}} / TE_{1/2} = 0,16 \cdot 10^{-17} \beta_{\text{эф}} / \text{дел.}$, где ρ — надкритичность реактора на мгновенных нейтронах; $E_{1/2}$ — число делений в первой половине импульса; T — период нарастания мощности реактора.

элементов полиэтиленового отражателя и замедлителя (полиэтилен фигурного профиля в межтрубном пространстве). Элементы отражателя могут обрамлять полость лазерного блока, образуя его внутренний отражатель. В нейтронно-физическом отношении лазерный блок является подкритическим ансамблем с эффективным коэффициентом размножения, равным примерно 0,7.

После перемещения реактора на второе рабочее место лазерный блок опускается и активные зоны оказываются расположенными в его полости. В рабочем положении лазерный блок существенно влияет на запас реактивности системы ($\Delta k_{\text{сис}}$), коэффициент связи между активными зонами ($k_{\text{св}}$), среднее время жиз-

ни мгновенных нейтронов в системе ($l_{\text{мгн}}$), причем эти изменения больше при отсутствии в лазерном блоке внутреннего отражателя (см. таблицу). Внутренний отражатель снижает взаимодействие между лазерным блоком и активными зонами. В таблице приведены также радиальные (k_r) и аксиальные (k_z) коэффициенты неравномерности энерговыделения в лазерном блоке и отношения числа делений в лазерном блоке и обеих активных зонах реактора ($E_{\text{л.б}}/E_p$).

Импульсные режимы работы реактора. Особенностью генерации импульсов в реакторе является генерация «с мощности» [9]. В этом режиме реактор выводится на мощность около 5 Вт, работая не менее 5 мин для накопления внутреннего источника нейтронов ($S_{\text{вн}}$). Затем вводится с большой скоростью нуж-

В реакторе без лазерного блока ширина генерируемого импульса делений варьируется в пределах 50—200 мкс (в зависимости от энергии в импульсе). Поскольку нельзя достичь синхронизации «выстрелов» регуляторов реактивности с точностью, соизмеримой с шириной импульса, импульс генерируется регулятором реактивности одной активной зоны. Это, однако, не препятствует синхронному формированию одинаковых по амплитуде и ширине импульсов как в ведущей, так и в ведомой активной зоне за счет «обмена» нейтронами в процессе развития импульса между ними.

Генерация импульсов возможна и только в одной активной зоне (все органы СУЗ другой зоны находятся внизу). При надкритичности реактора на мгновенных нейтронах $0,126 \beta_{\text{эф}}$, введенной со скоростью $200 \beta_{\text{эф}}/\text{с}$, реализуется номинальный импульс ($2 \cdot 10^{17}$ дел.) с шириной на полувысоте 50 мкс и амплитудой $3 \cdot 10^{21}$ дел./с (~ 100 ГВт).

Генерация импульса в реакторе с лазерным блоком имеет особенности, связанные прежде всего с резким увеличением времени жизни нейтронов в системе реактор—лазерный блок. Благодаря этому ширина импульса существенно увеличивается. Например, при энерговыделении $1 \cdot 10^{17}$ дел. в активной зоне реактора без лазерного блока ширина импульса на полувысоте равна 0,08 мс, при генерации импульса с тем же энерговыделением в реакторе с лазерным блоком ширина импульса равна 2 мс для лазерного блока с внутренним отражателем и 20 мс для лазерного блока без него.

Большая ширина импульса приводит к тому, что в отличие от генерации импульса в реакторе без лазерного блока энерговыделение в импульсе слабо зависит от скорости ввода реактивности и определяется в значительной степени только вводимой реактивностью. Зависимость энерговыделения в активных зонах от задаваемой надкритичности системы реактор—лазерный блок более пологая по сравнению с реактором без лазерного блока (рис. 7). Это создает условия для безопасной генерации импульса в реакторе с лазерным блоком, поскольку энерговыделение менее чувствительно к погрешности задания надкритичности при генерации импульса.

Измеряя периоды нарастания мощности при генерации импульса, можно оценить эффективное время жизни мгновенных нейтронов, влияющее на формирование импульса. В реакторе с лазерным блоком (если в последнем отсутствует внутренний отражатель) при надкритичности системы на мгновенных нейтронах $0,27 \beta_{\text{эф}}$, введенной со скоростью не менее $40 \beta_{\text{эф}}/\text{с}$, реализуется номинальный импульс с числом делений $2 \cdot 10^{17}$ в каждой активной зоне и $2,2 \cdot 10^{17}$ дел. в лазерном блоке. На рис. 8 приведены формы генерируемых импульсов делений.

В заключение отметим, что генерация импульсов на мгновенных нейтронах в режиме с мощности обеспечивает безопасную эксплуатацию реактора и исключает взрывной характер процесса даже при гипотетических авариях. Возможность изменять расстояние между активными зонами реактора позволяет оптимизировать форму нейтронного поля при облучении образцов разной протяженности.

Авторы выражают благодарность П.П. Прокудину, Ю.В. Молчанову, В.И. Бурлаке, И.М. Кузнецову, принимавшим участие в экспериментах, А.Ф. Баландину, А.В. Максименкову, Д.В. Сутягину за создание аппаратуры и программного обеспечения для проведения измерений, В.Д. Цвераве за обработку результатов.

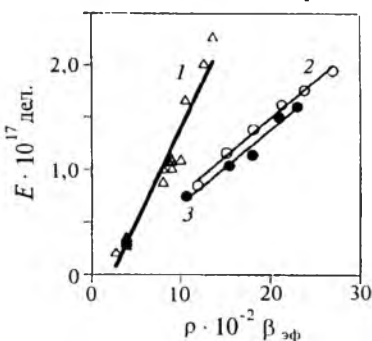


Рис. 7. Зависимость числа делений в активной зоне реактора без лазерного блока (1), с лазерным блоком без отражателя (2) и с отражателем (3) от надкритичности

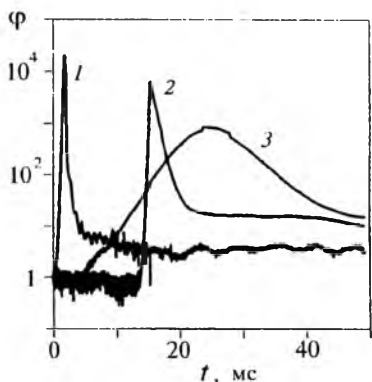


Рис. 8. Форма импульсов делений в активной зоне реактора без лазерного блока (1), с лазерным блоком с отражателем (2) и без отражателя (3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко П.П. История исследований в области прямого преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения. — В кн: Государственный научный центр РФ — Физико-энергетический институт. 50 лет. М., ЦНИИатоминформ, 1996, с. 40—58.
2. Горновой Г.А., Горин Н.В., Кошмяков В.П. и др. Опыт эксплуатации быстрых импульсных ядерных реакторов БАРС 1, 2, 3 во ВНИИТФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, вып. 2. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1994, с. 3—12.
3. Кононов В.Н., Боховко М.В., Дьяченко П.П. и др. Эксперимент по ядерной накачке аргон-ксенонового лазера на импульсном реакторе БАРС-6: Препринт ФЭИ-2476, 1995.
4. Барзилов А.П., Боховко М.В., Гулевич А.В. и др. Физические характеристики экспериментов по ядерной накачке газовых лазеров на импульсном реакторе БАРС-6: Препринт ФЭИ-2650, 1997.
5. Dyachenko P.P., Gulevich A.V., Zrodnikov F.V. et al. Energy model of a pulse nuclear reactor pumped laser system. — In: Proc. of ICENES'93. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1994. p. 372—376.
6. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В. и др. Энергетический макет лазерной системы с накачкой от импульсного реактора. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 5, с. 361—365.
7. Прохоров Ю.А., Кононов В.Н., Кувшинчиков В.И. и др. Исследования биологического действия импульсного нейтронного излучения реактора БАРС-6. — Там же, 1998, т. 85, вып. 5, с. 391—400.
8. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Прохорова Л.И. и др. Измерение времени жизни мгновенных нейтронов статистическим частотным методом в системе реактор БАРС-6—лазерный блок. — Там же, 1999, т. 87, вып. 5, с. 370—375.
9. Snopkov A.A., Gorin N.V., Gornovoi G.F. et al. Two-core fast reactor BARS-5. — In: Proc. Topical Meeting on Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors. Washington, Nov. 13—17, 1994, p. 300—306.
10. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М: Атомиздат, 1976.
11. Hansen G. Assembly of fissionable material in presence of a weak neutron source. — Nucl. Sci. Engng, 1960, v. 8, № 6, p. 709—719.
12. Баладин А.Ф., Дьяченко П.П., Котов К.М. и др. Измерение параметров импульса делений реактора БАРС-6: Препринт ФЭИ-2591, 1997.

Поступила в Редакцию 12.04.2000

УДК 536.24

МЕТОД РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В СМЕШАННЫХ СБОРКАХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ТАБЛИЦ ДЛЯ КРИЗИСА В ПУЧКАХ

Бобков В.П. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

Традиционные методы расчета критических тепловых потоков основаны на рекомендациях, полученных в результате экспериментальных исследований натурных моделейборок. В качестве определяющих в таких методах задаются усредненные в данном сечении геометрические и режимные параметры: давление, массовая скорость, балансное паросодержание. Цель настоящей статьи — обоснование метода расчета критических тепловых потоков в сборках со смешанным расположением тепловыделяющих стержней, основанного на использовании таблицы для критических тепловых потоков в треугольных пучках стержней.

Разработанные к настоящему времени программы (см., например, ПУЧОК-2 [1] или VEVERKA [2] и др.) позволяют рассчитывать локальные (в каждой макроячейке) теплогидравлические параметры. Под макроячейками понимается часть проходного сечения сборки, заключенная между соседними стержнями или между стержнями и обечайкой. Для определения запаса до кризиса теплообмена требуется знать зависимость критического теплового потока от локальных режимных и геометрических параметров каждой макроячейки. Предлагаемый в статье метод позволяет рассчитывать критические тепловые потоки, если локальные параметры известны. Метод пригоден и для оценки критических тепловых потоков при неравномерном по сечению энерговыделению, и для периферийных ячеек, и для деформированныхборок.