



Аристова Е.Н., Пестрякова Г.А.,
Пономарев С.Г., Стойнов М.И.

Расчет нейтронных потоков
в отражателе при
использовании новых
углеродных материалов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Расчет нейтронных потоков в отражателе при использовании новых углеродных материалов / Е.Н.Аристова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2012. № 79. 12 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-79>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

Е.Н.Аристова, Г.А.Пестрякова,
С.Г.Пономарев, М.И.Стойнов

Расчет нейтронных потоков
в отражателе при использовании новых
углеродных материалов

Москва — 2012

Аристова Е.Н., Пестрякова Г.А., Пономарев С.Г., Стойнов М.И.

Расчет нейтронных потоков в отражателе при использовании новых углеродных материалов

Исследуется взаимодействие синтетических алмазов различной плотности (в виде порошка, спеков и др.) с нейтронами. Проведены численные расчеты активной зоны реактора с бериллиевым, алмазным и смешанным алмазно-бериллиевым отражателями. Для различных типов отражателей вычисляются и сравниваются критические размеры реактора, потоки и спектр нейтронов.

Основной целью работы является выяснение качественных физических эффектов (в спектрах и величинах нейтронных потоков) применения новых материалов для реакторных отражателей.

Ключевые слова: реактор, новые углеродные материалы, численный алгоритм

E.N. Aristova, G.A. Pestryakova, S.G. Ponomarev, M.I. Stoynov

Neutron flux computation in a reflector with new carbonic materials

We investigate the interaction of synthetic diamonds of different density (in the form of powder, cakes, etc.) with neutrons. Numerical calculations of reactor with beryllium, diamond and diamond-mixed beryllium reflectors are performed. Calculations and comparisons of core critical sizes, neutron flux and spectrums are carried out for different types of reflectors.

The main aim of the research is to determine the qualitative physical effects (in terms of neutron flux and spectrums) for usage of new materials for reactor reflectors

Key words: reactor, new carbon materials, numerical algorithm

Разработка численных алгоритмов и программ выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-01-00389-а.

Оглавление

Введение.....	3
§1. Математическая модель и исходные данные расчетов.....	3
§2. Результаты расчетов.....	6

Введение

В связи с необходимостью повышения эффективности использования исследовательских реакторов возникает задача улучшения спектральных характеристик и увеличения нейтронных потоков в экспериментальных каналах реакторов. Одним из возможных решений этой задачи является использование в реакторах новых углеродных материалов. В работе оценивается возможность и целесообразность использования синтетических алмазов в отражателях легководных реакторов. Синтетические алмазы отличаются более высокой плотностью по сравнению с металлическим бериллием, традиционно используемым в реакторных отражателях. Они обладают хорошими физико-химическими и механическими свойствами, но несколько худшей по сравнению с бериллием радиационной стойкостью. В последние годы развиваются новые методы крупномасштабного получения искусственных алмазов, и их стоимость существенно снижается. Эти факторы повышают актуальность проведения работ, позволяющих оценить возможность использования синтетических алмазов в реакторной технике.

Целью настоящей работы является исследование взаимодействия синтетических алмазов различной плотности (в виде порошка, спеков и др.) с нейтронами. Проведены численные расчеты активной зоны теплового реактора низкой мощности с бериллиевым, алмазным и смешанным алмазно-бериллиевым отражателями. Для различных типов отражателей вычисляются и сравниваются критические размеры реактора, потоки и спектр нейтронов.

Основной целью работы является выяснение качественных физических эффектов (в спектрах и величинах нейтронных потоков) применения новых материалов для реакторных отражателей. В связи с этим мы ограничились сравнительно простой моделью трехзонного осесимметричного цилиндрического реактора с гомогенизированными зонами. Распределение потока нейтронов вычисляется путем численного интегрирования многогруппового стационарного уравнения переноса. Для расчетов используется комплекс алгоритмов и программ, разработанных нами для численного решения уравнений переноса [1-5]. Программы и алгоритмы верифицировались в расчетах активной зоны реакторов с различными геометриями, составом топлива и теплоносителя [6-11,13].

В §1 обсуждаются используемые расчетная модель и численные алгоритмы, приводятся исходные данные расчета. В §2 содержатся результаты расчетов.

§1. Математическая модель и исходные данные расчетов

Для расчетов используется модель многозонного осесимметричного симметричного в вертикальном направлении цилиндрического реактора с гомогенизированными зонами. Распределение потока нейтронов вычисляется

путем численного интегрирования стационарного уравнения переноса в 26-групповом приближении с использованием системы нейтронных констант БНАБ-93 [12] (в качестве констант для алмазного отражателя используются нейтронные константы для углерода с плотностью, равной плотности алмазного отражателя для монокристалла и алмазного порошка).

Для расчетов используется комплекс программ, основанный на разработанных в [1-5] алгоритмах интегрирования стационарного одномерного и двумерного уравнения переноса в цилиндрической (r - z) системе координат.

Проведены расчеты активной зоны, моделирующей исследовательский реактор ИР-8 с активной зоной из ТВС ИРТ-3М. Это легководный реактор, работающий на высокообогащенном топливе (90% ^{235}U), с бериллиевым отражателем. Параметры активной зоны выбираются в соответствии с данными из [14-16].

На рис.1 представлен горизонтальный разрез активной зоны и отражателя этого реактора.

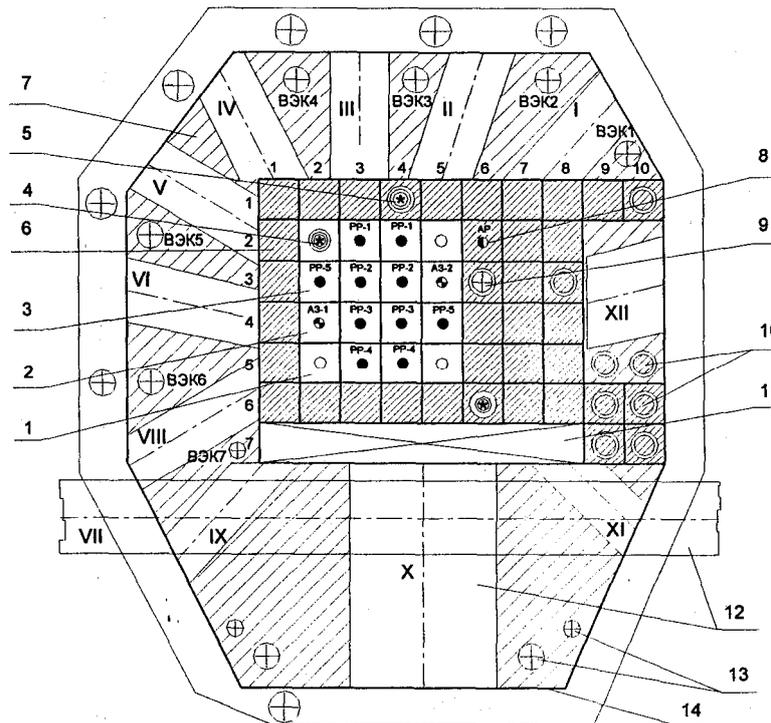


Рис. 1. Горизонтальный разрез активной зоны и отражателя реактора ИР-8 [16]

Основные параметры реактора ИР-8 (использованные для построения модели реактора) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Объем активной зоны	47.4 л
Длина ТВС	61.5 см
Масса топлива UO_2	4.35 кг
Степень обогащения ^{235}U	90%
Температура активной зоны	110 ⁰ С
Объемная доля воды	0.624
Объемная доля поглотителя B_4C	не более 0.05
Объемная доля материалов конструкции (нержавеющая сталь)	0.22
Толщина бериллиевого отражателя	30 см
Толщина алюминиевого корпуса	8 см

Для проведения расчетов была выбрана модель гомогенного реактора цилиндрической формы, состоящего из трех зон (см. рис.2). Считаем, что материалы, содержащиеся в каждой зоне, равномерно распределены по всему объему зоны.

Зона 1	Зона 2	Зона 3
Активная зона:	Отражатель:	Корпус:
топливо, вода, поглотитель, сталь	бериллий, алмаз	алюминий

Рис. 2. Расчетная модель реактора

Концентрации веществ, содержащихся в реакторе, приводятся в таблице 2. Эти данные рассчитаны в соответствии с [14-16].

Таблица 2

Расчетный вариант изотопного состава веществ

Зона	Материал	Изотоп	Концентрация ядер, 10^{22} см^{-3}
1	Топливо оксид урана	^{235}U	0.029
		^{238}U	0.002
		^{16}O	0.031
	Вода	^1H	4.29
		^{16}O	2.14
	Поглотитель карбид бора	^{10}B	не более 0.1
		^{11}B	не более 0.4
		^{12}C	не более 0.12
	Нержавеющая сталь	^{52}Cr	0.32
		^{56}Fe	1.22
^{96}Mo		0.03	
^{59}Ni		0.26	
2	Отражатель	^9Be	12.16
		^{12}C (алмаз)	17.65
3	Алюминий	^{26}Al	6.23

§2. Результаты расчетов

Для расчетов использовалась методика, описанная в §1. Расчеты проводились в 26-групповом приближении с использованием системы нейтронных констант БНАБ-93 [12].

На рис. 3 изображены распределения скалярных потоков тепловых и быстрых нейтронов¹ для варианта, данные для которого представлены в таблице 2. Расчет варианта проводился при отсутствии поглотителя. Скалярные потоки нормированы на величину среднего полного скалярного потока нейтронов в активной зоне. Границы зон реактора отмечены пунктиром.

¹ Тепловые нейтроны - нейтроны с энергией меньше 0.46 эВ (25 и 26 энергетические группы).

Скалярный поток тепловых нейтронов – $\psi^S = \sum_{p=25}^{26} \psi_p$. Быстрые – нейтроны с энергией

больше 20 кэВ (с 1 по 10 группы), $\psi^F = \sum_{p=1}^{10} \psi_p$. Нейтроны оставшихся энергий отнесены к промежуточным.

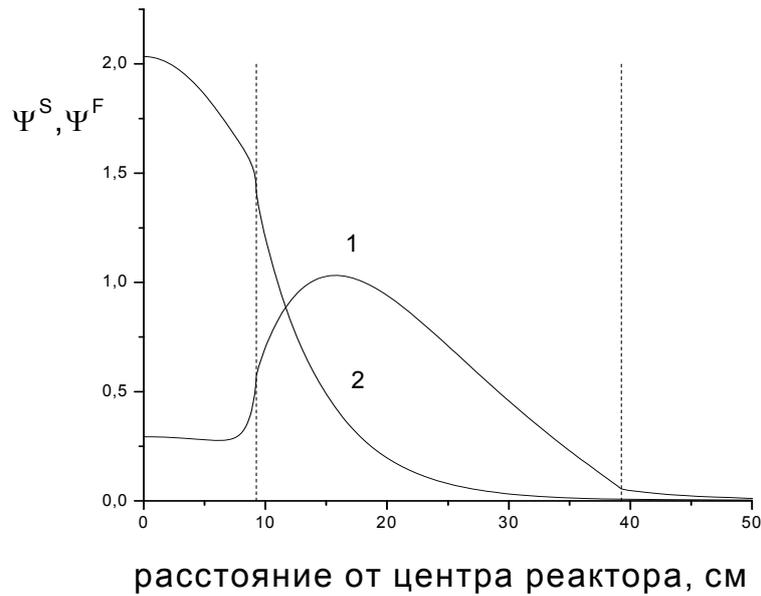


Рис. 3. Распределения скалярных потоков тепловых – Ψ^S (кривая 1) и быстрых – Ψ^F (кривая 2) нейтронов в реакторе с бериллиевым отражателем при отсутствии поглотителя. Границы расчетных зон отмечены пунктиром

Кривые имеют характерный для данного типа реактора вид. Для тепловых нейтронов поток уменьшается от центра активной зоны к периферии; вблизи границы отражателя поток начинает расти и достигает максимума внутри отражателя. Распределение потока быстрых нейтронов внутри реактора имеет монотонно убывающий характер с точкой излома на левой границе отражателя. Аналогичное поведение (рис. 4) рассматриваемых величин наблюдалось в расчетах, выполненных в двухгрупповом приближении [17].

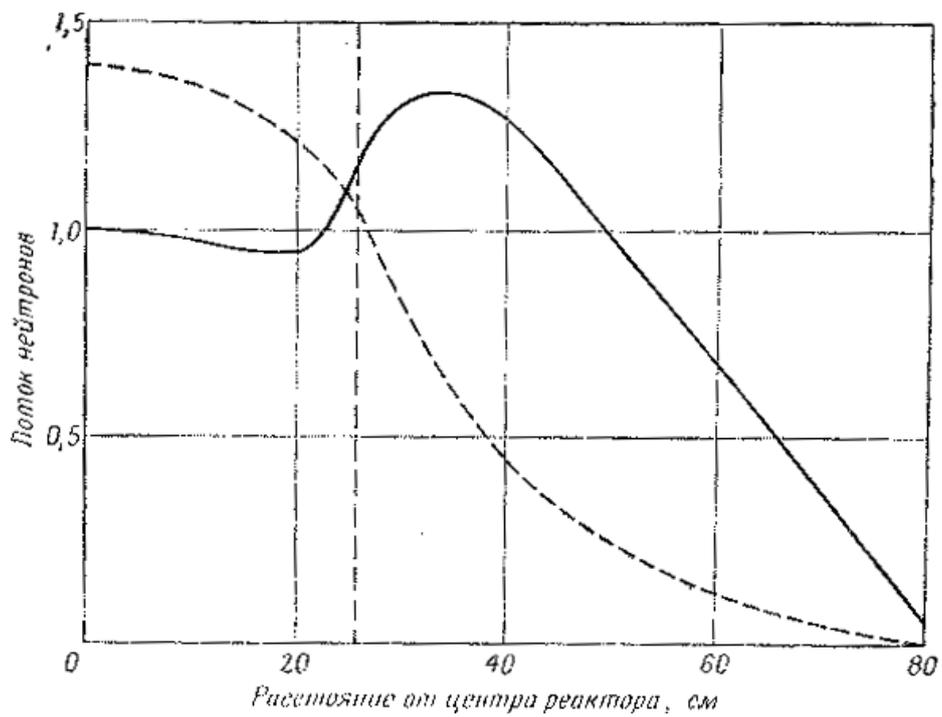


Рис. 4. Распределение тепловых и быстрых нейтронов для плоского реактора с отражателем [17]. Поток быстрых нейтронов уменьшен в три раза

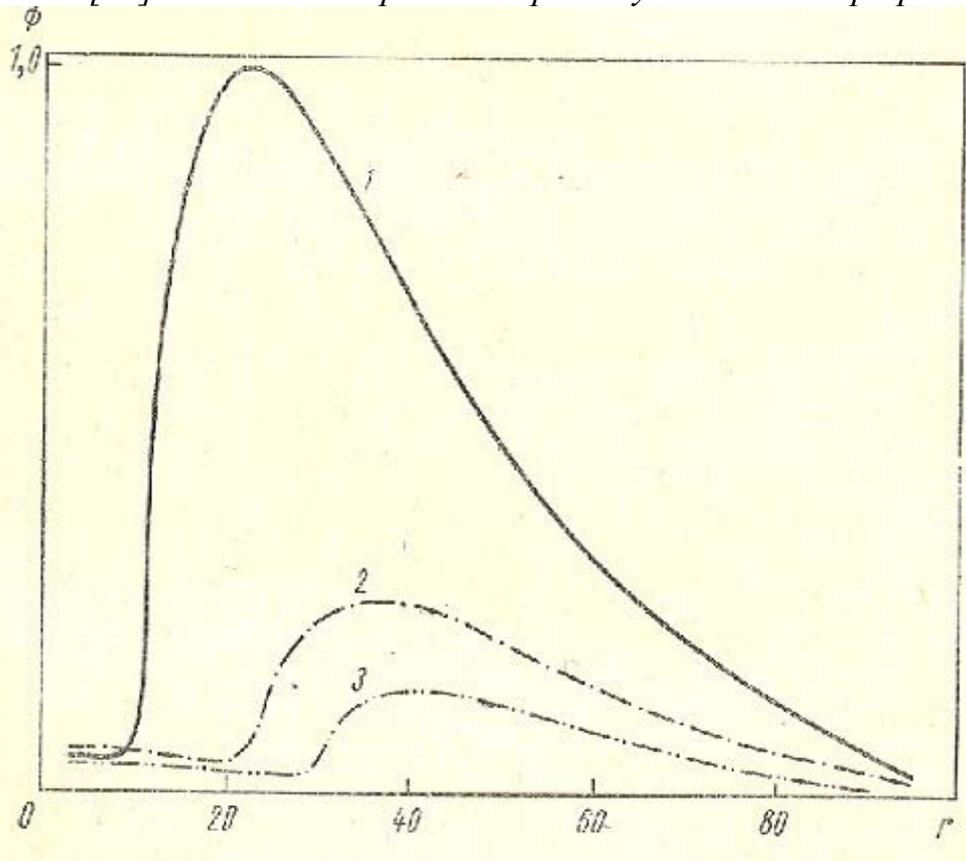


Рис. 5. Распределение потока тепловых нейтронов в реакторах со сферическими водо-водяными активными зонами, расположенными в тяжеловодных отражателях [15]

На рис. 5 представлено распределение скалярного потока тепловых нейтронов в реакторах со сферическими водо–водяными активными зонами, расположенными в тяжеловодных отражателях. Видно, что при увеличении концентрации горючего в активной зоне и уменьшении ее радиуса поток тепловых нейтронов в отражателе возрастает. Этот эффект наблюдается и в наших расчетах – см. рис. 6. Следует отметить, что этот эффект менее заметен для реакторов с бериллиевым отражателем по сравнению с тяжеловодными реакторами [15].



Рис. 6. Распределения скалярных потоков тепловых нейтронов в реакторе с бериллиевым отражателем для разной концентрации ядер урана. Кривая 1 соответствует расчету с параметрами из табл. 2. Кривая 2 соответствует расчету с увеличенной на 50% концентрацией ядер урана. Мощности сравниваемых реакторов одинаковы

Критический размер (радиус), рассчитанный для реактора без поглотителя, оказался равен 9.3 см. Введение в активную зону поглотителя при несущественном изменении вида профиля скалярного потока приводит к увеличению критического размера реактора. Так, при добавлении 0.5% от максимально возможного количества карбида бора критический размер становится равным 12.1 см., а при добавлении 1% карбида бора – 17.0 см.

Следующая серия расчетов была проведена для описанного выше реактора (табл. 1 и 2), в котором бериллиевый отражатель заменен на алмазный. Концентрация ядер ^{12}C в отражателе $17.65 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. На рис. 7 показаны

распределения отношения потоков тепловых и быстрых нейтронов, полученные в расчетах при использовании бериллиевого и алмазного отражателей. Наблюдается уменьшение критического радиуса при замене бериллиевого отражателя на алмазный. Кроме того, при этой замене происходит существенное изменение в соотношении потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри отражателя.

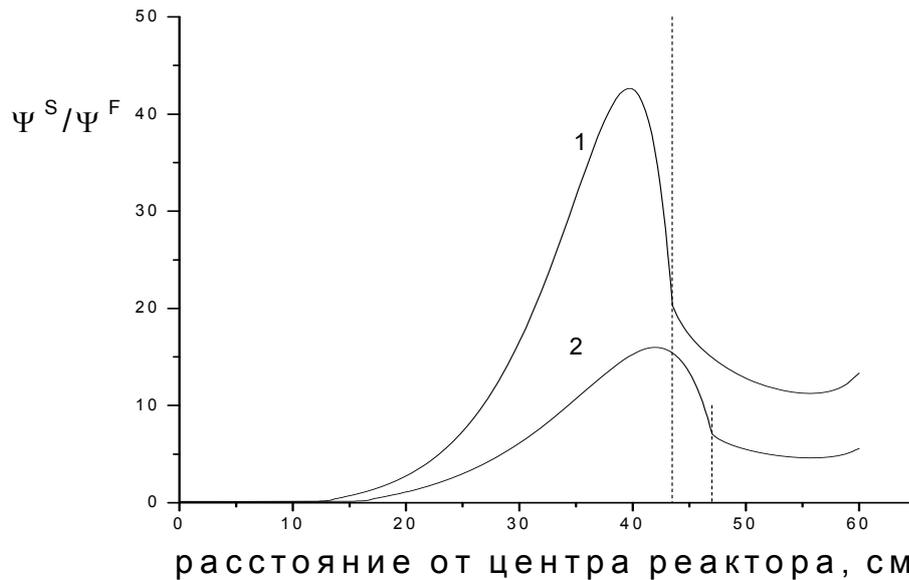


Рис. 7. Пространственная зависимость отношения скалярного потока тепловых нейтронов к скалярному потоку быстрых нейтронов Ψ^S / Ψ^F в реакторе с алмазным (кривая 1) и бериллиевым (кривая 2) отражателями. В реактор добавлен 1% карбида бора. Пунктиром отмечены положения правой границы отражателей

В таблице 3 представлены результаты расчетов для различных составов отражателей. В предпоследней колонке приводятся значения $\langle \Psi^S \rangle / \langle \Psi \rangle$ среднего потока тепловых нейтронов в отражателе, отнесенного к значению среднего потока нейтронов в активной зоне. Видно, что эта величина слабо зависит от материала отражателя. В последней колонке приведены значения отношения потока тепловых нейтронов к потоку быстрых нейтронов (Ψ^S / Ψ^F) на правой границе отражателя. Эта величина существенно зависит от материала отражателя и практически не зависит от присутствия поглотителя в активной зоне.

Таблица 3

Результаты расчетов для различных составов отражателей

Номер	Отражатель	Поглотитель % от максимального	Крит. размер см	$\langle \sigma^S \rangle /$ $\langle \sigma \rangle$	σ^S / σ^F
1	Бериллий	отсутствует	9.3	0.17	6.9
2	Алмаз	отсутствует	7.4	0.17	20.9
3	50% Бериллий + 50% Алмаз	отсутствует	8.3	0.17	11.9
4	Бериллий	1%	17.0	0.19	7.1
5	Алмаз	1%	13.5	0.20	20.3
6	50% Бериллий + 50% Алмаз	1%	15.2	0.19	11.9

На внешней границе алмазного отражателя спектр нейтронов значительно более сдвинут в тепловую область по сравнению с бериллиевым отражателем. Для среднего по отражателю значения скалярного потока тепловых нейтронов, нормированного на мощность реактора, существенной разницы для различных материалов отражателя не наблюдается.

Проведенные расчеты показывают, что использование алмазных отражателей приводит к существенному изменению нейтронных потоков. Наблюдается значительное увеличение потока тепловых нейтронов в точках максимума потока и на внешней границе отражателей.

Авторы благодарны В.А. Соменкову за постановку задачи и поддержку работы.

Список литературы

[1] В.Я.Гольдин. О математическом моделировании задач сплошной среды с неравновесным переносом. В сб. «Современные проблемы матем. физики и вычисл. матем.» – М.: Наука, 1982, С. 113-127.

[2] Е.Н.Аристова, А.В.Колпаков. Комбинированная разностная схема для аппроксимации эллиптического оператора на косоугольной ячейке // Математическое моделирование, т.3, № 4, 1991, С.93-102.

[3] Е.Н.Аристова, В.Я.Гольдин. Нелинейное ускорение итераций решения эллиптических систем уравнений // Математическое моделирование, т. 13 (2001), № 9, С. 82-90.

[4] Аристова Е.Н, Гольдин В.Я. Метод учета сильной анизотропии рассеяния в уравнении переноса // Математическое моделирование, т.9, № 6, 1997, С.39-52.

[5] Аристова Е.Н., Байдин Д.Ф., Гольдин В.Я. Два варианта экономичного метода решения уравнения переноса в r - z геометрии на основе перехода к переменным Владимирова // Математическое моделирование, т.18, № 7, 2006, С.43-52.

[6] Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трощев Ю.В., Аристова Е.Н. Быстрый реактор на оксидном уран-плутониевом топливе в саморегулируемом режиме // Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 3, С. 184–190.

[7] В.Я. Гольдин, Г.А. Пестрякова, Ю.В. Трощев. Управление быстрым реактором с оксидным уран-плутониевым топливом в саморегулируемом режиме без запаса реактивности // Атомная энергия, 2004, т. 97, вып. 1, С. 3-9.

[8] Гольдин В.Я., Анистратов Д.Ю. Реактор на быстрых нейтронах в саморегулируемом нейтронно-ядерном режиме. // Мат. моделирование, 1995, т. 7, № 10, С. 12–32.

[9] Гольдин В.Я., Трощев Ю.В., Пестрякова Г.А. Об управлении реактором на быстрых нейтронах в саморегулируемом режиме 2-го рода. // Докл. РАН, 1999, т. 369, № 2, С. 170–172.

[10] Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трощев Ю.В., Аристова Е.Н. Саморегулируемый нейтронно-ядерный режим в реакторе с жестким спектром и карбидным топливом. // Мат. моделирование, 2002, т. 14, № 1, С. 27–40.

[11] Гольдин В.Я., Трощев Ю.В. Управление мощностью быстрого реактора в саморегулируемом режиме и его пуск. // Атомная энергия, 2005, т. 98, вып. 1, С. 18–24.

[12] Николаев М.Н., Цибуля А.М., Цикунов А.Г. и др. Комплекс программ CONSYST/ABBV – подготовка констант БНАБ к расчетам реакторов и защиты. Отчет ГНЦ РФ ФЭИ №9865, 1998.

[13] Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трощев Ю.В. Усовершенствование математической модели саморегулируемого реактора. // Мат. моделирование, 2002, т. 14, № 12, С. 39-47.

[14] Буслаев В.С., Дубовец Г.Г., Жигачев В.М., Караченский В.Ф., Ряховский Ю.С., Червяцов А.А., Шавров П.И., Яшин А.Ф. Опыт проведения монтажных работ при создании реактора ИР-8 в ИАЭ имени И.В.Курчатова.

[15] Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы. М.: Атомиздат, 1972.

[16] Е.П. Рязанцев, В.А. Насонов, П.М. Егоренков, В.В. Яковлев, А.Ф. Яшин, И.А. Кузнецов, В.Н. Рожков. Экспериментальные возможности и перспективы использования реактора ИР-8 РНЦ “КИ” для фундаментальных и прикладных исследований. Препринт ИАЭ-6411/4, М.,2006.

[17] А.Вейнберг, Е.Вигнер Физическая теория ядерных реакторов. М.: Иностранная литература, 1961.