

УДК 621.039.519:621.039.524.2.034.44

Физический пуск реактора РБМК второго блока Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ЕГИАЗАРОВ М. Б., РЯБОВ В. И., ЖИРНОВ А. Д., БОРЩЕВ В. П., ВОРОНЦОВ Б. А., КУЗЬМИН А. Н., ЛАВРЕНОВ Ю. И., РОМАНЕНКО В. С., СЕРЕБРЕННИКОВ Ю. М., СИРОТКИН А. П.

В соответствии с программой развития ядерной энергетики в Советском Союзе в мае — июне 1975 г. осуществлен физический пуск реактора второго блока Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина (ЛАЭС). Программа физического пуска реактора второго блока ЛАЭС основывалась на результатах физического пуска первого реактора [1] и предусматривала ряд сравнительных экспериментов в процессе загрузки реактора. Загрузка реактора тепловыделяющими сборками (ТВС) и дополнительными поглотителями (ДП) проводилась при обеспокоенных контурах многократной принудительной циркуляции (МПЦ) и охлаждения стержневой системы управления и защиты (СУЗ). Хотя загруженный реактор с обеспокоенными каналами, предназначенными для установки ТВС и ДП, и не обладает наибольшей реактивностью, такой принцип загрузки позволил одновременно с загрузкой ТВС подготовить контур МПЦ к энергопуску.

Для надежного контроля за активной зоной и обеспечения ядерной безопасности в процессе загрузки наряду со штатной СУЗ использовалась временная СУЗ. Она осуществляла контроль нейтронного потока, реактивности и аварийную защиту (АЗ), имела в своем составе шесть стержней аварийной защиты, четыре ручных регулятора, а также привод источника нейтронов с ключом управления и указателем положения.

Программа физического пуска состояла из следующих основных этапов:

— набор минимальной критической загрузки

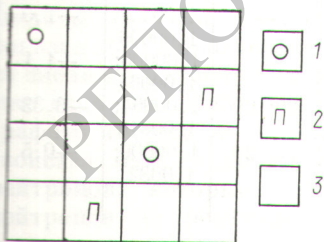


Рис. 1. Ячейка периодичности:

1, 2, 3 — ячейки со стержнем СУЗ; ДП и ТВС соответственно

без ДП и стержней штатной СУЗ (загрузка № 1);

— достройка зоны до максимального числа идентичных полячеек, так называемых ячеек периодичности (загрузка № 2, рис. 1);

— догрузка реактора до 1437 ТВС и 239 ДП;

— формирование исходной загрузки активной зоны с учетом опыта эксплуатации реактора первого блока;

— оценка запаса реактивности исходной загрузки и обеспечение требуемой продолжительности работы до первой перегрузки топлива;

— определение эффектов реактивности при обеспокоивании контуров МПЦ и охлаждения стержней СУЗ;

— измерение полей энерговыделения в холодном неостравленном реакторе;

— вывод реактора на минимально контролируемый штатной СУЗ уровень мощности.

Необходимость экспериментов (по сравнению с реактором первого блока) вызвана различием ряда технологических параметров, влияющих на физику реактора. В частности, к таким параметрам можно отнести плотность графита ($1,67 \text{ г/см}^3$ по сравнению с $1,73 \text{ г/см}^3$ на первом блоке), среднюю загрузку по ^{235}U на ТВС, различие в содержании бора в ДП и др. Сравнительные эксперименты в процессе загрузки позволили уже на начальном этапе физического пуска прогнозировать те изменения, которые необходимо провести в полной загрузке реактора, чтобы обеспечить требуемый запас реактивности и распределение поля энерговыделения.

Подготовка реактора к пуску. Перед началом загрузки ТВС и ДП проводились следующие операции:

— промыты и опрессованы контуры МПЦ и СУЗ;

— проведена обкатка всех главных циркуляционных насосов (ГЦН) и насосов контура СУЗ;

— при работе всех ГЦН в течение двух суток проведен разогрев контура МПЦ и графитовой кладки реактора до 150°C , после разогрева графитовая кладка была охлаждена до комнатной температуры;

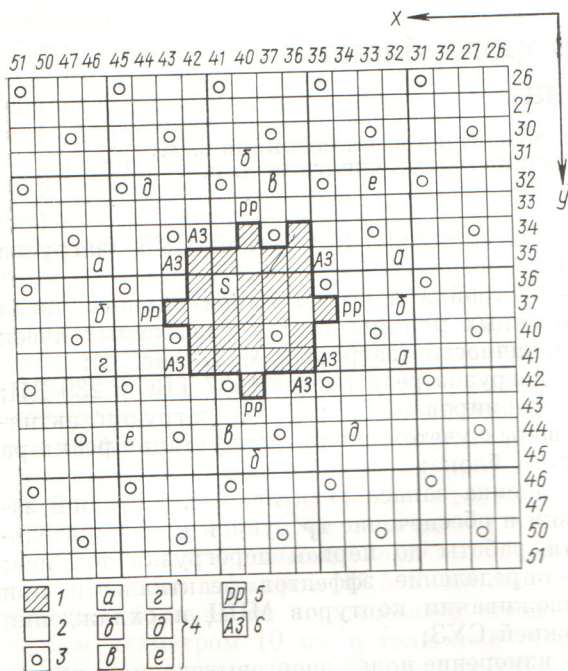


Рис. 2. Загрузка № 1 и схема размещения датчиков и стержней временной СУЗ:

1, 2 — ячейки с загруженными ТВС и незагруженными каналами; 3 — ячейки штатных стержней СУЗ; 4 — ячейки датчиков: а — гальванометров (Г-1, Г-2, Г-3), б — реактиметров (ПР-1, ПР-2), е — счетно-пусковых установок (СПУ-1, СПУ-2); S — самописца мощности (ЭППВ), δ — усилителей аварийной защиты (УА-9-1, УА-9-2), e — приборов аварийной защиты по скорости (УЗС-1, УЗС-2); 5, 6 — ячейки под стержни временной СУЗ; S — источников нейтронов

Некоторые результаты сравнительных экспериментов при физическом пуске реакторов первого и второго блоков ЛАЭС

Таблица 1

Состояние реактора												Разница в $K_{эф}$ при одинаковой компенсации, %
Но- мер за- грузки	ТВС		ДП		Наличие воды в контуре СУЗ в обоих блоках	Введенные в активную зону стержни СУЗ, шт.				$K_{эф}$		
	Количе- ство, шт.	Наличие воды в каналах	Количе- ство, шт.	Наличие воды в каналах		ПКАЗ *	РР	АР	УСП			
1	23; 24 **	Нет	—	Нет	Нет	—	—	—	—	1,0050; 1,00096	—1,0	
2	946	»	154	»	»	8; —	56; 56	4; —	—	1,00000; 1,00064	+1,1	
3	1437	Есть	239	Есть	»	13; 8	89; 89	12; 12	20; 20	1,00064; 1,00016	—0,33	
4	1452	»	239	»	Есть	10; 1	89; 85	9; 12	20; 20	1,00000; 1,0032	—0,5	

* ПКАЗ — стержни перекомпенсации; РР — стержни ручного регулирования; АР — стержни автоматического регулирования; УСП — укороченные стержни-поглотители.

** Здесь и далее первая цифра — для первого блока; вторая — для второго.

— сдана в эксплуатацию система контроля целостности технологических каналов (КЦТК);

— сданы в эксплуатацию штатная и временная СУЗ;

— подготовлена система поканального залива воды;

— организована оперативная громкоговорящая связь между центральным залом и блочным щитом управления (БЩУ);

— промыта и подготовлена к работе система заполнения контура МПЦ водой из бака аварийных питательных насосов (АПН);

— подготовлены для приема воды дренажные резервуары;

— принята в эксплуатацию система общеобменной и специальной вентиляции;

— собран полный комплект ДП с соотношением втулок из бористой стали и коррозионно-стойкой стали 3 : 1 в центральной части длиной 500 см и 1 : 2 на торцевых участках длиной до 100 см;

— собраны 100 ТВС и полный комплект ТВС с отверстиями под внутризонные датчики.

Загрузка реактора. Сравнительные эксперименты. При загрузке реактора его контроль и аварийная защита осуществлялись, как и на реакторе первого блока, приборами временной СУЗ при наличии в зоне источника нейтронов.

Первая критическая загрузка без ДП и стержней штатной СУЗ при отсутствии воды в контурах МПЦ и СУЗ содержала 24 ТВС (рис. 2)

и при извлеченных стержнях временной СУЗ имела $K_{эф} = 1,00096$ (23 ТВС и $K_{эф} = 1,0050$ для реактора первого блока). Дальнейшая загрузка реактора проводилась по ячейкам периодичности (12 ТВС, 2 ДП и 2 стержня СУЗ). После загрузки 77 ячеек периодичности (916 ТВС и 154 ДП) загрузка № 2 была выведена в критическое состояние. Далее было зафиксировано критическое состояние для загрузок, содержащих 1437 ТВС и 239 ДП и 1452 ТВС и 239 ДП. Аналогичные загрузки выводились в критическое состояние в реакторе первого блока. Для загрузки, содержащей 1437 ТВС и 239 ДП, с помощью реактиметра был измерен эффект реактивности от заполнения водой контура МПЦ, который, как и в реакторе первого блока, оказался равным $+1,9\beta$ *. Результаты сравнительных экспериментов, полученные в процессе физического пуска реакторов первого и второго блоков, приведены в табл. 1. Разница в эффективном коэффициенте размножения ($K_{эф}$) определялась следующим образом. Для обоих реакторов при выходе в критическое состояние была принята одинаковая последовательность извлечения стержней СУЗ. Измерив эффективность стержней СУЗ, составляющих разницу в положении компенсации, определяли различие в $K_{эф}$.

Из табл. 1 следует, что все исследованные загрузки реактора второго блока имеют меньшую реактивность. Разница в $K_{эф}$ колеблется от 0,33 до 1,1%.

Влияние различных параметров на реактивность. Структура активной зоны реактора второго блока в соответствии с программой физического пуска была определена идентичной активной зоне первого блока. Выявленные в процессе физического пуска второго реактора отличия потребовали проведения расчетов для оценки влияния отклонения различных параметров на размножающие свойства. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ отклонений от номинальных значений весовых характеристик топлива в ТВС, чистоты графита и содержания бора в ДП показал, что все эти факторы можно исключить из числа существенно влияющих на размножающие свойства. Напротив, изменение плотности графита влияет не только на размножающие свойства, но и на длину диффузии L и возраст τ нейтронов, которые определяют как утечку нейтронов из реактора, так и их перетечку к стержням СУЗ и ДП.

* Эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Влияние отклонения различных параметров на размножающие свойства активной зоны реактора РБМК

Таблица 2

Параметр	Номинальное значение параметра	Отклонение от номинального значения, принятое в расчете	$\Delta K_{\infty}/K_{\infty}, \%$
Обогащение урана	1,787%	$+0,01\%$	$+0,18$
Плотность топлива	9,30 г/см ³	$+0,1$ г/см ³	$+1,32$
Плотность графита	1,67 г/см ³	$+0,1$ г/см ³	$-0,31$ ($-7,1$ для $\Delta M^2/M^2$) **
Сечение поглощения графита	4,2 мб	$+0,1$ мб	$-0,13$
Содержание бора в ДП	2,0%	$+0,1\%$	$-0,02$

* Значения $\Delta K_{\infty}/K_{\infty}$ приведены для реактора с водой в контуре МПЦ.
** $M^2 = L^2 + \tau$.

Расчеты по программе QUAM-2 показали, что уменьшение плотности графита привело к следующим потерям реактивности для сравниваемых загрузок (см. табл. 1):

- загрузка № 1 $-0,96\%$ ($-1,0\%$);
- загрузка № 2 $-0,91\%$ ($-1,1\%$);
- загрузка № 3 $-0,33\%$ ($-0,33\%$);
- загрузка № 4 $-0,31\%$ ($-0,50\%$).

В скобках указаны экспериментальные значения. Таким образом, расчеты подтверждают, что уменьшение реактивности в реакторе второго блока в основном обусловлено уменьшением плотности графита. Однако согласно расчетам это не приводит к заметному изменению глубины выгорания ввиду увеличения воспроизводства плутония.

Формирование исходной загрузки реактора. Выявленное в реакторе второго блока уменьшение реактивности в основном скомпенсировано заменой 9 ДП на ТВС. Кроме того, осуществлена перестановка нескольких периферийных ДП, которые вызывали некоторые трудности при перегрузках в процессе эксплуатации реактора первого блока. В отличие от первого блока на периферии ДП были установлены в решетку стержней СУЗ, которые в этом районе расположены примерно вдвое реже, чем в центре активной зоны. Восемь каналов на перифе-

рии реактора было решено не загружать, так как согласно расчетам установка в них ТВС приводит к увеличению неравномерности энерговыделения.

В результате перестановок и перегрузок была сформирована исходная загрузка реактора второго блока: 1455 ТВС, 230 ДП и 8 незагруженных каналов. Критическое состояние исходной загрузки (контуры МПЦ и СУЗ заполнены водой) было достигнуто при введении в реактор 89 РР, 12 АР, 21 УСП и 10 ПКАЗ. Извлечены: 21 АЗ и 26 ПКАЗ. При таком положении стержней СУЗ $K_{эф} = 1,00077$, температура всех элементов активной зоны $\sim 20^\circ \text{C}$, мощность реактора $\sim 1,4 \text{ кВт}$.

Эксперименты на исходной загрузке реактора. Одна из задач физического пуска — определение основных физических характеристик реактора, необходимых для его дальнейшей эксплуатации. С этой целью в исходной загрузке реактора измерялись эффекты реактивности при обезвреживании контура охлаждения СУЗ, каналов с ТВС (оценка «парового» эффекта реактивности в холодном состоянии), контура МПЦ и при установке внутризонных датчиков контроля.

Одновременно определялись суммарные эффективности введенных стержней СУЗ (оценка запаса реактивности холодного неотравленного реактора) и извлеченных стержней СУЗ.

Все отрицательные эффекты реактивности измерялись реактиметром при введении реактивности в критический реактор. Эффективность введенных стержней СУЗ измерялась путем их последовательного извлечения из критического реактора. Если эффективность одиночного стержня превышала $0,3\beta$, то измерения проводились методом перекомпенсации. Обезвреживание контура СУЗ проводилось в подкритическом состоянии.

Относительное поле энерговыделения в исходной загрузке реактора измерялось малогабаритными камерами деления. Одновременно в измерениях участвовало пять независимых измерительных каналов, соответствующим образом скоммутированных. Измерения проводились в восьми точках по высоте в 144 ТВС, имевших в центре сухие каналы для камер деления. Качество относительных измерений, выполненных дважды в нескольких точках, имеет среднеквадратическую погрешность $1,6\%$. Абсолютный поток тепловых нейтронов Φ_T определялся по активации золотых фольг в кадмии и без него. Абсолютная мощность ТВС, в которой измерялся абсолютный поток тепло-

вых нейтронов, рассчитывалась из соотношения

$$W_T = \frac{\Phi_T \sqrt{T_0/T} \sqrt{\pi/4} \sigma_{0f}^5 N^5 k_p k_1}{3,4 \cdot 10^{10} k_T},$$

где T — температура нейтронов в месте расположения индикатора; $T_0 = 293 \text{ K}$; σ_{0f}^5 — сечение деления ^{235}U при $T = T_0$; N^5 — количество ядер ^{235}U в ТВС; k_p — коэффициент, учитывающий деление на резонансных нейтронах; k_1 — измеренное камерами деления отклонение среднего по высоте потока нейтронов от потока нейтронов в месте облучения золотого индикатора; k_T — отношение потока нейтронов в месте измерения к среднему потоку нейтронов в топливе.

Мощность реактора определялась по формуле

$$W_p = \frac{W_T \sum_{i=1}^n Q_i^a}{Q_T^a \sum_{i=1}^n Q_i^p} \sum_{i=1}^m Q_i^p,$$

где Q_i^a — измеренная камерой деления относительная мощность ТВС, абсолютная мощность которой определялась по активации золота;

$\sum_{i=1}^n Q_i^a$ — суммарная относительная мощность

ТВС, измеренная камерами деления; $\sum_{i=1}^n Q_i^p$;

$\sum_{i=1}^m Q_i^p$ — суммарные относительные мощности, рассчитанные для ТВС (n), в которых проводились измерения камерами деления, и всех ТВС (m) соответственно.

Все критические загрузки, а также измеренные поля энерговыделения обсчитывались по программам BOKR-COV и QUAM-2, поканально описывающим структуру активной зоны. Кроме того, по программе BOKR-COV обсчитывалась экспериментальная эффективность стержней СУЗ.

Программа BOKR-COV является развитием программ [2, 3], основанных на решении диффузионных уравнений реактора конечно-разностным способом в $x - y$ -геометрии (для поперечного сечения реактора). В программе реализовано решение двухгрупповых диффузионных уравнений реактора, состоящего из разнородных квадратных ячеек. Узлы расчетной сетки совпадают с центрами каналов. Расчетами экспериментов, выполненных на критических сборках, а также на реакторе первого блока ЛАЭС, было показано, что такое размещение расчетных узлов предпочтительнее, чем в углах элементар-

ных ячеек. В программе учитываются неравномерное отравление топлива ксеноном в зависимости от рассчитываемого распределения поля энерговыделения и выгорание топлива. Наличие в активной зоне регулирующих стержней и других неразмножающих каналов учитывается заданием соответствующих гомогенизированных свойств ячеек, в которых расположены эти поглотители и каналы. Частично введенные стержни заменяются полностью введенными стержнями, эквивалентными им по эффективности. Для эксплуатационных расчетов применяется модификация программы — программа BOKR-COBZ, в которой для учета частично введенных стержней СУЗ используются экспериментальные замеры высотного поля нейтронов датчиками системы физического контроля.

Программа QUAM-2 реализует новый метод расчета гетерогенных реакторов [4]. Реактор представляется в виде конечной решетки каналов (в $x - y$ -геометрии) в бесконечном замедлителе. Перенос нейтронов в замедлителе описывается двухгрупповыми диффузионными уравнениями типа Галанина — Фейнберга [5, 6], которые преобразуются к так называемой квазиальбедной форме, аналогичной конечно-разностной, и решаются итерационным методом. В результате машинное время на решение уравнений сокращается в 15—20 раз по сравнению с традиционным гетерогенным методом и составляет ~1,5 мин для расчета одного состояния реактора. Программа QUAM-2 позволяет рассчитать $K_{эф}$ и распределение мощности по каналам реактора с заданным положением полностью или частично введенных стержней СУЗ. Предусмотрена возможность учитывать стационарное отравление ксеноном и выгорание урана индивидуально для каждого канала. При вычислении $K_{эф}$ вносится поправка на аксиальную утечку нейтронов и неоднородность свойств по высоте реактора, а также поправка, учитывающая процессы, вызываемые замедляющимися нейтронами и обусловленные наличием неразмножающих каналов.

С помощью программы QUAM-2 и системы обеспечивающих программ проведены расчеты около 70 критических состояний (холодных и горячих отравленных и с выгоранием урана) реакторов первого и второго блоков ЛАЭС. Среднеквадратическая погрешность определения $K_{эф}$ составляет 0,5%, а максимальное отклонение не превышает 1%.

Сравнение расчетов по программам BOKR-COB и BOKR-COBZ с экспериментальными данными показывает, что расчеты удовлетворитель-

но предсказывают критичность различных состояний реактора. Для принятой системы нейтронно-физических констант расхождение в $K_{эф}$ не превышает 0,9%. Причем для полной загрузки оно не превосходит 0,5%, а с учетом высотного поля нейтронов (программа BOKR-COBZ) составляет всего 0,2%. Показано, что высотное распределение нейтронов заметно влияет на расчетное значение $K_{эф}$. При расчете с синусоидальным и измеренным распределением нейтронов различие в $K_{эф}$ доходило до 0,3%. Поэтому для более точного расчета $K_{эф}$ по программе BOKR-COBZ необходимо учитывать фактическое высотное распределение нейтронов. Рассчитанные для разных загрузок эффективности различных групп стержней СУЗ в основном хорошо согласуются с экспериментальными данными. Результаты экспериментов и расчетов некоторых эффектов реактивности и распределений нейтронов по активной зоне, выполненных для исходной загрузки реактора, представлены в табл. 3.

Экспериментальные и расчетные данные для исходной загрузки реактора Таблица 3

Определяемая величина	Эксперимент	Расчет
Эффект реактивности при:		
обезвоживании каналов с ТВС	—0,42%	—0,43%
обезвоживании каналов с ДП	—1,60%	—1,19%
обезвоживании контура МПЦ	—2,02%	—1,62%
обезвоживании контура СУЗ	Компенсируется введением 13 стержней СУЗ —0,006%	—
установке 117 датчиков контроля радиального поля нейтронов		—
Суммарная эффективность введенных стержней СУЗ	8,9%	7,3%
извлеченных стержней СУЗ	1,9%	1,6%
Коэффициент неравномерности:		
радиального поля нейтронов	2,04 *	1,94 *
высотного поля нейтронов	1,37	2,45 **

* Получено по ТВС, в которых проводились измерения камерами деления.

** Для всех ТВС реактора.

Сопоставление экспериментальных и расчетных полей энерговыделения по радиусу реактора, полученных по программам BOKR-COVZ и QUAM-2, показало совпадение места максимума поля; среднеквадратическая погрешность определения мощностей ТВС по обоим программам одинакова и составляет 9,7%.

После завершения экспериментов на исходной нагрузке в июле — августе 1975 г. осуществлен энергетический пуск второго блока ЛАЭС. Мощность блока наращивалась ступенями в соответствии с готовностью турбогенераторов. Первоначально на полную мощность 500 МВт был выведен третий турбогенератор, а затем введен в работу четвертый турбогенератор. 30 сентября 1975 г. подписан акт Государственной комиссии о сдаче второго блока Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина в промышленную эксплуатацию. На 10 октября 1975 г. в соответствии с программой освоения электрическая мощность второго блока составляла 750 МВт.

В процессе энергопуска были проверены и подтверждены основные решения, принятые по результатам физического пуска. В частности, по результатам измерения полей энерговыделения, скорости снижения реактивности при отравлении и выгорании урана была подтверждена правильность формирования исходной загрузки и создания необходимого запаса реактивности.

Выводы. В процессе физического пуска реактора второго блока ЛАЭС сформирована исходная загрузка реактора, выполнены эксперименты и расчеты, позволившие провести сравнение с результатами, полученными при пуске реактора первого блока:

1. Исходная загрузка реактора содержит 1455 ТВС и 230 ДП (восемь каналов оставлены незагруженными).

2. Между реакторами первого и второго блоков имеется некоторое различие, выразившееся в том, что аналогичные загрузки в реакторе второго блока обладают меньшей реактивностью. Уменьшение реактивности полной загрузки реактора (загрузка № 4) составило 0,5%. Это различие объясняется в основном меньшей плотностью графита в реакторе второго блока.

3. Обезвоживание 1455 каналов с ТВС и 230 каналов с ДП уменьшает реактивность на 2%.

4. Эффект реактивности при обезвоживании контура СУЗ положительный и компенсируется введением 13 стержней СУЗ.

5. Наибольшей реактивностью обладает реактор с заполненным водой контуром циркуляции и обезвоженным контуром СУЗ.

6. Обезвоживание каналов с 1455 ТВС приводит к уменьшению реактивности на 0,42%, что на 0,3% превышает аналогичный эффект в реакторе первого блока и свидетельствует о более отрицательном паровом эффекте реактивности на начальном этапе эксплуатации реактора.

7. Суммарная эффективность введенных стержней СУЗ составляет 8,9%.

8. Для вывода холодного неотравленного реактора с водой в контурах МПЦ и СУЗ в критическое состояние необходимо извлечь 47 стержней СУЗ, суммарная эффективность которых составляет 1,9%.

9. Сопоставление экспериментальных и расчетных полей энерговыделения по радиусу реактора, полученных по программам BOKR-COVZ и QUAM-2, показало, что среднеквадратическое расхождение измеренных и рассчитанных мощностей ТВС по обоим программам одинаково и составляет 9,7%.

Физический пуск реакторов первого и второго блоков ЛАЭС позволил накопить значительный экспериментальный материал по пуску реакторов типа РБМК. Учитывая возможность отклонения некоторых технологических параметров материалов активной зоны, целесообразно при пуске последующих блоков проводить сравнительные эксперименты для корректировки исходной загрузки и уточнения эксплуатационных характеристик реактора.

Поступила в Редакцию 13/XI 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. В сб.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития атомной энергетики. Т. II. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, с. 166.
2. Акимов И. С., Минашин М. Е., Шарапов В. Н. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 5, с. 427.
3. Емельянов И. Я. и др. [1], т. I, с. 81.
4. Городков С. С. Препринт ИАЭ-2251. М., 1973.
5. Фейнберг С. М. В сб.: Реакторостроение и теория реакторов. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 152.
6. Галанин А. Д. Там же, с. 191.