

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БАРС-6 – ДВАДЦАТЬ ЛЕТ НА СЛУЖБЕ ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

BARS-6 REACTOR OPERATION EXPERIENCE – TWENTY YEARS WORK FOR NUCLEAR PUMPED LASERS

П. П. Дьяченко, О. Ф. Кухарчук, П. П. Прокудин, Г. Н. Фокин, О. Г. Фокина
P. P. Dyachenko, O. F. Kukharchuk, P. P. Prokudin, G. N. Fokin, O. G. Fokina

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»

Joint Stock Company «State Scientific Centre of The Russian Federation –
Institute for Physics and Power Engineering Named After A. I. Leypunsky»

В докладе дано описание конструкции двухзонного импульсного реактора БАРС-6, приведены его основные нейтронно-физические и динамические характеристики, представлен обзор этапов модернизации реактора в составе реакторно-лазерного комплекса Стенд «Б», выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ к настоящему времени. Приведены основные результаты проведенных исследований лазеров с ядерной накачкой согласно этапам модернизации.

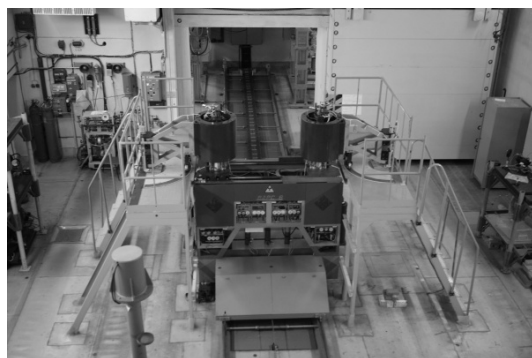
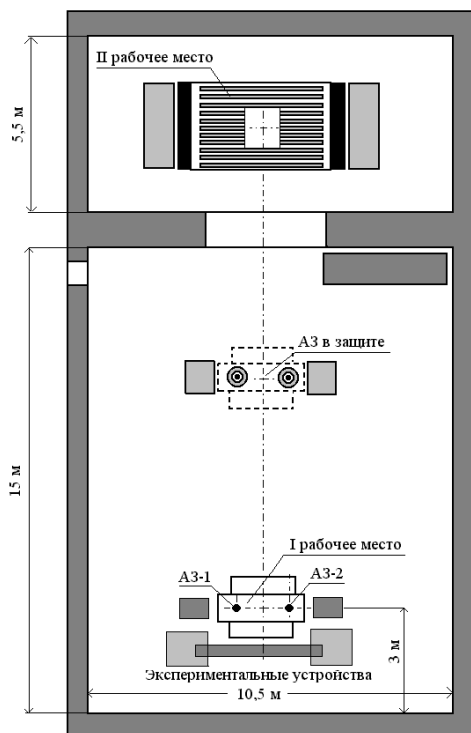
In this paper the twin-core pulsed reactor BARS-6 construction, its main neutronic and dynamic characteristics, review of the reactor modernization phases consisting of reactor-laser complex Facility «B», that are realized in SSC RF-IPPE, are presented. The main results of nuclear pumped laser experiments according to modernization phases are described.

Импульсный аperiodический двухзонный реактор на быстрых нейтронах БАРС-6 является базой реакторно-лазерного комплекса (РЛК) Стенд «Б» (ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск). Ввод в эксплуатацию РЛК, предназначенного, прежде всего, для исследования лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) импульсного действия, был осуществлен в конце 1994 года.

Работы по тематике ЛЯН были начаты в ГНЦ РФ-ФЭИ в 1981 году по инициативе профессора В. Я. Пупко и рассматривались как продолжение работ в области космической ядерной энергетики [1]. В этих исследованиях был необходим автономный, компактный, энергоемкий реакторный источник энергии с флюенсом быстрых нейтронов порядка 10^{13} – 10^{14} см⁻². Поэтому по просьбе сотрудников ГНЦ РФ-ФЭИ (1986 год) в РФЯЦ-ВНИИТФ был разработан аналог существующего реактора БАРС-5 под названием БАРС-6 [1-5]. По полученной документации реактор БАРС-6 был изготовлен и затем собран сотрудниками ГНЦ РФ-ФЭИ.

Реактор БАРС-6 имеет две одинаковые цилиндрические активные зоны (АЗ) диаметром ~226 мм и высотой ~232 мм, смонтированные на единой платформе и изготовленные из уран-молибденового сплава, закрытые защитным экраном из аморфного ¹⁰B толщиной 5 мм, заключенного в тонкостенную стальную оболочку. Общее количество ²³⁵U в каждой активной зоне 105 кг. Каждая АЗ реактора снабжена одинаковой системой регулирования реактивности. Вторая активная зона (АЗ2) реактора может перемещаться относительно АЗ1 так, что расстояние между их осями меняется в пределах 380–1500 мм. Возможность перемещать АЗ2 относительно АЗ1 позволяет в определенных пределах оптимизировать аксиальные распределения потока нейтронов, падающего на облучаемый объект, в зависимости от его длины.

В реакторном зале РЛК реактор БАРС-6 перемещается по рельсовому пути к одному из двух оборудованных рабочих мест или к биологической защите (рис. 1), в которую помещаются АЗ во время работ в реакторном зале при подготовке экспериментов.



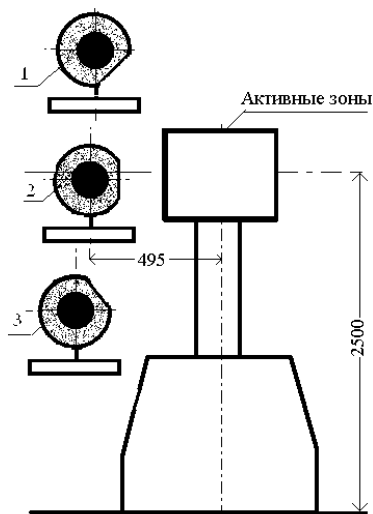
a

б

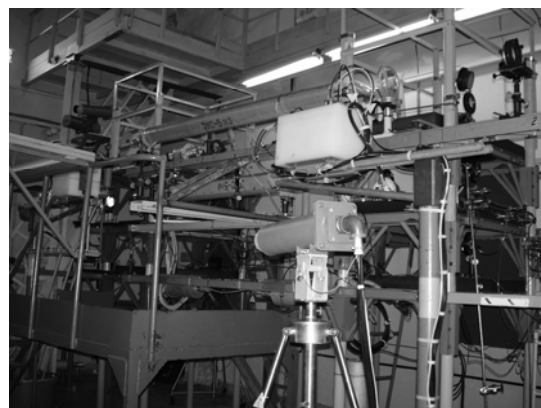
Рис. 1. Схема расположения оборудования в реакторном зале РЛК Стенд «Б» (*a*) и внешний вид реактора БАРС-6 в биологической защите (*б*)

На первом рабочем месте (I РМ) реактор используется для облучения потоком нейтронов и γ -квантов (как в импульсном, так и в стационарном режиме) различных образцов, экспериментальных устройств, отдельных лазерно-активных элементов (ЛАЭЛ), расположенных как в непосредственной близости от реактора, так и различных точках реакторного зала. На втором рабочем месте (II РМ) реактор БАРС-6 используется как запальная система для реакторно-лазерной установки – оптического квантового усилителя с ядерной накачкой [1–4].

В экспериментах по тематике ЛЯН на I РМ ЛАЭЛ как правило располагаются на трех ярусах экспериментального участка Стенда «Б» в блоках нейтронного замедлителя (рис. 2).



a



б

Рис. 2. Схема (*a*) и внешний вид (*б*) первого рабочего места Стенда «Б» (1, 2, 3 – лазерно-активные элементы в полиэтиленовом замедлителе)

Замедлитель нейтронов изготовлен в виде цилиндра длиной 2500 мм и диаметром 160 мм, по оси которого имеется канал диаметром 50 мм, в котором располагается лазерно-активный элемент. Снаружи замедлитель облицован листовым кадмием толщиной 0,5 мм с целью снижения влияния этого экспериментального устройства на реактор. Со стороны, обращенной к реактору, с замедлителя удален сегмент высотой 25 мм, так что в этом направлении толщина замедлителя составляет 30 мм. Внутри замедлителя формируется спектр нейтронов промежуточных энергий. Среднее сечение деления ^{235}U в покрытии ЛАЭЛ составляет 180 барн (расчет), а число делений в тонком урановом детекторе внутри замедлителя в 53 раза больше числа делений на его поверхности.

Для расширения возможностей облучения на реакторе специальных образцов в начале 2015 года была разработана и установлена на I РМ плита для их крепления (рис. 3).

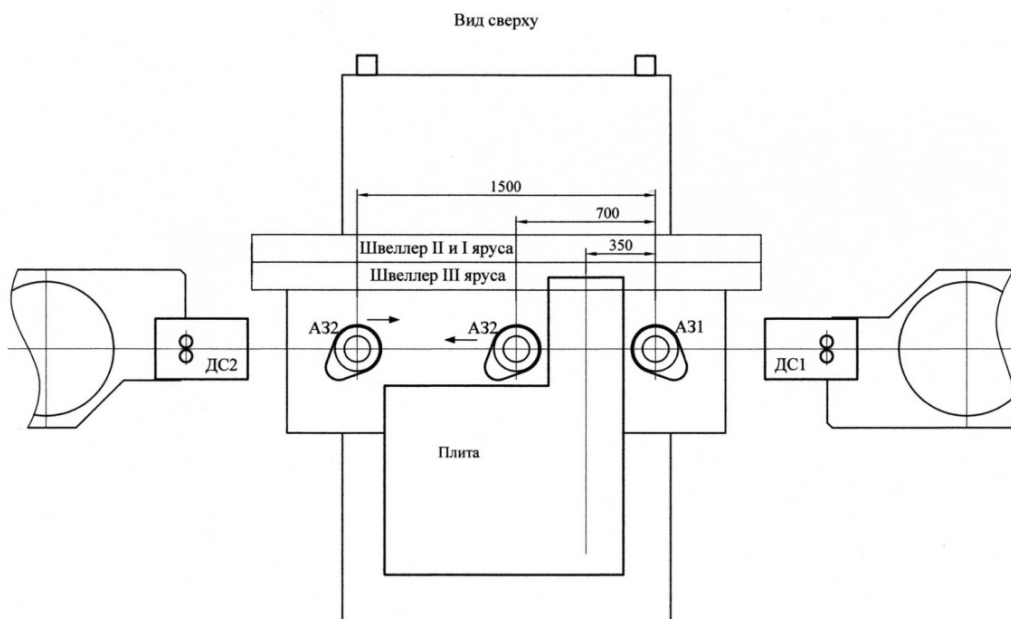


Рис. 3. Плита для крепления образцов при n,γ -облучении от реактора БАРС-6.

Основные энергетические характеристики реактора БАРС-6 при работе на первом рабочем месте следующие: энерговыделение в отдельной АЗ для штатного режима работы $\leq 2 \cdot 10^{17}$ дел. (~ 6 МДж), в пределах безопасной эксплуатации $\leq 2.5 \cdot 10^{17}$ дел. (~ 8 МДж); длительность импульса на полувысоте 50–100 мкс; флюенс быстрых нейтронов на внешней боковой поверхности борного экрана (при энерговыделении в отдельной АЗ $2 \cdot 10^{17}$ дел.) $2 \cdot 10^{14}$ н/см², доза γ -излучения ~ 200 Гр.

Трехзонная реакторно-лазерная установка Стенда «Б» (второе рабочее место реактора – II РМ) состоит из двух существенно различных модулей (блоков) (рис. 4): запального блока на основе импульсного реактора БАРС-6 и подкритического лазерного блока (ЛБ).

Лазерный блок представляет собой урансодержащую глубоко подкритическую систему цилиндрической формы с промежуточным спектром нейтронов. Он состоит из лазерно-активных элементов или их нейтронно-физических имитаторов, которые устанавливаются в ЛБ по правильной треугольной решетке с шагом 51 мм, и элементов межтрубного замедлителя нейтронов (полиэтилен). В системе может быть установлен как внешний, так и внутренний отражатель нейтронов. В нижней части ЛБ имеет специальную продольную полость для размещения активных зон реактора БАРС-6. Использование имитаторов исключительно важно, так как позволяет моделировать все нейтронно-физические характеристики ЛБ и увеличивать выходную энергию лазерного излучения простой заменой имитаторов на штатные ЛАЭЛ. К настоящему времени (март 2015 года) собрано и исследовано 22 различных картограмм ЛБ (см. ниже).

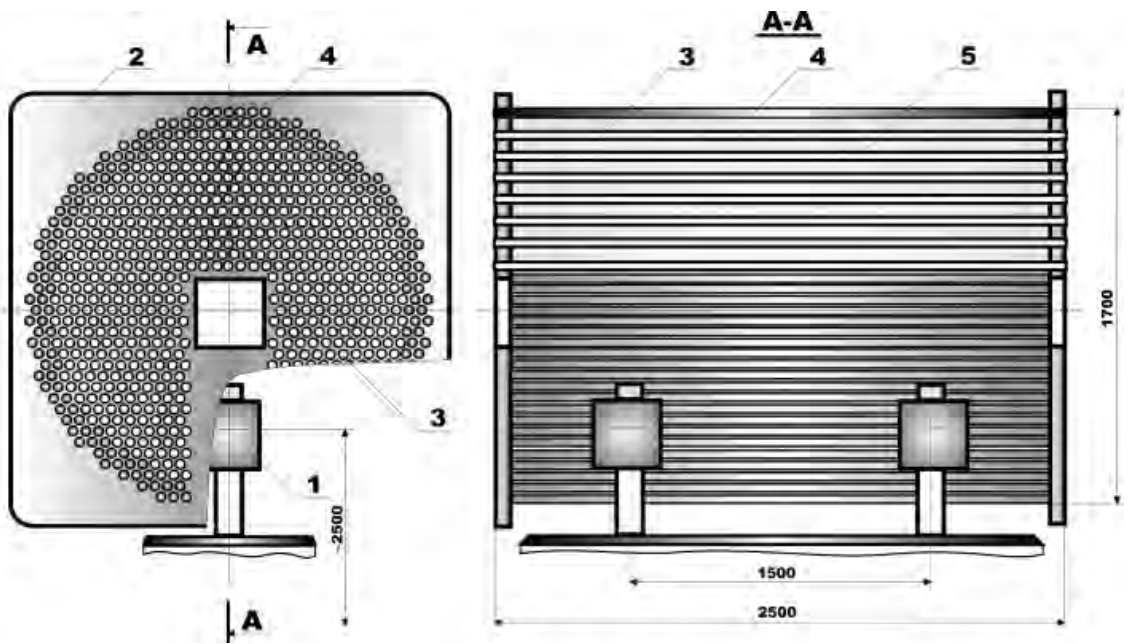


Рис. 4. Схема трехзонной связанной реакторной системы Стенда «Б»: 1 – активные зоны реактора БАРС-6; 2 – лазерный блок; 3 – лазерно-активные элементы (или их имитаторы); 4 – отражатель нейтронов; 5 – межтрубный замедлитель нейтронов

Первый энергетический импульс на реакторе БАРС-6 был выполнен 27.09.95. В постоянную эксплуатацию и в полном объеме РЛК Стенд «Б» был введен с 07.06.99. Основные этапы и сроки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные этапы и сроки ввода в эксплуатацию РЛК Стенд «Б»

Этапы и события	Сроки
I очередь (I РМ)	
1. Физический пуск (мощность $A3 \leq 100$ Вт)	27.12.94–20.04.95
1.1 Сборка АЗ1	29.12.94–18.01.95
1.2 Сборка АЗ2	10.02.95–02.03.95
1.3 Измерение эффективностей и калибровочных характеристик органов регулирования реактивностью	10.03.95–20.04.95
2. Энергетический пуск (мощность АЗ в статических режимах ≤ 10 кВт, энерговыделение в импульсе $\leq 2 \cdot 10^{17}$ дел/АЗ)	13.07.95–29.02.96
2.1 Импульс №1 на АЗ1	27.09.95
3. Эксплуатация	07.06.96–30.06.97
II очередь (I РМ+II РМ)	
1. Физический пуск	15.01.98–02.06.98
2. Энергетический пуск	13.07.98–04.06.99
2.1 Импульс №76 – первый импульс на II РМ	17.07.98
3. Эксплуатация	07.06.99–н/в

Более подробное описание конструкции реактора БАРС-6, результаты измерения его нейтронно-физических характеристик и результаты многочисленных экспериментов, в первую очередь с лазерно-активными элементами (ЛАЭЛ) на первом рабочем месте и в составе лазерного блока различной конфигурации приведены в работах [3-9].

Особенностью генерации импульсов в реакторе БАРС-6 является генерация «с мощности». В этом режиме реактор выводится на мощность ~ 5 Вт, на котором он работает не менее пяти минут для накопления внутреннего источника нейтронов. Затем в реактор вводится с большой скоростью нужная реактивность, переводящая реактор в надкритическое на мгновенных нейтронах состояние. В этом случае гарантируется детерминированное развитие цепного процесса, обеспечивая тем самым безопасную работу реактора. Большая скорость ввода реактивности необходи-

ма для того, чтобы импульс успел развиваться до разогрева активных зон и снижения реактивности за счет температурного эффекта. Генерация импульса производится «выстрелом» регулятора реактивности из одной активной зоны. Это не препятствует, однако, синхронному формированию импульса как в одной (ведущей), так и в другой (ведомой) активных зонах за счет быстрого «обмена» нейтронами между активными зонами.

Уровень энерговыделения в импульсе по каждой активной зоне измеряется в течение долей секунды после импульса по быстрым термопарам. Спустя примерно двое суток энерговыделение определяется по активации никелевых детекторов, установленных ранее в карманы каждой активной зоны. Форма импульса измеряется в каждой активной зоне токовым каналом с вакуумированной камерой деления в качестве детектора нейтронов, 4-х диапазонным усилителем и АЦП (рис. 5). Затем по специальной программе рассчитываются характеристики импульса: максимальная амплитуда, ширина на половине высоты, положение пика импульса относительно окончания ввода заданной реактивности, период разгона, мощностной коэффициент реактивности, время жизни мгновенных нейтронов и частота колебаний активной зоны [10].

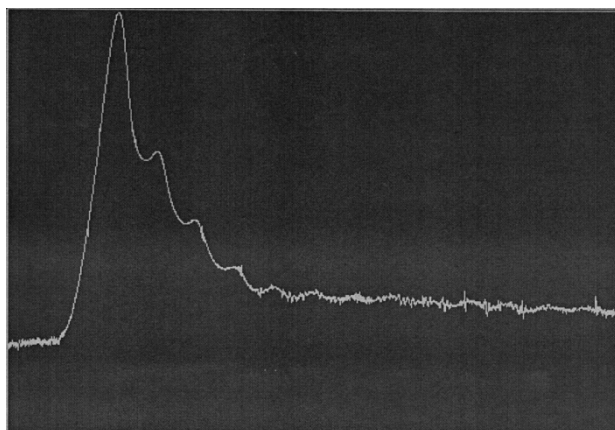


Рис. 5. Запись формы импульса на первом рабочем месте

По состоянию на 26.02.2015 на реакторе БАРС-6 проведена генерация 909-ти импульсов (в том числе 18-ти импульсов на одной активной зоной). Данные по наработке реактора за этот период приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наработка реактора с 27.09.1995 по 26.02.2015

Параметр	A31	A32
Число импульсов (I+II) РМ, шт. II РМ, ЛБ на НУ, шт.	909 144	891 144
Энерговыделение (I+II) РМ, дел. II РМ, ЛБ на НУ, дел.	$907.10 \cdot 10^{17}$ $193.19 \cdot 10^{17}$	$876.67 \cdot 10^{17}$ $192.47 \cdot 10^{17}$
Эффективное число номинальных импульсов ($E=2 \cdot 10^{17}$ дел./имп. на одну АЗ) (I+II) РМ, шт. II РМ, ЛБ на НУ, шт.	453.5 96.60	437.3 96.24
Флюенс нейтронов в центре АЗ (I+II) РМ, н/см ² II РМ, ЛБ на НУ, н/см ²	$462.55 \cdot 10^{15}$ $98.53 \cdot 10^{15}$	$446.0 \cdot 10^{15}$ $98.15 \cdot 10^{15}$

По результатам генерации импульсов получены нейтронно-физические и динамические параметры реактора БАРС-6 на I РМ, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Нейтронно-физические и динамические параметры реактора БАРС-6 на I РМ

Наименование параметра	Значение
Мощностной коэффициент гашения реактивности, МКР, γ , цент/дел.	$11.20 \cdot 10^{-17}$
Время жизни мгновенных нейтронов, $\ell_{\text{МГН}}$, с	$1.90 \cdot 10^{-8}$
Частота колебания А31, ω , кГц	25.13
Частота колебания А32, ω , кГц	25.17

Как уже отмечалось выше (рис.4), на базе РЛК Стенд «Б» (II РМ) создан энергетический макет оптического квантового усилителя с ядерной накачкой (ОКУЯН) [13-15] – трехзонная реакторно-лазерная установка импульсного действия, относящаяся к так называемым системам связанного типа [16].

К настоящему времени (февраль 2015 года) собрано и исследовано 22 различных конфигураций (картограмм) лазерного блока, значительно отличающихся друг от друга. Основные картограммы ЛБ приведены на рис. 6–8. Основной задачей такой модернизации системы был поиск оптимальных условий накачки лазерно-активной среды в объеме ЛБ.

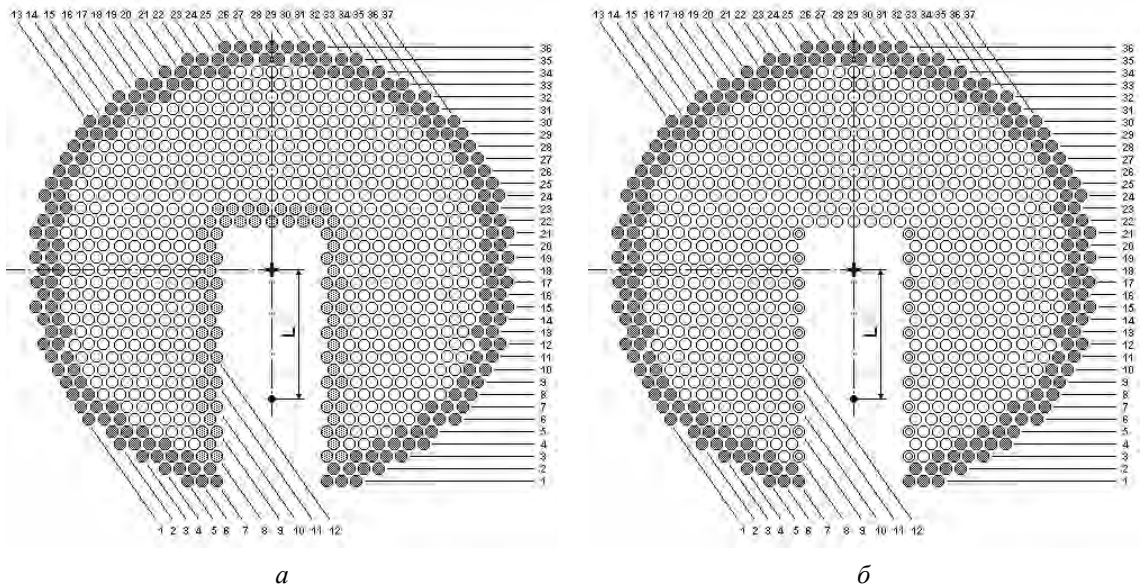


Рис. 6. Картограммы лазерного блока № 4 (а) и №7 (б): \bigcirc – имитаторы ЛАЭЛ; \bullet – элементы внешнего отражателя нейтронов; \odot – элементы внутреннего отражателя нейтронов; \oplus – алюминиевые трубы; \oplus – центр активной зоны реактора; \oplus – центр ЛБ; $L = 475$ мм.

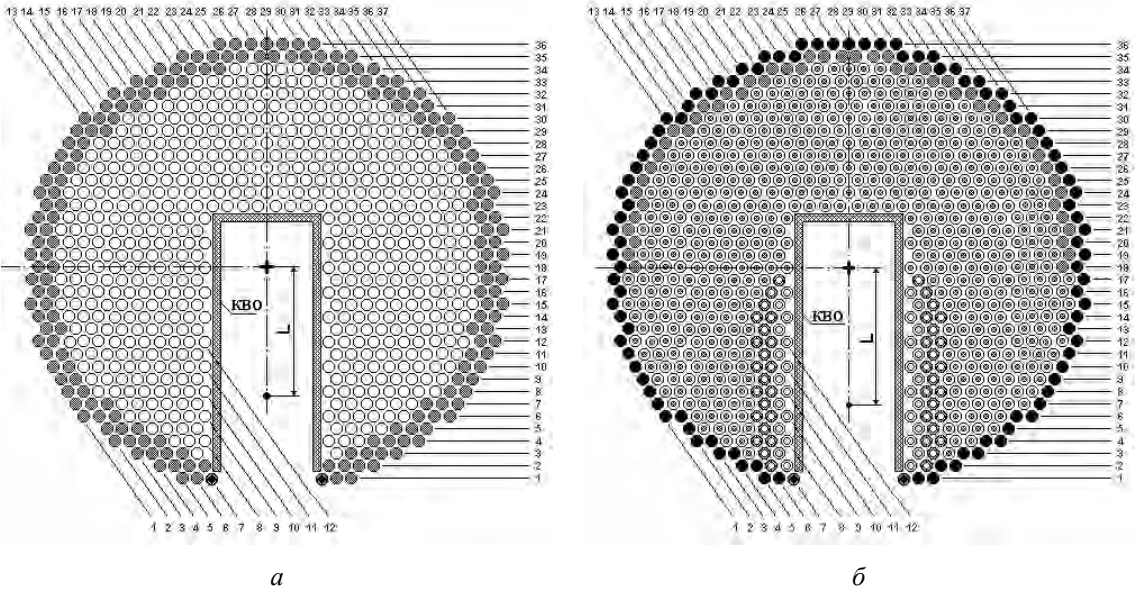


Рис. 7. Картограммы лазерного блока №13 (а) и №18 (б) с внутренним коробчатым отражателем нейтронов (КВО): ○ – имитаторы ЛАЭЛ; ⊗ – имитаторы ЛАЭЛ с полиэтиленовым стержнем; ● – элементы внешнего отражателя нейтронов; ● – элементы внешнего отражателя нейтронов из графита; ● – элементы внешнего отражателя нейтронов из полиэтилена; ⊙ – алюминиевые трубы; ⊙ – стальные трубы; ⊙ – опорная труба КВО; ● – центр АЗ реактора; + – центр ЛБ; L = 475 мм.

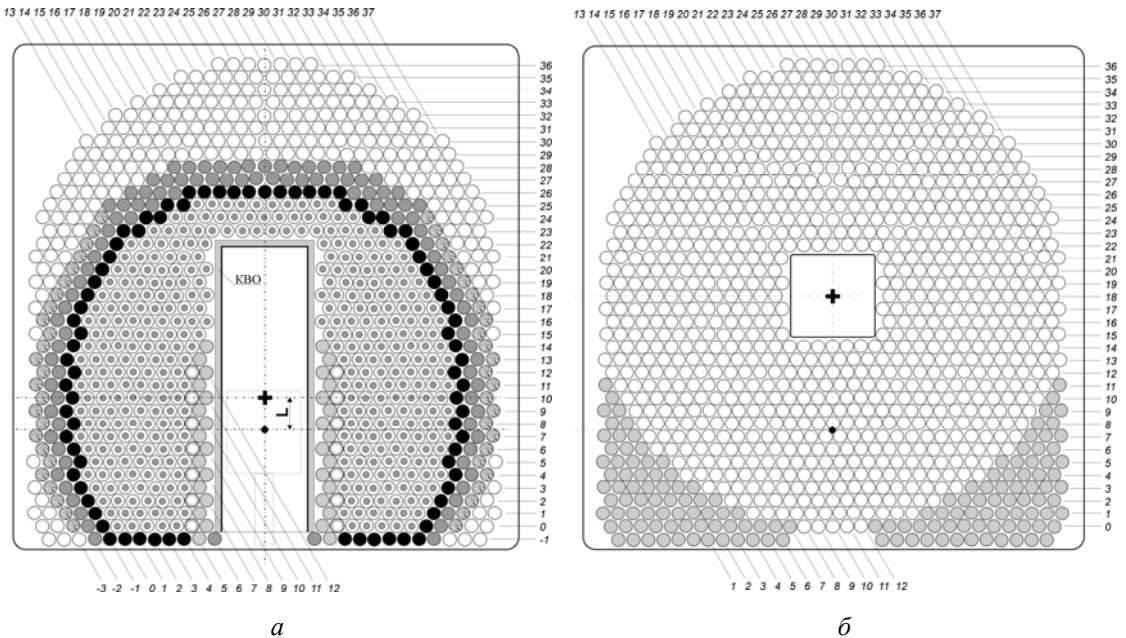


Рис. 8. Картограмма лазерного блока № 21 (а) и опорная плита ЛБ для этой конфигурации (б; дополнительные отверстия на опорной плите обозначены темным цветом): ⊙ – имитатор с полиэтиленовым стержнем; ⊙ – каналы увеличения мощности; ● – элемент внешнего отражателя нейтронов с графитовым наполнителем; ● – элемент внешнего отражателя нейтронов с парафиновым наполнителем; ● – элемент внутреннего отражателя нейтронов с полиэтиленовым наполнителем; ⊙ – алюминиевая труба; + – геометрический центр ЛБ; ● – центр АЗ реактора БАРС-6; L = 112,5 мм.

Изначально (после физического и энергетического пусков установки) для проведения исследований по тематике ЛЯН были выбраны две картограммы ЛБ: № 4 (с внутренним отражателем нейтронов) и № 7 (без внутреннего отражателя нейтронов) [7]. В процессе расчетно-

экспериментальных работ с этой конфигурацией системы были решены следующие задачи [7, 11, 16]: 1) разработаны аппаратура и методы экспериментального исследования ЛБ; 2) измерены поля энерговыделения по объему ЛБ; 3) измерены $K_{эфф}$, активная и пассивная составляющие эффективности ЛБ; 4) разработано специальное теоретическое и программно-методическое обеспечение для анализа процессов в установке, проведено детальное сравнение с результатами экспериментов, показано, что результаты расчетов совпадают с экспериментом в пределах 10%; 5) проведены первые эксперименты по ЛЯН в составе ЛБ энергетического макета ОКУЯН.

Вместе с тем, из анализа полученных результатов стала очевидной необходимость дальнейшей оптимизации лазерного блока с целью улучшения параметров накачки лазерно-активной среды в ЛАЭЛ ЛБ.

Оптимизация конструкции лазерного блока проводилась в несколько этапов. Сначала решалась задача по увеличению энергетики ЛБ с сохранением значения мощности в максимуме импульса, как при картограмме № 4, и выравниванию поле энерговыделения без изменения его геометрических размеров и изотопного состава. Результаты расчетных исследований показали, что для решения данной задачи наиболее простым является установка вместо внутреннего отражателя (см. картограмму ЛБ № 4) специального коробчатого внутреннего отражателя нейтронов (КВО; картограмма ЛБ №13) [6].

КВО представляет из себя два короба из полиэтилена толщиной 20 мм, облицованных листовым кадмием, каждый из которых окружает отдельную АЗ реактора БАРС-6. В каждом коробе КВО есть два «окна» размером 15×20 см, направленные на блок детектирования и другую АЗ.

В дальнейшем в этой конфигурации лазерного блока часть имитаторов ЛАЭЛ была заменена на пустые трубы, внутрь каждого имитатора был установлен полиэтиленовый стержень диаметром 20 мм для смягчения спектра нейтронов, внешний отражатель нейтронов был набран из алюминиевых труб, заполненных графитом и в верхней части ЛБ был установлен дополнительный отражатель нейтронов с парафиновым наполнителем для (картограмма ЛБ №18).

Однако, для проведения экспериментов по накачке лазеров, имеющих относительно высокий порог генерации, необходимо было еще улучшить динамические показатели установки.

В результате проведенного комплекса расчетно-теоретических исследований была создана картограмма лазерного блока №21 [9]. В этом варианте расстояние между центром АЗ реактора БАРС-6 и геометрическим центром ЛБ (L на рис. 8) равно 112,5 мм. Для получения необходимого расстояния между центром ЛБ и центром АЗ насверлены дополнительные отверстия в дистанционирующих (опорных) плитах лазерного блока. На периферии ЛБ установлены специальные каналы увеличения мощности (КУМ), содержащие делящееся вещество.

В этой конфигурации системы согласно полученным данным мощность накачки в объеме штатных ЛАЭЛ увеличилась в 1,8 раз, а распределение поля делений стало более равномерно по объему ЛБ.

Основные результаты экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик реакторно-лазерной установки различной конфигурации приведены в таблице 4, где $E_{лб}/E_{р-р}$ – отношение энерговыделения в лазерном блоке к энерговыделению в реакторе.

В качестве примера на рис. 9 показано временное поведение «удельной» (средней по объему – \bar{N}_b) мощности лазерного блока (a) различной конфигурации при энерговыделении в отдельной АЗ реактора $\sim 1.8 \cdot 10^{17}$ дел.

Таблица 4

Основные параметры ЛБ разной конфигурации

№ п/п	Параметр	Картограмма ЛБ				
		№ 4	№ 7	№ 13	№ 18	№ 21
1	Загрузка U-235, кг	22,438	24,849	24,542	22,935	24,063
2	Внутренний отражатель, мм	82	–	20 мм КВО	20 мм КВО	20 мм КВО
3	$K_{эфф}$ ЛБ	0,62	0,72	0,7	0,74	0,60
4	$E_{лб}/E_{р-р}$	0,26	0,54	0,47	0,42	0,54
5	L , мм	475	475	475	475	112,5
6	Активная составляющая эффективности ЛБ, $\beta_{эфф}^*$	0,23	0,87	0,49	0,27	0,33

* – $\beta_{эфф} = 0,0069$

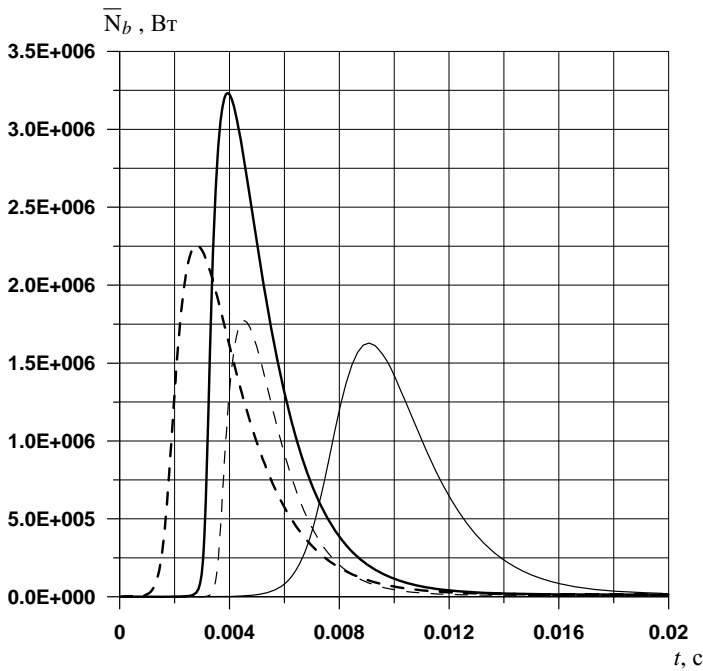


Рис. 9. Временное поведение «удельной» мощности лазерного блока в системе разной конфигурации:
 ————— картограмма ЛБ № 4; картограмма ЛБ № 7; - - - - - картограмма ЛБ № 18;
 ————— картограмма ЛБ № 21

Для дальнейшего уменьшения длительности импульса мощности в компонентах реакторно-лазерной системы предложен и реализован на практике принудительный сброс блоков безопасности (ББ) реактора БАРС-6 при генерации импульса за счет теплового удара. Более ранний сброс ББ, своего рода режим «модуляции» реактивности, позволяет сократить длительность импульса в ЛБ в 1,5–2,5 раза. Это приводит практически к двукратному увеличению мощности накачки лазерно-активной среды в объеме ЛБ.

В этом режиме при подготовке к импульсу ББ сначала упирают в борт опорной трубы реактора, а затем отводят на 0,05–0,09 мм. Сброс ББ происходит после достижения пика импульса. Для осуществления такого способа генерации импульса была изменена комплектация АЗ реактора за счет замены топливных колец и перестановки вкладышей с целью уменьшения запаса реактивности реактора, при этом эффективность органов СУЗ реактора изменилась незначительно.

В табл. 5 приведены некоторые динамические параметры реакторно-лазерной установки, полученные по результатам генерации импульсов с максимально реализованным энерговыделением в реакторе БАРС-6, где: $E_{\text{реактор}}$ – энерговыделение в реакторе; $E_{\text{ЛБ}}$ – энерговыделение в лазерном блоке; $N_{\text{ЛБ}}^{\text{max}}$ – усредненная по объему мощность ЛБ в максимуме импульса; $T_{1/2}^{\text{ЛБ}}$ – усредненная по объему длительность импульса в ЛБ на полувысоте импульса.

Таблица 5

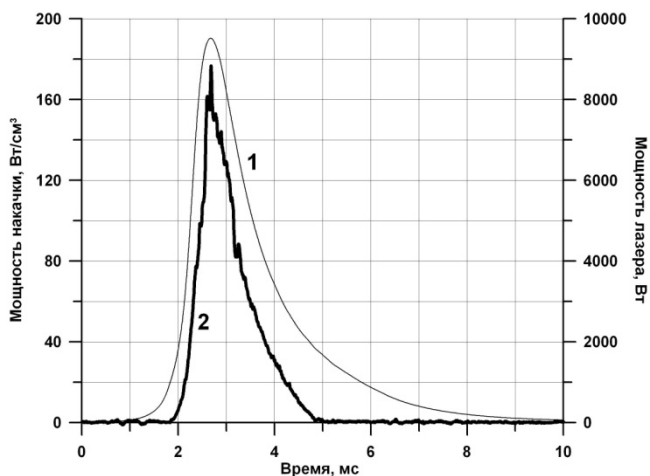
Динамические параметры импульсов в ЛБ разной конфигурации

№ п/п	Параметр	Картограмма ЛБ				
		№ 4	№ 7	№ 13	№ 18	№ 21
1	$E_{\text{реактор}}$, МДж	10,32	12,58	10,55	11,74	11,81
2	$E_{\text{ЛБ}}$, МДж	2,48	7,42	4,96	5,52	6,73
3	$N_{\text{ЛБ}}^{\text{max}}$, МВт	$1,15 \cdot 10^3$	$0,55 \cdot 10^3$	$0,89 \cdot 10^3$	$1,49 \cdot 10^3$	$2,25 \cdot 10^3$
4	$T_{1/2}^{\text{ЛБ}}$, мс	1,6	10,0	5,0	2,5	1,8
5	Сброс ББ от теплового удара (ТУ)	нет	нет	нет	нет	есть

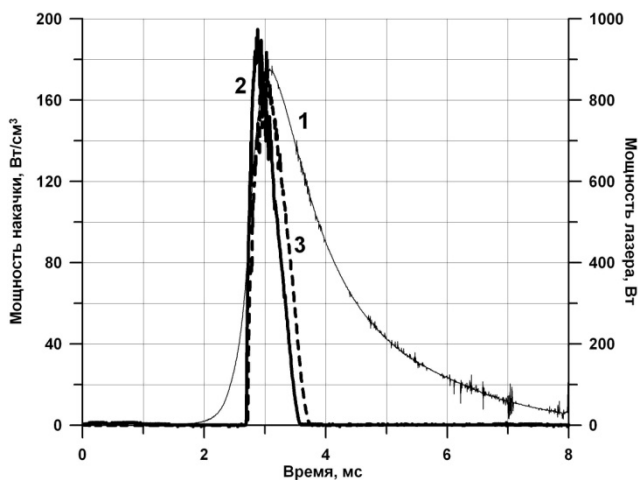
В условиях накачки, которые были реализованы в лазерном блоке последней конфигурации, при генерации реактором БАРС-6 нейтронных импульсов с энерговыделением в отдельной активной зоне до $2 \cdot 10^{17}$ дел. был получен ряд важных практических результатов, которые позволяют говорить о перспективности направления лазеров с ядерной накачкой.

В качестве лазерно-активных сред в этих экспериментах в основном использовались газовые смеси. В частности, в лазерно-активной среде He-Ar-Xe была получена генерация на переходе атома Xe с длиной волны 2,03 мкм. Энергосъем лазерного излучения с одного ЛАЭЛ составил ~ 10 Дж (рис.10а). На переходах 1-ой отрицательной системы азота в смеси He-N₂-H₂ была получена лазерная генерация с длиной волны 391,4 и 428,1 нм (рис. 10б). Энергосъем лазерного излучения при этом составил до 1 Дж с одного ЛАЭЛ.

Для демонстрации энергетических и мощностных возможностей лазерных излучателей с ядерной накачкой в объеме лазерного блока реакторно-лазерной установки Стенда «Б» был создан экспериментальный многоэлементный (7 ЛАЭЛ) лазерный канал (рис. 11).

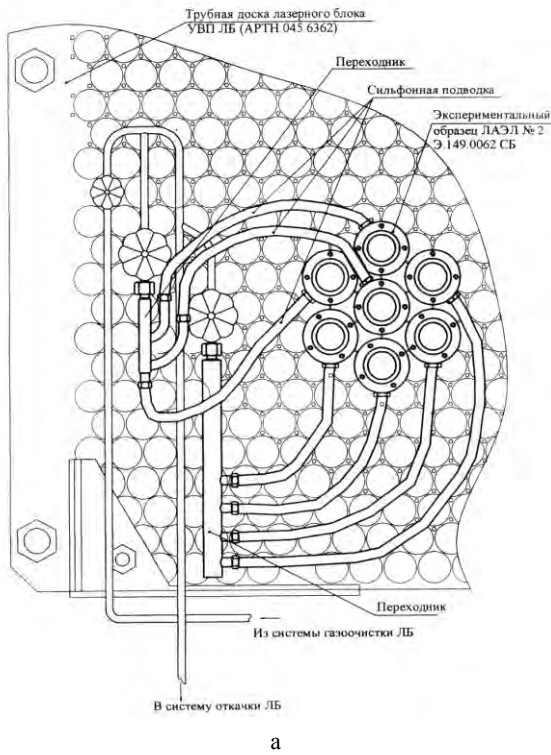


а

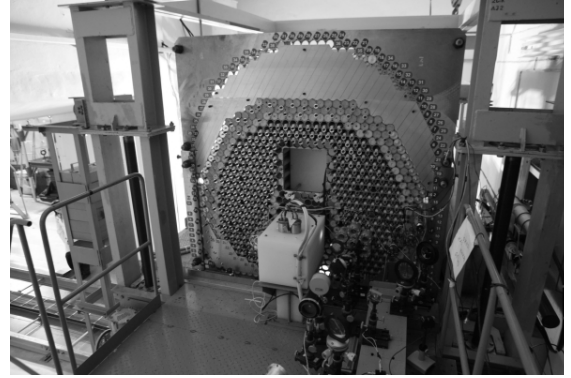


б

Рис. 10. Мощность накачки (1) и лазерной генерации (2, 3) на переходе атома Xe с длиной волны 2,03 мкм в газовой смеси He-Ar-Xe (а) и в смеси He-N₂-H₂ на переходах 1-ой отрицательной системы азота с длиной волны 391,4 и 428,1 нм (б) в единичном ЛАЭЛ



а



б

Рис. 11. Конструкция (а) и внешний вид (б) многоэлементного лазерного канала в объеме ЛБ реакторно-лазерной установки Стенда «Б»

В режиме свободной генерации на переходе атома Хе с длиной волны 2.03 мкм (He-Ag-Xe смесь) при использовании в канале общего для всех ЛАЭЛ резонатора в условиях подкритического лазерного блока, управляемого нейтронным потоком запального реактора БАРС-6, была получена суммарная энергия лазерного излучения на выходе из канала, равная 43 ± 2 Дж при пиковой мощности излучения более 40 кВт (рис. 12).

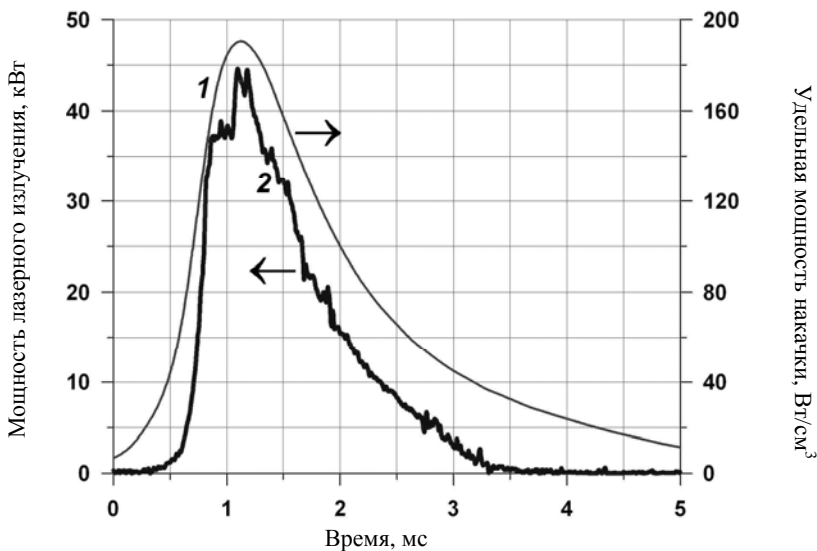


Рис. 12. Удельная мощность накачки (1; усреднено по всем ЛАЭЛ канала) и суммарная мощность по всему каналу лазерной генерации на переходе 2.03 мкм (2) в ЛБ реакторно-лазерной системы Стенда «Б»

В заключение следует отметить, что опыт эксплуатации реактора БАРС-6 позволил сформулировать предложения по созданию более эффективного запального реактора для работы с лазерным блоком ОКУЯН [18,19].

Успешная работа реактора БАРС-6, реакторно-лазерного комплекса Стенд «Б» на протяжении 20 лет стала возможной благодаря самоотверженной, многолетней работе коллективов, работающих в ГНЦ РФ-ФЭИ и в РФЯЦ-ВНИИТФ. Выражаем огромную благодарность сменному персоналу РЛК, сотрудникам научных лабораторий: «Технической физики» и «Атомных возбуждений» ГНЦ РФ-ФЭИ, сотрудникам РФЯЦ-ВНИИТФ и в особенности Снопкову Альберту Александровичу, который лично провел первый выход реактора в критическое состояние и передал ценнейший опыт эксплуатации таких реакторных установок.

Список литературы

1. Дьяченко П. П., Зродников А. В. Исследования Государственного научного центра РФ – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского по проблеме лазеров с ядерной накачкой // Труды конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. ЛЯН-ИР-2007» (г. Обнинск, 18–21 сентября 2007 г.). г. Обнинск: 2009. Т. 1. С. 1–16.
2. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ / Под ред. Лукина А.В.. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.
3. 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. 1994. Вып. 2. Импульсные реакторы и простые критические сборки. С. 3–12.
4. Дьяченко П. П., Еловский О.А., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Якубов П. А. (ГНЦ РФ-ФЭИ) Снопков А.А. (РФЯЦ-ВНИИТФ) Реакторно-лазерный комплекс «Стенд Б» // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 5. С. 337–342.
5. Дьяченко П. П., Еловский О. А., Прокудин П. П., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Якубов П. А. Опыт эксплуатации реактора Стенда «Б» // Избранные труды ФЭИ. 2000. С. 69–74.
6. Дьяченко П. П., Еловский О. А., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Якубов П. А. (ГНЦ РФ-ФЭИ), Снопков А. А. (РФЯЦ-ВНИИТФ) Реакторно-лазерный комплекс Стенд «Б». Результаты нейтронно-физических исследований реакторной системы // Препринт ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск. 2000. № 2809.
7. Бережной К. В., Дьяченко П. П., Еловский О. А., Кухарчук О. Ф., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Якубов П. А. Результаты расчетных и экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик реакторно-лазерного комплекса с импульсным исследовательским реактором БАРС-6 // Препринт ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск. 2004. № 3009.
8. Дьяченко П. П., Еловский О. А., Кухарчук О. Ф., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Фокина О. Г., Якубов П. А. Модернизация конструкции реакторно-лазерной системы с целью получения более оптимальных условий импульса накачки // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии (г. Саров, 21–24 марта 2006 г.). г. Саров: 2006. С. 411–418.
9. Еловский О. А., Кухарчук О. Ф., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Щукин А. Н. Условия генерации лазерного излучения на рабочих местах Стенда «Б» с импульсным реактором БАРС-6 // Труды конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. ЛЯН-ИР-2007», (г. Обнинск, 18–21 сентября 2007 г.). г. Обнинск: 2009. Т. 2. С. 651–659.
10. Дьяченко П.П., Кухарчук О.Ф., Фокина О.Г., Щукин А.Н. Оптимизация параметров импульса накачки в реакторно-лазерной установке Стенда «Б» // Труды конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. ЛЯН-ИР-2007», (г. Обнинск, 18–21 сентября 2007 г.). г. Обнинск: 2009. Т. 2. С. 463–470.
11. Баландин А.Ф. Аппаратно-программный комплекс физика-экспериментатора установки БАРС-6, (АПК-6). // Руководство по работе. ГНЦ РФ-ФЭИ. 2007.
12. Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Якубов П. А., Кураченко Ю. А., Матусевич Е. С. Флюенсы нейтронов над активными зонами реактора БАРС-6 // Препринт ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск. 2009. № 3160.
13. Еловский О. А., Прохоров Ю. А., Фокин Г. Н., Якубов П. А., Кураченко Ю. А., Матусевич Е. С. Нейтронные поля в зале реактора на быстрых нейтронах // Препринт ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск. 2009. № 3174.
14. Дьяченко П. П. Обзор экспериментальных и расчетно-теоретических работ, выполненных в ФЭИ, по физике ядерно-возбуждаемой плазмы // Труды международной конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой. (ЛЯН*92)» (г. Обнинск, 26–29 мая 1992 г.). г. Обнинск: 1993. Т. 1. С. 13–39.

15. Зродников А. В. Перспективы применения лазеров с ядерной накачкой в науке, технике и технологии. // Труды международной конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой. (ЛЯН*92)» (г. Обнинск, 26–29 мая 1992 г.). г. Обнинск: 1993. Т. 1. С. 122–143.

16. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кухарчук О. Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. М.: Энергоатомиздат, 2003.

17. Dyachenko P. P., Gulevich A. V., Zrodnikov A. V., et al. Energy Model of a Pulse Nuclear Reactor-Pumped Laser System // Proc. of the Int. Conf. on ICENES*93. 1993. P. 372.

18. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Кухарчук О. Ф., Фокина О. Г. Быстрый импульсно-периодический реактор для мощных лазеров с ядерной накачкой // Атомная энергия. 2012. Т. 113, Вып. 4. С. 198–202.

19. Дьяченко П. П., Фокин Г. Н. Запальный реактор и параметры импульса накачки в реакторно-лазерной системе // Атомная энергия. 2012. Т. 112. Вып. 5. С. 277–282.