

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ ВО ВНИИЭФ

MAIN RESULTS OF INVESTIGATIONS OF NUCLEAR-PUMPED LASERS IN VNIIEF

*А. А. Пикулев, А. А. Синянский, С. П. Мельников, В. М. Цветков, С. Л. Турутин,
А. Н. Кузнеценков*

A. A. Pikulev, S. P. Melnikov, V. M. Tsvetkov, S. L. Turutin, A. N. Kuznechenkov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Russian Federal Nuclear Center-All-Russian Scientific-Research Institute of Experimental Physics

В докладе представлен краткий обзор исследований лазеров с ядерной накачкой, проведенных во ВНИИЭФ.

In the report the short review of researches of nuclear-pumped lasers conducted in VNIIEF is presented.

Введение

Исследования, направленные на использование ядерной энергии для накачки лазеров, ведутся во ВНИИЭФ с конца 60-х годов [1]. Интерес к этой проблеме был вызван возможностью использования для накачки лазеров мощных, компактных и энергоемких источников ядерной энергии и возможностью создания мощных и энергонезависимых лазерных установок, которые получили название реакторов-лазеров (РЛ). В активной зоне (АЗ) реактора-лазера, состоящей из делящегося вещества и лазерной среды, происходит прямое преобразование выделившейся ядерной энергии в лазерное излучение, минуя промежуточную стадию тепловой энергии.

Первые успешные эксперименты по накачке лазеров ядерными излучениями были выполнены во ВНИИЭФ в 1972 г. при возбуждении смеси He-Xe осколками деления урана. В качестве источника нейтронов использовался импульсный ядерный реактор ВИР-2 с длительностью импульса около 4 мс.

Для изучения лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) во ВНИИЭФ в разное время применялись импульсные реакторы ВИР-1, ВИР-2, ТИБР-1М, БР-1, БИГР с длительностями импульсов нейтронного и γ -излучения от 100 мкс до 1 с (квазиимпульсный режим реактора БИГР). Основной объем исследований был выполнен с использованием экспериментальных комплексов на базе реакторов ВИР-2М и БИГР [1].

Экспериментальный комплекс на реакторе ВИР-2М

На базе водного импульсного реактора ВИР-2М (энерговыведение в активной зоне до 56 МДж, длительность нейтронного импульса ≥ 3 мс) создан экспериментальный комплекс, предназначенный для поиска и исследования характеристик активных сред и отработки элементов конструкции ядерно-лазерных устройств [2]. В состав комплекса входят лазерные установки ЛУНА-2М, ЛУНА-2П (рис. 1) и ЛЯН-2Т. Возбуждение газовых сред осуществляется осколками деления урана (лазерные установки ЛУНА-2М, ЛУНА-2П) и продуктами ядерной реакции ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$ (установка ЛЯН-2Т).

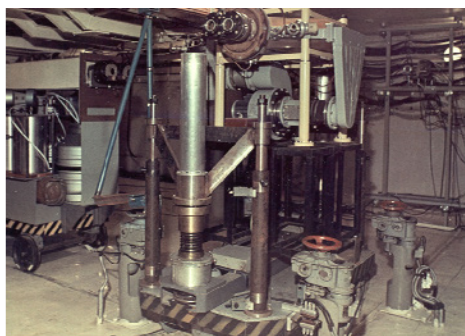
В экспериментах на реакторе ВИР-2М проведен большой объем работ по поиску и оптимизации параметров лазеров, изучению их энергетических и спектральных характеристик, исследованиям неоднородностей плотности газовых сред, расходимости лазерного излучения в зависимости от параметров резонатора и др. В последние годы основным направлением является исследование различных схем формирования излучения многоканальных ЛЯН [3].

К настоящему времени на экспериментальном комплексе получена генерация примерно на 40 переходах атомов Хе, Кг, Аг, Не, С, N, О, Сl и ионов Cd^+ , Zn^+ в видимой и ИК-областях спектра при возбуждении газовых смесей осколками деления урана, а также продуктами ядерных реакций ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$ и ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$. В проведенных экспери-

ментах был достигнут достаточно высокий КПД (до 2,5 %) преобразования энергии осколков деления в лазерное излучение и продемонстрирована работоспособность ЛЯН при облучении нейтронными потоками стационарных ядерных реакторов [1].



а



б

Рис. 1. Установки ЛУНА-2М (а) и ЛУНА-2П (б) в нижнем зале реактора ВВР-2

На реакторе ВВР-2М был проведен цикл интерферометрических исследований, посвященных определению оптических неоднородностей, возникающих как в герметичных, так и в прокачных

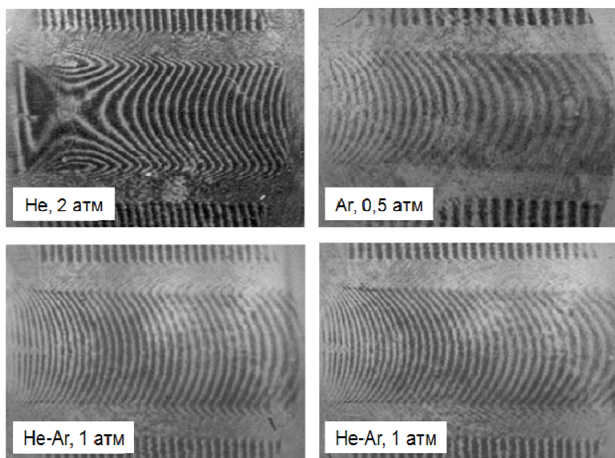
каналах ЛЯН. Эксперименты проводились на лазерной установке ЛУНА-2М и прокачном макете ЛУНА-2П с помощью интерферометров Майкельсона и Маха-Цендера. Результаты экспериментов были использованы для определения температуры и плотности газа, а также распределения мощности накачки по объему лазерного канала [4] (рис. 2).

На установке ЛУНА-2М были проведены эксперименты по исследованию различных схем формирования лазерного излучения: генератор-усилитель; сложение излучения двух лазерных каналов с помощью схем последовательного и параллельного сложения (рис. 3); фазирование излучения двух лазерных каналов посредством оптической связи; использование углового фокального фильтра; использование неустойчивого резонатора [3].

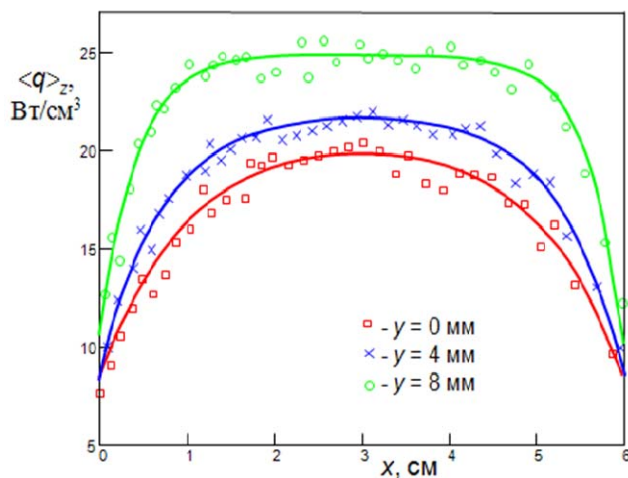
Проведенные исследования позволили наметить пути формирования излучения многоканальных ЛЯН и определить способы улучшения параметров лазерного пучка.

Экспериментальный комплекс на реакторе БИГР

Результаты проведенных исследований показали что для работы РЛ в непрерывном режиме необходимо выполнить два основных условия: обеспечить накачку лазерной среды ядерными излучениями и организовать прокачку газовой смеси в лазерных каналах, чтобы устранить ее перегрев. С учетом этих условий во ВНИИЭФ был в 1994 г. введен в эксплуатацию лазерный модуль ЛМ-4 для совместной работы с импульсным реактором



а



б

Рис. 2. Интерферограммы, зарегистрированные на установке ЛУНА-2П (а) и пример результатов обработки интерферограммы (б)

БИГР, который способен генерировать нейтронные импульсы длительностью порядка 1 с [5].

Лазерный модуль ЛМ-4 (рис. 4а) состоит из четырех лазерных каналов сечением 20×60 мм и активной длиной 100 см. На боковые стенки каналов с размерами 100×6 см² нанесены слои металлического урана-235 толщиной около 5 мг/см². Лазерные каналы модуля включены в единую газовую петлю и разделены между собой теплообменниками, с помощью которых происходит охлаждение рабочего газа.

В проведенных в 1994 году на комплексе ЛМ-4/БИГР экспериментах на практике была продемонстрирована непрерывная генерация ЛЯН и показана эффективность способа поперечной прокачки газа. На лазерном модуле ЛМ-4 также были

проведены исследования динамики распределения лазерного излучения в ближней зоне (рис. 5) и интерферометрическим методом исследованы оптические неоднородности, возникающие в лазерных каналах (рис. 6) [5].

В дальнейших экспериментах с модулем ЛМ-4 один из каналов был использован для интерферометрических исследований оптического качества газовых сред, а два (затем три) канала были сложены в единую генерационную цепочку с помощью зеркальных отражателей и единого оптического резонатора. Эксперименты, проведенные на лазерном модуле ЛМ-4, показали возможность применения последовательной схемы сложения лазерных каналов в лазерно-ядерных устройствах непрерывного действия (рис. 4б).

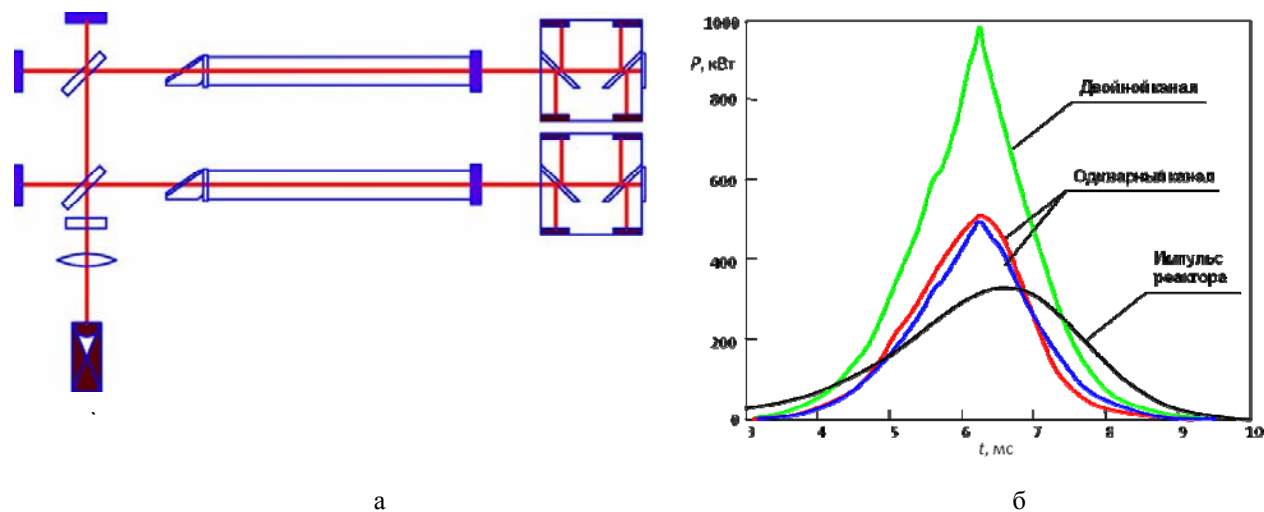


Рис. 3. Схема параллельного сложения двух лазерных каналов (а) и мощность генерации одинарного и сложенного лазерных каналов (б)

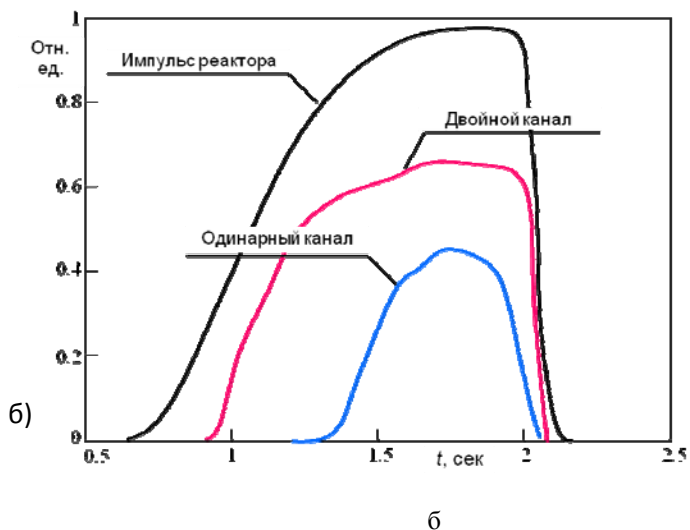
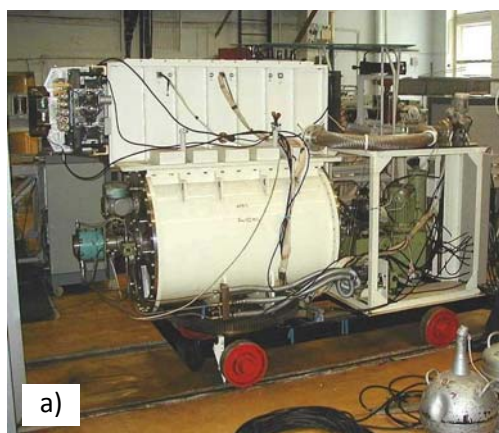


Рис. 4. Лазерный модуль ЛМ-4 (а) и мощность генерации одинарного и сложенного лазерных каналов (б)

В 2007 году взамен модуля ЛМ-4 был введен в эксплуатацию восьмиканальный лазерный модуль ЛМ-8 (рисунок 7). В оптической схеме модуля предусмотрено последовательное сложение четы-

рех и двух лазерных каналов, два канала являются одинарными [5].

На лазерном модуле ЛМ-8 проведены эксперименты по исследованию схемы последователь-

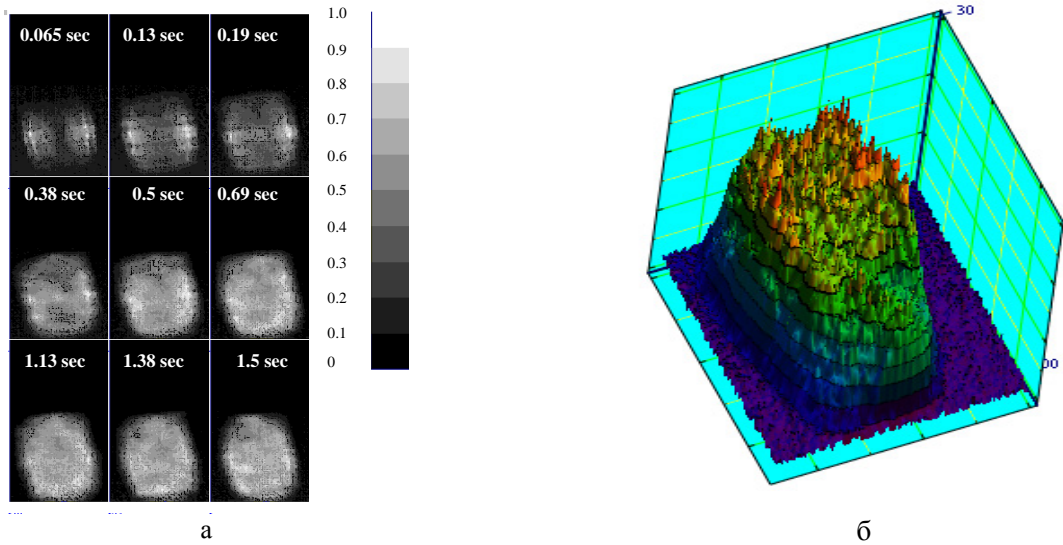


Рис. 5. Динамика лазерного излучения ЛМ-4 во время импульса реактора БИГР (а) и распределение излучения ЛМ-4 в ближней зоне (б)

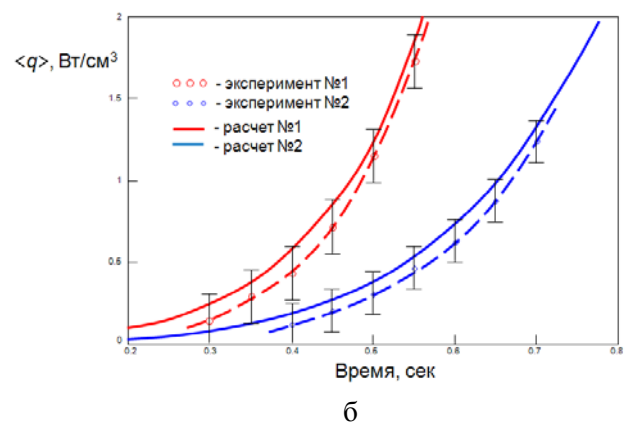
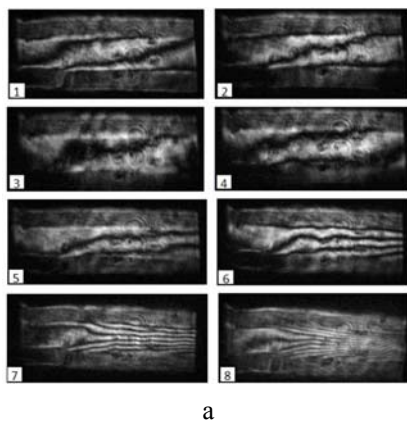


Рис. 6. Интерферограммы бокового сдвига, полученные на модуле ЛМ-4 (а) и пример результатов обработки интерферограмм (б)

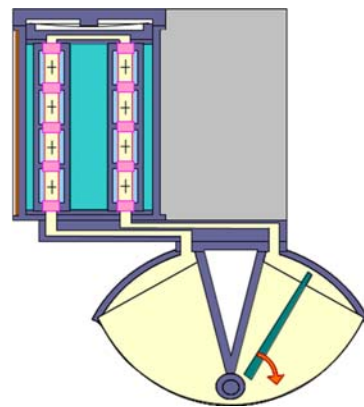


Рис. 7. Лазерный модуль ЛМ-8 (а) и поперечное сечение активной зоны лазерного модуля ЛМ-8 (б)

ного сложения двух и четырех лазерных каналов, изучено влияние окон Брюстера на параметры генерации одинарного лазерного канала, определено распределение лазерного излучения в ближней и дальней зонах. На ЛМ-8 были зарегистрированы рекордные для лазерных модулей с ядерной накачкой непрерывного действия значения мощности генерации одинарного лазерного канала (25 Вт при длительности работы около 1 секунды).

Работы по созданию макета реактора-лазера

На основе экспериментальных и теоретических исследований во ВНИИЭФ была выработана концепция реактора-лазера – автономного ядерно-физического устройства, совмещающего функции лазерной системы и ядерного реактора и осуществляющего прямое преобразование энергии ядерных реакций в лазерное излучение.

Исходя из опыта эксплуатации исследовательских ядерных реакторов и лазерных комплексов во ВНИИЭФ, были выполнены предварительные оценки основных энергетических, ядерно-физических, технических и эксплуатационных параметров различных вариантов реакторов-лазеров с мощностью лазерного излучения 100 кВт и выше, работающих от долей секунд до непрерывного режима. Рассматривались реакторы-лазеры с аккумулярованием тепла в активной зоне реактора в пусках, продолжительность которых ограничена допустимым нагревом АЗ (теплоемкостный РЛ) и РЛ непрерывного действия с выносом тепловой энергии за пределы АЗ (рис. 8) [6].

С начала 80-х годов во ВНИИЭФ велись работы по созданию макета реактора-лазера непрерывного действия. Макет включает в себя реактор ИКАР-500 и 16-канальный лазерный модуль ЛМ-16 (ядерно-физический комплекс ЛМ-16/ИКАР-500). АЗ реактора ИКАР-500 представляет собой графитовую матрицу (куб со стороной 240 см) с девятью сквозными ячейками сечением 50×50 см, в которых размещаются реакторные модули. В одной из сквозных ячеек вместо реакторного модуля должен размещаться лазерный модуль ЛМ-16. Планируемое энерговыделение в АЗ реактора ИКАР-500 составляет 350 МДж, оцениваемая энергия лазерного излучения - не менее 20 кДж.

На комплексе ЛМ-16/ИКАР-500 предполагалось отработать основные технологические и инженерные решения, которые будут использованы при создании РЛ непрерывного действия, осуществляющего прямое преобразование ядерной энергии в лазерное излучение [6].

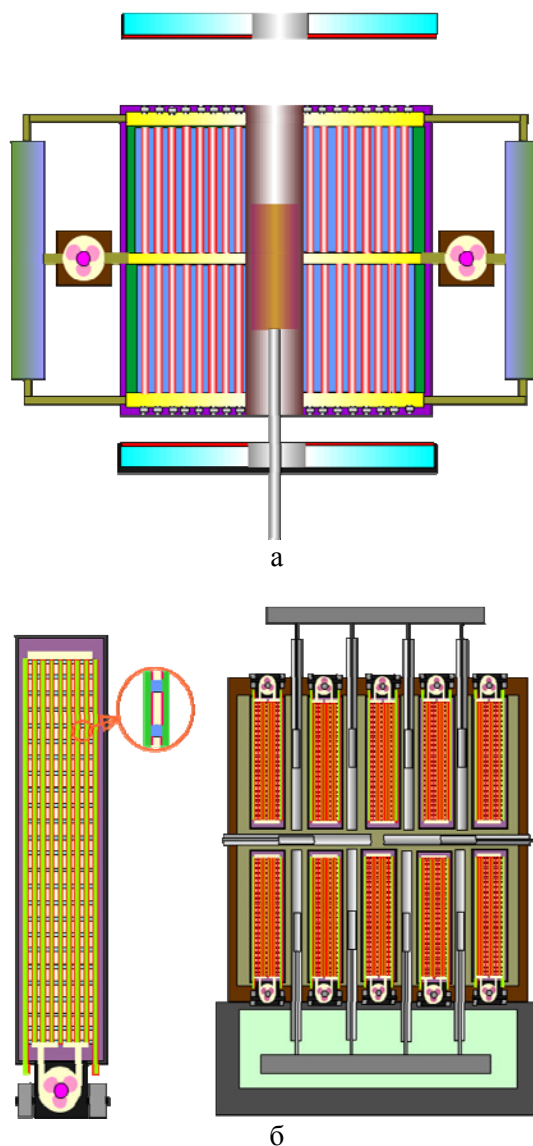


Рис. 8. Теплоемкостный РЛ (а) и РЛ непрерывного действия (б)

Для исследования ядерно-физических характеристик АЗ реактора ИКАР-500 создан критический стенд (СКС) ИКАР-С [7]. Основная цель исследований с критическим стендом – выбор конфигурации реакторных секций, обеспечивающую требуемый запас реактивности АЗ реактора. В 2014 году были завершены работы по физическому пуску СКС ИКАР-С (рис. 9) с центральным уран-графитовым модулем, который предназначен для обеспечения необходимого температурного коэффициента гашения реактивности АЗ реактора ИКАР-500.

Для проведения данных работ во ВНИИЭФ была разработана высокоэффективная технология изготовления уран-графитового топлива, основанная на введении урана в матрицу путем пропитки

пористого графитового блока раствором металлоорганического соединения урана. По данной технологии было изготовлено 240 уран-графитовых блоков для формирования центрального модуля АЗ реактора ИКАР-500.



а



б

Рис. 9. СКС ИКАР-С (а) и транспортно-загрузочный стенд СКС ИКАР-С (б)

Разработка компактных РЛ устройств импульсного действия

В настоящее время во ВНИИЭФ ведется разработка компактных реакторно-лазерных устройств импульсного действия. Основное внимание при этом уделяется следующим двум конфигурациям (рис. 10):

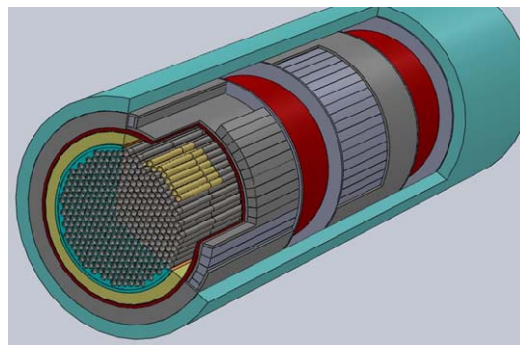
- РЛ с внешней активной зоной;
- РЛ вида запальный реактор-умножитель нейтронов.

В первом случае АЗ реакторно-лазерного бло-

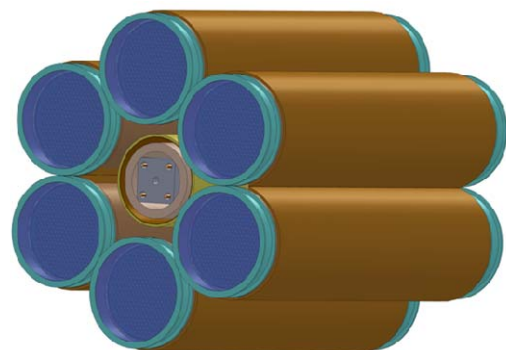
ка представляет собой пустотелый цилиндр (состоящий из двух-трех частей, разнесенных по длине АЗ), внутри которого размещается цилиндрический лазерный модуль, окруженный замедлителем. Данная система позволяет сформировать достаточно короткий импульс накачки (~1мс), но отличается низким энерговыделением в лазерном модуле по сравнению с полным энерговыделением (несколько процентов). В данной схеме имеется возможность использовать только один лазерный модуль (из-за ограниченности размеров полости в АЗ реактора).

Во втором случае в центре РЛ располагается цилиндрический запальный реактор, вокруг которого располагается несколько лазерных модулей. Снаружи вся сборка окружена отражателем нейтронов. Длительность импульса накачки в данной системе ~10 мс, при этом энерговыделение в лазерных модулях составляет ~10 %. Данная схема позволяет использовать несколько лазерных модулей (на рис. 10б показан вариант с шестью модулями).

Более подробно результаты работ по данному направлению будут представлены в отдельных докладах.



а



б

Рис. 10. Конфигурации компактных РЛ импульсного действия: а) РЛ с внешней активной зоной; б) РЛ вида запальный реактор-умножитель нейтронов

Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
2. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривонос В. Н., Мельников С. П., Мельников С. Ф., Синянский А. А. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2000, № 2/3. С.63–68.
3. Пикулев А. А., Пятянин С. В., Синянский А. А., Соснин П. В., Турутин С. Л., Цветков В. М. / Труды Международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения «Мощные лазеры и исследование физики высоких плотностей энергии», Саров, 2008, с.219–223.
4. Пикулев А. А., Влох Г. В., Лимарь Ю. М., Синянский А. А., Фролова С. В., Цветков В. М. // ЖТФ. 2012, Т.82, № 8, С. 89–96.
5. Синянский А. А. / Труды III Международной конференции «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы», Снежинск, 2003, с. 377–387.
6. Воинов А. М., Воронцов С. В., Кривонос В. Н., Мельников С. П., Пикулев А. А., Пунин В. Т., Сизов А. Н., Синянский А. А., Турутин С. Л. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов, 2007, Вып. 2, с.19–28.
7. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В., Кривонос В. Н., Попов В. А., Синянский А. А., Сизов А. Н., Сорокин С. В., Турутов В. И., Лимарь Ю. М., Василенко А. Г., Кузнецников А. Н., Никитин И. А., Горшкова И. А. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов, 2007, № 2, с. 29–33.