

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНО-ЛАЗЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

П.П. Дьяченко, А.В. Зродников, О.Ф. Кухарчук, А.А. Суворов

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



В середине 1980-х гг. в ГНЦ РФ-ФЭИ была сформулирована концепция мощной реакторно-лазерной системы на основе оптического квантового усилителя с ядерной накачкой (ОКУЯН). Суть ее состоит в том, что усилителем в известной схеме «задающий лазер - двухпроходовой усилитель с обращением волнового фронта (ОВФ)» является широкоапертурный ОКУЯН.

В состав такого усилителя входит система двух нейтронно-связанных блоков – запального реакторного (РБ) и лазерного (ЛБ). Запальный блок представляет собой компактный многозонный импульсный реактор на быстрых нейтронах. Лазерный блок работает на тепловых нейтронах и в нейтронно-физическом отношении является подкритической бустерной зоной запального реактора.

Для обоснования основных положений концепции ОКУЯН и доказательства возможности ее практической реализации, верификации расчетных кодов и отработки элементной базы в ФЭИ создан и в 1999 г. введен в эксплуатацию уникальный, не имеющий аналогов в мире реакторно-лазерный комплекс с демонстрационным образцом импульсной реакторно-лазерной системы на основе ОКУЯН – стенд «Б».

Обсуждаются проблемы разработки и создания стенда «Б», обоснования нейтронно-физических и лазерных характеристик демонстрационного образца ОКУЯН. Приводятся результаты детального расчетно-экспериментального изучения характеристик демонстрационного образца, системных исследований прямого преобразования энергии деления ядер в энергию лазерного излучения в сложных реакторно-лазерных устройствах и результаты рассмотрения перспектив развития ядерно-лазерной энергетики.

Ключевые слова: многозонный ядерный реактор, нейтроны, осколки деления, ядерная накачка, лазер, оптический квантовый усилитель с ядерной накачкой.

ВВЕДЕНИЕ

Первичным процессом взаимодействия заряженных продуктов ядерных реакций с веществом является образование ядерно-возбуждаемой плазмы – состояния вещества, возникающего при торможении в нем продуктов ядерных реакций в результате возбуждения и ионизации его атомов.

Важной особенностью ядерно-возбуждаемой плазмы является рекомбинационная неравновесность. Это означает, что в процессе релаксации такой плазмы возникает инверсная населенность квантовых уровней ее компонентов, т.е. выполня-

© П.П. Дьяченко, А.В. Зродников, О.Ф. Кухарчук, А.А. Суворов, 2019

ются необходимые условия для прямого преобразования энергии ядерных реакций в энергию лазерного излучения. Устройство, в котором осуществляется такое преобразование, называют лазером с прямой ядерной накачкой (ЛЯН). Конструкцию и принцип действия такого устройства нетрудно понять на примере одного из простейших типов ЛЯН, схема которого приведена на рис. 1. Заряженные продукты ядерной реакции, возникающие в результате взаимодействия нейтронов с ядрами нейтронно-активного вещества покрытия, вылетая из него тормозятся в газовой лазерно-активной среде, заполняющей трубку (лазерно-активный элемент – ЛАЭЛ), и создают в ней ядерно-возбуждаемую плазму, а следовательно, инверсную населенность одного из ее компонентов, т.е. «накачивают» лазер. Энергия, запасенная в инверсии, с помощью оптического резонатора, состоящего из глухого и полупрозрачного зеркал, настроенного на длину волны соответствующего перехода, выводится из ЛАЭЛ в виде лазерного пучка.

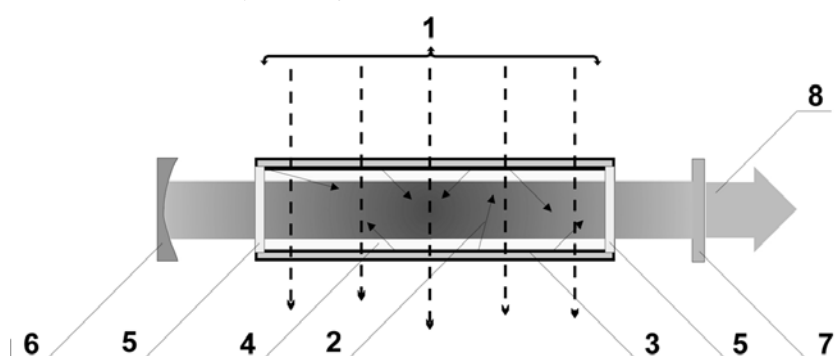


Рис. 1. Принципиальная схема лазера с ядерной накачкой: 1 – нейтронный поток; 2 – продукты ядерных реакций; 3 – нейтронно-активное вещество; 4 – лазерно-активная среда; 5 – оптические окна; 6, 7 – резонатор; 8 – лазерное излучение

До недавнего времени исследования в области лазеров с ядерной накачкой проводились в ряде лабораторий России (РФЯЦ ВНИИЭФ, ГНЦ РФ-ФЭИ, РФЯЦ ВНИИТФ, ИОФ РАН, МИФИ), США (Sandia National Laboratories, University of Illinois, NASA Langley Research Center, Los Alamos National Laboratory, University of Missouri – Columbia и др.), Германии (Technische Universität München) и Китая (Institute of Nuclear Physics and Chemistry of CAEP). По этой тематике было проведено семь научных конференций различного уровня и выпущено пять монографий [1 – 5].

К настоящему времени лазерная генерация получена при ядерной накачке около трех десятков разных газовых лазерно-активных сред продуктами различных ядерных реакций: $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{T}$, $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$, $^{235}\text{U}(n,f)f$ и др. [1 – 5]. Очевидно, что наиболее эффективной для накачки лазера является реакция деления ядер урана-235. Среди нейтронных ядерных реакций она имеет наибольшую энергию (около 200 МэВ), высокое сечение на тепловых нейтронах (~500 барн) и является цепной. Около 80% энергии этой реакции уносят два осколка деления, которые являются тяжелыми ионами со средним зарядом около 20 ед. заряда, кинетической энергией примерно 85 МэВ и массой около 120 а.е.м.

При сборке достаточно большого количества урансодержащих ЛАЭЛ и элементов замедлителя нейтронов в единую компактную систему она начнет размножать нейтроны и может стать критической или близкой к ней. Такие системы называют реакторно-лазерными. Интерес к ним обусловлен уникальными свойствами ядерного реактора как источника накачки лазера, такими как высокая энергоемкость, компактность, автономность. Благодаря высокой проникающей способности нейтронов в размножающих системах появляется возможность накачки лазерно-активных сред

в практически неограниченных объемах. Все это открывает перспективу создания сверхмощных, компактных и автономных источников лазерной энергии, т.е. развития принципиально нового направления использования ядерной энергии – ядерно-лазерной энергетики, необходимой для освоения целого ряда новейших лазерных технологий, например, таких как инерциальный термоядерный синтез, пучковая энергетика, энергоснабжение и запуск космических аппаратов, глубокая резка и сварка на удаленных расстояниях, энергоемкий химический синтез, разделение изотопов, металлокерамическая 3D-литография и многих других.

Сегодня известны два подхода к созданию мощных реакторно-лазерных систем. Первый [6] основан на совмещении зоны накачки лазерно-активной среды с активной зоной стационарного ядерного реактора на тепловых нейтронах. Соответствующее устройство получило название «реактор-лазер» и представляет собой мощный непрерывный (квазинепрерывный) источник лазерного излучения. Во втором [7] – урансодержащая зона накачки лазера и активная зона реактора функционально и пространственно разделены между собой. Зона накачки окружает активную зону реактора, в нейтронно-физическом отношении подкритична и представляет собой бустерную зону импульсного реактора. Такое устройство получило название «лазер с накачкой от импульсного реактора» и является мощным импульсным источником лазерного излучения.

В 1986 г. в ГНЦ РФ-ФЭИ была сформулирована концепция мощной реакторно-лазерной системы на основе оптического квантового усилителя с ядерной накачкой (ОКУЯН) [8]. Суть ее состоит в том, что в качестве усилителя в известной схеме «задающий лазер - двухпроходовой усилитель с обращением волнового фронта (ОВФ)» используется широкоапертурный ОКУЯН. Он состоит из двух основных блоков: реакторного (запального) РБ и лазерного ЛБ. В качестве запального реактора предлагается использовать многозонный импульсный реактор на быстрых нейтронах. Лазерный блок работает на тепловых нейтронах и представляет собой подкритическую бустерную зону запального реактора.

Нетрудно показать, что в идеальном (предельном) случае, когда на одно деление в РБ приходится один нейтрон утечки, прямая нейтронная связь РБ → ЛБ максимальна (нейтрон из реакторного блока с вероятностью, близкой к единице, вызывает деление в лазерном), обратная нейтронная связь ЛБ → РБ отсутствует и $\Delta t_{1/2}^{РБ} \leq \tau_{ЛБ}$, из определений коэффициента размножения нейтронов $k_{эфф}^{ЛБ}$ и времени жизни нейтронов $\tau_{ЛБ}$ в лазерном блоке следует

$$E_{ЛБ} = E_{РБ} / (1 - k_{эфф}^{ЛБ}) \nu; \quad (1)$$

$$\Delta t_{1/2}^{ЛБ} = -0,7 \tau_{ЛБ} / \ln k_{эфф}^{ЛБ}, \quad (2)$$

где $E_{ЛБ}$, $E_{РБ}$ – энергия, выделяемая в ЛБ и РБ; ν – среднее число мгновенных нейтронов деления; $\Delta t_{1/2}^{РБ}$, $\Delta t_{1/2}^{ЛБ}$ – ширина на половине высоты импульса энерговыделения в РБ и ЛБ.

Отсюда для реальных на сегодня численных значений параметров $E_{РБ} = 15$ МДж, $k_{эфф}^{ЛБ} = 0,95$, $\tau_{ЛБ} = 100$ мкс, $\nu = 2,45$ и эффективности преобразования энергии деления в энергию лазерного излучения ~1% получаем значение лазерной энергии ~1,2 МДж при длительности на половине высоты импульса накачки ~1,3 мс.

Для доказательства возможности практической реализации этой концепции, верификации расчетных кодов и отработки элементной базы соответствующих установок в ГНЦ РФ-ФЭИ был создан и введен в эксплуатацию уникальный, не имеющий аналогов в мире, демонстрационный образец ОКУЯН – реакторно-лазерный комплекс – стенд «Б» [9].

В работе приводятся краткое описание устройства и результаты экспериментально-

го исследования нейтронно-физических и лазерных характеристик демонстрационного образца импульсной реакторно-лазерной системы на основе ОКУЯН – станда «Б», а также разработки способов модернизации установки с целью увеличения энергии и мощности лазерного пучка.

Основные результаты, приведенные в работе, опубликованы в цитируемой литературе и защищены патентами [10, 11].

РЕАКТОРНО-ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ГНЦ РФ-ФЭИ – СТЕНД «Б»

Фотография ОКУЯН станда «Б» приведена на рис. 2. В качестве запального реактора в нем применен двухзонный импульсный реактор на быстрых нейтронах самогасящего действия Барс-6, разработанный в РФЯЦ – ВНИИТФ [12] и модернизированный в ФЭИ с учетом работы в реакторно-лазерной системе. Активные зоны (АЗ) реактора изготовлены из уран-молибденового сплава (массовая доля Мо – 9%). Обогащение урана изотопом ^{235}U – 90%. Масса ^{235}U в каждой АЗ – 105 кг. Конструктивно АЗ представляет собой цилиндр диаметром 226 мм и высотой 232 мм, набранный из колец на центральной стальной трубе. Активные зоны реактора расположены на платформе, которая может перемещаться по рельсам, уложенным в стендовом зале. Одна АЗ – подвижная и может двигаться относительно другой так, что расстояние между ними может изменяться в пределах от 340 до 1500 мм.

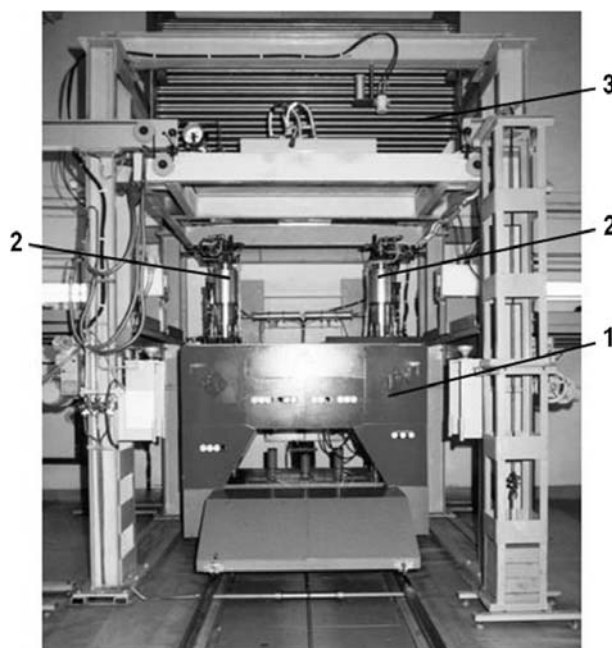


Рис. 2. Демонстрационный образец ОКУЯН: 1 – реактор Барс-6; 2 – активные зоны реактора; 3 – лазерный блок

Каждая АЗ снабжена органами регулирования, позволяющими управлять реактором при работе на запаздывающих нейтронах, а также с высокой скоростью (до $220\beta_{\text{эфф}}/\text{с}$) переводить его в состояние мгновенной надкритичности для генерации импульса, и в конце импульса со скоростью около $200\beta_{\text{эфф}}/\text{с}$ переводить его из состояния запаздывающей надкритичности в состояние глубокой (до $20\beta_{\text{эфф}}$) подкритичности. Переход реактора из состояния мгновенной в состояние запаздывающей надкритичности в процессе генерации импульса происходит автоматически за счет отрицательного температурного коэффициента реактивности.

Стенд спроектирован так, что реактор может поочередно выполнять две функции.

Во-первых, генерировать нейтронную вспышку для облучения неразмножающей нейтроны элементной базы лазерного блока на первом рабочем месте (РМ) – первая очередь стенда, запущена в 1996 г. Во-вторых, служить запальным реакторным блоком при работе с размножающим нейтроны лазерным блоком в составе демонстрационного образца ОКУЯН на втором РМ – вторая очередь стенда, введена в эксплуатацию в 1999 г.

Лазерный блок представляет собой цилиндрическую конструкцию длиной 2,5 м и диаметром 1,7 м с продольной полостью для размещения активных зон запального реактора. Он собран из стандартных элементов пяти типов: лазерно-активный элемент (ЛАЭЛ), имитатор ЛАЭЛ, элемент межтрубного замедлителя нейтронов, элемент отражателя нейтронов и канал увеличения мощности (КУМ). Их расположение в ЛБ определяется картограммой загрузки.

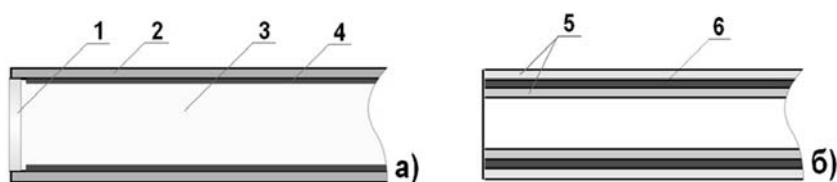


Рис. 3. Устройство ЛАЭЛ (а) и его имитатора (б): 1 – оптическое окно; 2 – тонкостенная труба из нержавеющей стали; 3 – лазерно-активная среда; 4 – покрытие из металлического урана; 5 – алюминиевые трубки; 6 – U_3O_8

Основными элементами ЛБ являются ЛАЭЛ и его имитатор (рис. 3). ЛАЭЛ представляет собой тонкостенную (0,5 мм) трубу из нержавеющей стали диаметром 49 мм и длиной 2,5 м, покрытую изнутри слоем металлического урана (масса урана – 40 г, обогащение изотопом ^{235}U – 90%) толщиной 5 мкм, герметично закрытую с торцов просветленными кварцевыми окнами и заполненную газовой лазерно-активной средой. Имитатор ЛАЭЛ выполнен в виде вставленных одна в другую алюминиевых труб наружным диаметром 49 мм и суммарной толщиной стенки 2,5 мм, небольшое пространство между которыми заполнено диоксидом урана. Он является нейтронно-физической копией ЛАЭЛ, т.е. содержит такое же количество ^{235}U (36 г) и имеет примерно те же свойства по отношению к захвату и рассеянию нейтронов. Это сделано для того, чтобы упростить задачу масштабирования энергетики лазерного пучка, которая в этом случае сводится к замене нужного количества имитаторов на ЛАЭЛ при неизменных параметрах импульса накачки в произвольной точке ЛБ.

Материалом элементов замедлителя и отражателя нейтронов являются полиэтилен и парафин соответственно. КУМ представляет собой стандартную для данной конструкции ЛБ алюминиевую трубу, заполненную чередующимися таблетками топлива и замедлителя нейтронов. Масса топлива (диоксид урана с обогащением по ^{235}U – 90%) в КУМ около 150 г, замедлителя – 3,5 кг.

ОКУЯН приводится в действие следующим образом. Лазерный блок с помощью специального устройства поднимается в верхнее положение. Реактор из биологической защиты по рельсам перемещается под лазерный блок в строго фиксируемое положение. Лазерный блок опускается в нижнее положение. При этом АЗ оказываются размещенными внутри ЛБ. По команде с пульта управления производится импульс реактора и измеряются необходимые нейтронно-физические и лазерные характеристики установки.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКУЯН

Цель исследований нейтронно-физических характеристик ОКУЯН, по существу, сводилась к поиску такой конфигурации ЛБ и режима работы реактора, при которых пря-

мая нейтронная связь РБ → ЛБ была бы максимальной, а обратная связь ЛБ → РБ – минимальной. Были исследованы три картограммы загрузки ЛБ и два режима работы запального реактора

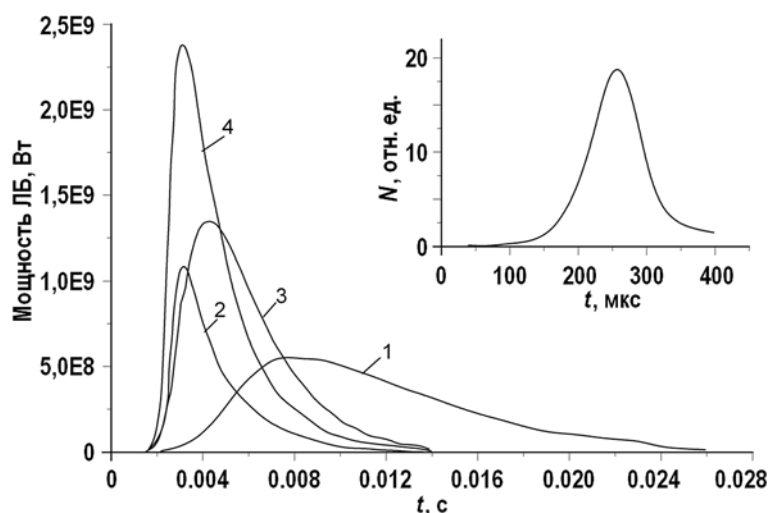


Рис. 4. Импульсы энерговыделения в ЛБ (на вставке – импульс энерговыделения в АЗ реактора при работе в штатном режиме вне лазерного блока): 1, 2, 3 – картограммы загрузок № 1, 2, 3 соответственно при штатном режиме работы реактора; 4 – картограмма загрузки № 3 при модифицированном режиме работы реактора

Результаты исследований показаны на рис. 4. На вставке к рисунку приведен импульс, соответствующий энерговыделению в АЗ при работе реактора без ЛБ. Импульсы № 1 – 3 соответствуют энерговыделению в ЛБ (импульсу накачки) при штатной работе реактора внутри ЛБ с различными картограммами загрузки, импульс № 4 – энерговыделению в ЛБ при модифицированном режиме работы реактора внутри ЛБ.

Из результатов, приведенных на рис. 4, видно, что для всех исследованных картограмм загрузки ЛБ и режимов работы реактора длительность импульса в лазерном блоке существенно превышает длительность импульса в АЗ реактора при его работе вне ЛБ. Это связано, в первую очередь, с тем, что при генерации импульса в ЛБ реактор работает не на собственных мгновенных нейтронах с временем жизни ~10 нс, а на нейтронах трехзонной связанной системы, время жизни которых намного больше (несколько микросекунд [13]), и которые в этом случае представляют собой ничто иное как дополнительную группу запаздывающих нейтронов.

Значения $E_{лб} \sim 7$ МДж и $\Delta t_{лб}^{1/2} \sim 2$ мс, по-видимому, близки к предельным значениям этих величин при использовании реактора Барс-б в качестве запального реактора ОКУЯН. Видно, что эти значения существенно отличаются от тех, которые следуют из выражений (1), (2). Это объясняется высокой чувствительностью реактора такого типа к нейтронам обратной связи ЛБ → РБ.

Основываясь на рассмотренных экспериментальных данных, можно предложить два способа модернизации запального импульсного реактора для уменьшения влияния обратной нейтронной связи ЛБ → РБ и, как следствие, для повышения энергетичности ОКУЯН [14].

Первый способ касается реактора с традиционным топливом (^{235}U , ^{239}Pu) и сводится к созданию механизма достаточно быстрого (сравнимого по времени с самогашением) принудительного перевода РБ в глубокую подкритичность ($\Delta k_{эфф} \geq 3\beta_{эфф}$) с целью обеспечения ядерно-безопасного разгона запального реактора на мгновенной надкритичности, превышающей вклад ЛБ в его реактивность. Очевидно, что с технической точки зрения это весьма непростая и, возможно, невыполнимая задача.

Второй, более кардинальный способ – применение в качестве топлива запального реактора порогового делящегося изотопа, например, ^{237}Np . Порог деления этого нуклида составляет около 0,25 МэВ. Следовательно, нейтроны из ЛБ, имеющие спектр, близкий к тепловому, попадая в АЗ запального реактора, не будут приводить к делению ядер его топлива, т.е. значение коэффициента обратной нейтронной связи $K_{\text{онс}}^{\text{Np}}$ в случае топлива из ^{237}Np будет намного меньше значения соответствующего коэффициента $K_{\text{онс}}^{\text{U}}$ в случае топлива АЗ из ^{235}U .

Для его оценки воспользуемся экспериментальными данными о значении кадмиевого отношения в лазерном блоке. Его среднее значение по объему ЛБ составляет примерно 30 [13].

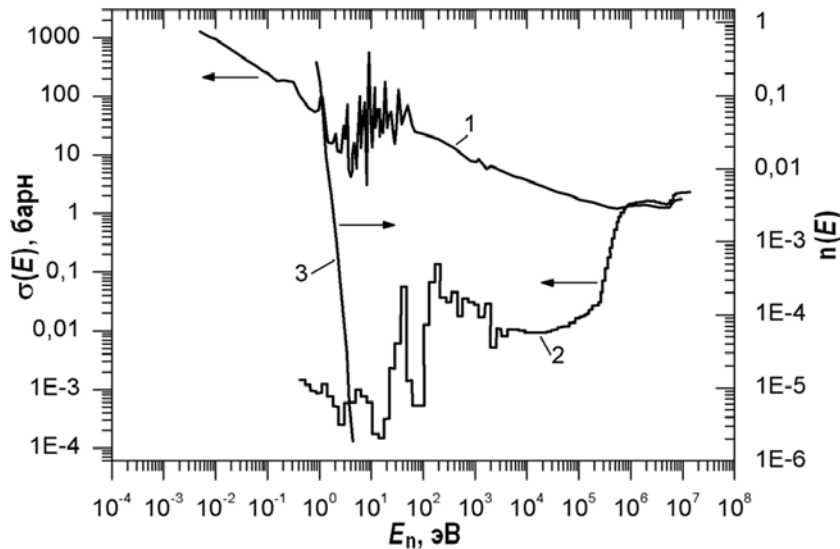


Рис. 5. Зависимость сечений деления $\sigma(E)$ ^{235}U (1), ^{237}Np (2) от энергии нейтронов E_n и максвелловское распределение нейтронов $n(E)$ (3) для $T = 2850 \text{ K}$

На рисунке 5 показано максвелловское распределение нейтронов $n(E)$, соответствующее такому кадмиевому отношению. Его температура составляет около 2850 К. На этом же рисунке приведены зависимости сечений деления ^{235}U $\sigma^{\text{U}}(E)$ и ^{237}Np $\sigma^{\text{Np}}(E)$ от энергии нейтронов. Пользуясь данными, приведенными на рис. 4, можно показать, что

$$K_{\text{онс}}^{\text{Np}} / K_{\text{онс}}^{\text{U}} = \left(\int_{1\text{эВ}}^{\infty} n(E) \sigma^{\text{Np}}(E) dE \right) / \left(\int_{1\text{эВ}}^{\infty} n(E) \sigma^{\text{U}}(E) dE \right) \approx 1 \cdot 10^{-5},$$

т.е. замена ^{235}U на ^{237}Np в запальном импульсном реакторе приводит к уменьшению обратной нейтронной связи ЛБ \rightarrow РБ примерно на пять порядков.

Вопрос об использовании ^{237}Np в качестве топлива реактора обсуждался в [15 – 18]. Исследованию механических и теплофизических свойств нептуния и его сплавов посвящен целый ряд публикаций, например, [16]. В [17] детально рассмотрен вопрос о применении ^{237}Np в качестве топлива внутренней активной зоны (АЗ1) в двухсекционном бустере-реакторе с внешней зоной (АЗ2) из ^{235}U для создания сверхмощного источника быстрых нейтронов с так называемой вентильной нейтронной связью секций.

Из проведенного рассмотрения следуют два важных вывода. Во-первых, создание запального импульсного реактора с топливом из ^{237}Np (по крайней мере, с нейтронно-физической точки зрения) представляется вполне осуществимой задачей.

Во-вторых, использование такого запального реактора в ОКУЯН позволило бы существенно приблизить его энергетику к теоретическому пределу, в частности, примерно в 10 – 20 раз повысить энергию и мощность импульса накачки в лазерном блоке демонстрационного образца ОКУЯН.

ЛАЗЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ОБРАЗЦА ОКУЯН

Для демонстрации работоспособности лазерного блока в качестве активных сред ЛАЭЛ были выбраны две наиболее изученные на то время и простые в технологическом отношении (работающие при комнатной температуре) газовые смеси – He-Ar-Xe ($\lambda = 1,73; 2,03$ мкм) и He-N₂-H₂ ($\lambda = 0,391; 0,428$ мкм). При использовании этих сред были исследованы лазерные характеристики ОКУЯН для различных конфигураций ЛБ и режимов работы лазера и запального реактора.

В частности, был изучен режим свободной генерации на одном ЛАЭЛ в составе лазерного блока с внутренним и наружным резонаторами. Для He-Ar-Xe-среды изучен режим свободной генерации на семи ЛАЭЛ, а также режимы одно- и двухпроходового усилителя на семи и 19-ти ЛАЭЛ при использовании в качестве задающего генератора уранового ЛАЭЛ, работающего в режиме свободной генерации, и ЛАЭЛ с объемной накачкой продуктами реакции ³He(n,p)³H. При этом в двухпроходовом режиме вместо ВРМБ-кюветы использовалось плоское зеркало, а для вращения плоскости поляризации излучения – ромб Френеля.

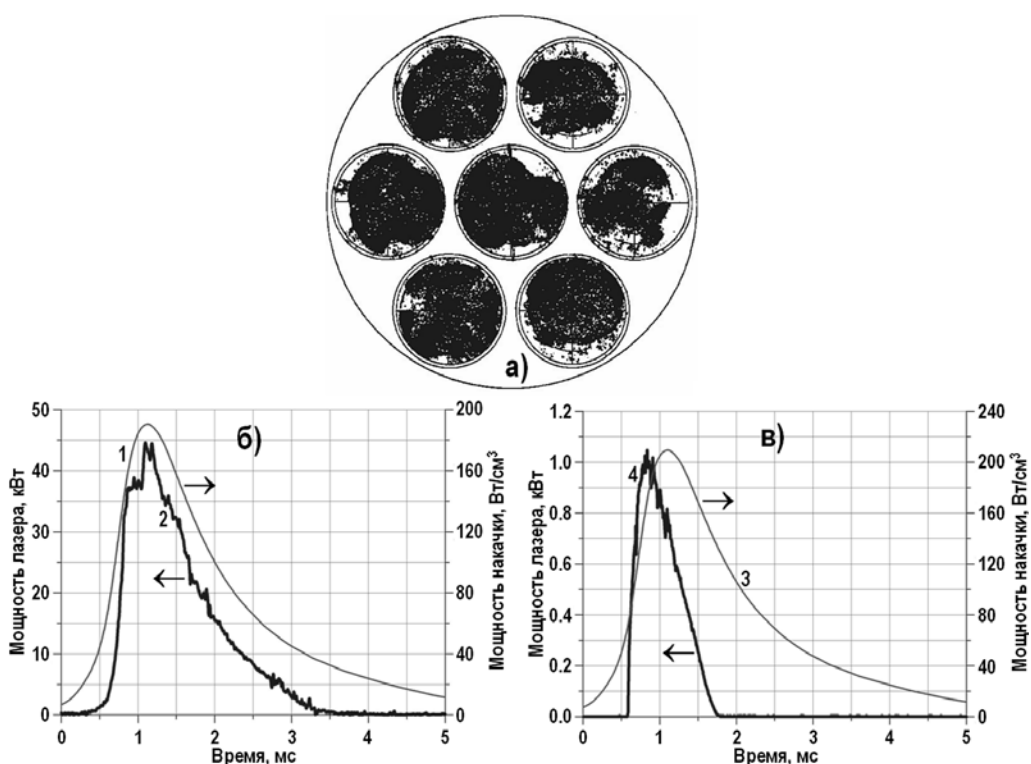


Рис. 6. Лазерные характеристики демонстрационного образца ОКУЯН: а) – «автограф» лазерного пучка на выходе из усилителя реакторно-лазерной системы стенда «Б» ($\lambda = 2.03$ мкм); б) – мощность накачки (1) и суммарная мощность по всему каналу лазерной генерации ($E_{ген} = 43 \pm 2$ Дж; $E_{удел} > 1.5$ Дж/л) на переходе 2.03 мкм (2) в среде He-Ar-Xe; в) – мощность накачки (3) и суммарная мощность по всему каналу лазерной генерации (один ЛАЭЛ; $E_{ген} = 0.7 \pm 0.1$ Дж) на переходе 391.4 нм (4) в среде He-N₂-H₂

Некоторые из полученных результатов показаны на рис. 6. «Автограф» лазерного

пучка, полученный ожоговым методом при размещении мишени в ближней зоне, демонстрирует возможность выведения лазерной энергии из многоэлементной системы. Импульсы накачки и лазерной генерации для He-Ar-Xe-среды ($\lambda = 2,03 \text{ мкм}$) и He-N₂-H₂-среды ($\lambda = 0,398 \text{ мкм}$), показанные на рисунке, характеризуют удельные параметры накачки и генерации для этих сред, достигнутые на установке.

Видно, что для He-Ar-Xe-среды, например, эффективность преобразования вложенной в газ энергии осколков деления в энергию лазерного излучения составляет около 0,5 и 1% по энергии и мощности соответственно. Это примерно в два раза ниже значений соответствующих величин, следующих из расчетной кинетической модели этого лазера и полученных на первом рабочем месте стенда.

Исследования [19] He-Ar-Xe-ЛАЭЛ с разными диаметрами и толщиной уранового покрытия показали, что причиной наблюдаемого разногласия может служить рассеяние лазерного излучения на звуковых волнах плотности газа, возникающих из-за характерной для осколков деления сильной радиальной неравномерности энерговыклада в активную среду ЛАЭЛ.

Работы по оптимизации конструкции ЛАЭЛ, выбору и исследованию активных сред для конкретных практических применений установки проводились на первом рабочем месте стенда «Б». Здесь следует отметить работы [20, 21] по исследованию характеристик ЛАЭЛ на основе высокотемпературной Cd-He-парогазовой смеси (переход $5s^{22}D_{5/2} - 5p^2P_{3/2}$ CdII, $\lambda = 441,6 \text{ нм}$), представляющей интерес для космического базирования ОКУЯН, и работы [22, 23] по изучению возможности использования лазерной жидкости $\text{POCl}_3 - \text{SnCl}_4 - {}^{235}\text{U}^{2+} - \text{Nd}^{3+}$ (переход ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ Nd^{3+} , $\lambda = 1,054 \text{ мкм}$) в качестве активной среды лазерного блока ОКУЯН наземного базирования.

В работах [20, 21] показано, что при минимизации потерь лазерного излучения в ЛАЭЛ за счет рассеяния на волнах плотности газа, возникающих из-за радиальной неравномерности энерговыклада, и использовании изотопически чистого кадмия (${}^{112}\text{Cd}$ или ${}^{116}\text{Cd}$) можно получить КПД лазера с длиной волны $\lambda = 0,441 \text{ мкм}$ на уровне 1,5% при времени жизни верхнего лазерного уровня около 0,5 мкс.

Интерес к лазерной жидкости связан с тем, что эффективность накачки верхнего лазерного уровня Nd^{3+} (относительно энергии деления в ЛАЭЛ) благодаря тому, что уран в жидкости находится в растворенном виде примерно в 5 – 10 раз выше, чем в газовом лазере, и, согласно экспериментальным данным [22], составляет ~2%. Кроме этого, время жизни верхнего лазерного уровня Nd^{3+} составляет около 300 мкс, что сравнимо с длительностью импульса накачки. Однако в отличие от газовых лазеров генерация в жидкости при ядерной накачке пока экспериментально не подтверждена.

В работе [23] изучалось пропускание лазерного пучка с длиной волны 1,054 мкм жидкостью $\text{POCl}_3 - \text{SnCl}_4 - {}^{235}\text{U}^{2+} - \text{Nd}^{3+}$ в кюветах разной апертуры при возбуждении осколками деления урана на первом рабочем месте стенда «Б». Оказалось, что увеличение апертуры кюветы в 2,5 раза приводит к уменьшению пропускания в четыре раза. С точки зрения существующих представлений о пропускании света жидкостью – это неожиданный результат. Так же, как и в случае с газовым лазером, авторы объясняют этот эффект появлением дополнительных потерь лазерного излучения в среде во время импульса накачки за счет рассеяния на гидроакустических волнах плотности жидкости, возникающих из-за радиальной неравномерности энерговыклада. Однако природа этой неравномерности здесь другая и связана с блокировкой нейтронного потока изотопом ${}^{35}\text{Cl}$, имеющим высокую концентрацию в жидкости и относительно большое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ~40 барн. Авторы считают, что именно этот эффект является основной причиной неудач в попытках получить генерацию при ядерной накачке урансодержащей жидкости на основе аprotонной кислоты. Существенно уменьшить или полнос-

тью исключить этот эффект можно путем замены изотопа ^{35}Cl в естественной смеси на ^{37}Cl , сечение радиационного захвата у которого в 100 раз меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создание демонстрационного образца оптического квантового усилителя с ядерной накачкой, исследование нейтронно-физических характеристик трехзонной реакторной системы и получение лазерного пучка из размножающего нейтроны лазерного блока можно считать доказательством «теоремы существования» реакторно-лазерной системы с прямым преобразованием ядерной энергии в энергию лазерного пучка – прототипа будущих установок ядерно-лазерной энергетики.

2. Выполненные на стенде «Б» расчетно-экспериментальные работы и проведенные теоретические исследования процессов, протекающих в реакторно-лазерной системе, позволили наметить пути ее совершенствования с целью достижения требуемого уровня энергетики лазерного пучка.

3. Установлено, что для достижения указанной цели необходимо решить прежде всего две основные проблемы.

Первая касается физики многозонных реакторных систем и связана с большой обратной нейтронной связью ЛБ → РБ. Показано, что эта проблема может быть решена путем замены топлива в запальном реакторе – изотопа ^{235}U на пороговый делящийся изотоп ^{237}Np .

Вторая относится к лазерной физике и связана с характерной для ядерной накачки сильной радиальной неравномерностью энерговыклада в ЛАЭЛ. Такая неравномерность приводит к появлению потерь лазерного излучения за счет рассеяния на радиальных акустических волнах плотности среды. Показано, что в случае газовой лазерно-активной среды эта проблема может быть решена путем оптимизации конструкции ЛАЭЛ, а в случае урансодержащей лазерной жидкости на основе апроптонной кислоты – путем замены изотопа ^{35}Cl на ^{37}Cl .

Решение этих проблем обеспечит достижение расчетных параметров реакторно-лазерных систем и позволит приступить к созданию полномасштабного опытно-промышленного образца оптического квантового усилителя с ядерной накачкой для практического освоения новейших лазерных технологий.

Литература

1. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 360 с.
2. Карелин А.В. Физические основы реактора-лазера. Москва: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2007. – 260 с.
3. Мельников С.П., Сизов А.Н., Синянский А.А. Лазеры с ядерной накачкой. Монография. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. – 440 с.
4. Melnikov S.P.¹, Sizov A.N.¹, Sinyanskiy A.A., Miley² G.H. Lasers with Nuclear Pumping. Springer Science + Business Media (New York), 2015. – 455 p. [¹Russian Federal Nuclear Center – All Russian Scientific-Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia. ²University of Illinois, Urbana, USA].
5. Prelas Mark. Nuclear Pumped Lasers. – © Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 417 p.
6. Walters R., Schneider R., Borland R. Nuclear Pumped Laser Reactors. // Trans. ANS. – 1979. – Vol. 31. – P. 742.
7. McArthur D.A., Schmidt Th.R., Tolefsrud Ph.B. Concepts for Construction of Large Reactor Exited Laser Systems. SAND 76-0584. 1977.
8. Дьяченко П.П. История исследований в области прямого преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения. В кн.: «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт, 50 лет». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1996. – С. 40.
9. Дьяченко П.П., Еловский О.А., Прохоров Ю.А., Фокин Г.Н., Якубов П.А., Снопков А.А. Реактор-

но-лазерный комплекс «Стенд Б». – // Атомная энергия. – 2000. – Т. 88. – Вып. 5. – С. 337-342.

10. Дьяченко П.П., Фокин Г.Н. Реакторно-лазерная установка с прямой накачкой осколками деления. – Патент на изобретение RU 2502140 C1, 2012.

11. Дьяченко П.П., Серегина Е.А., Тихонов Г.В. Активный материал для жидкостных лазеров и усилителей. – Патент на изобретение RU 2075143 C1, 1997.

12. Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Э.П., Погребов И.С., Снопков А.А., Терехин В.А. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. / Под ред. А.В. Лукина. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

13. Дьяченко П.П. О состоянии исследований в ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского по прямому преобразованию энергии деления ядер в энергию лазерного излучения. / Труды конференции «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Снежинск: ВНИИТФ, 2003. – С. 5-30.

14. 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.

15. Seifritz W., Wydler P. Criticality of Neptunium-237 and its Possible Utilization in Nuclear Reactors. // Nucl. Sci. Engng. – 1979. – Vol. 72. – No. 2. – PP. 272-276.

16. Конев В.Н. Нептуний-237. Свойства, структура сплавов и соединений. Препринт № 11 (68). – М.: ВНИИНМ, 1981.

17. Колесов В.Ф. Аперiodические импульсные реакторы. Монография. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 1999.

Монография в 2-х т. Изд. 2-е переработанное и дополненное. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007.

18. Шабалин Е.П., Аксенов В.Л., Комышев Г.Г., Rogov A.Д. Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124. – № 6. – С. 309-313.

19. Дьяченко П.П., Дьяченко Н.П., Полетаев Е.Д. Влияние диаметра активного элемента и толщины уранового покрытия на эффективность газового лазера с ядерной накачкой. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – Вып. 4. – С. 183-187.

20. Денежкин И.А., Дьяченко П.П., Степанов С.П. Генерационные характеристики кадмиевого лазера с накачкой осколками деления. / Труды научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». – Саров: ВНИИЭФ, 2015. – Т. 2. – С. 129-132.

21. Денежкин И.А., Дьяченко П.П., Степанов С.П. Характеристики активного элемента лазера с ядерной накачкой на парах кадмия. // Атомная энергия. – 2019 (в печати).

22. Лapidус В.И., Добровольский А.Ф., Дьяченко П.П., Серегина Е.А., Тихонов Г.В. Эффективность накачки и время жизни уровня ${}^4F_{3/2}$ иона неодима в жидкой лазерно-активной среде $POCl_3 - SnCl_4 - UO_2^{2+} - Nd^{3+}$ при импульсном облучении осколками деления на реакторе Барс-6. // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – № 6. – С. 507-510.

23. Дьяченко П.П., Куликов П.А., Серегина Е.А., Серегин А.А., Тихонов Г.В. Пропускание лазерного пучка неорганической жидкостью, активированной неодимом и уранилом, при импульсном возбуждении осколками деления урана. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – Вып. 6. – С.350-356.

Поступила в редакцию 11.04.2019 г.

Авторы

Дьяченко Петр Петрович, советник директора отделения, профессор, д-р физ.-мат. наук
E-mail: dpp@ipre.ru

Зродников Анатолий Васильевич, научный консультант ген. директора, профессор, д-р физ.-мат. наук
E-mail: azrodnikov@ipre.ru

Кухарчук Олег Филаретович, директор отделения, доцент, д-р физ.-мат. наук
E-mail: kuh@ipre.ru

Суворов Алексей Анатольевич, начальник отдела, д-р физ.-мат. наук
E-mail: suvorov@ipre.ru

UDC 621.039

PROBLEMS OF NUCLEAR-LASER POWER ENGINEERING AND METHODS OF THEIR SOLUTION

Dyachenko P.P., Zrodnikov A.V., Kukharchuk O.F., Suvorov A.A.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leipunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

In the mid-1980s, the concept of a high power reactor-laser system based on a nuclear pumped optical quantum amplifier (OKUYaN) was formulated at IPPE. Its essence lies in the fact that a wide-aperture OKUYaN serves as an amplifier in the well-known «master laser – two-pass amplifier with phase conjugation» scheme.

The structure of such an amplifier includes a system of two neutron-coupled units: an ignition reactor (RB) and a laser (LB). The ignition unit is a compact multi-core pulsed fast neutron reactor. The laser unit operates on thermal neutrons and, in the neutron-physical relation, is a subcritical booster zone of the ignition reactor.

To substantiate the basic principles of the OKUYaN concept and to prove the possibility of its practical implementation, as well as to verify the calculation codes and to work out the element base, a unique unparalleled in the world reactor-laser complex with a demonstration sample of a pulsed reactor-laser system based on OKUYaN (stand «B») was created and put into operation at IPPE in 1999.

This article discusses the problems of developing and creating the stand «B», the choice and justification of the neutron-physical and laser characteristics of the OKUYaN demonstration sample. Provided are the results of a detailed computational-experimental study of the demonstration sample characteristics, the data from system studies of the direct conversion of nuclear fission energy into laser radiation energy in complex reactor-laser devices and the results of considering the prospects for the development of nuclear-laser power engineering.

Key words: nuclear reactor, neutrons, fission fragments, nuclear pumping, laser, optical quantum amplifier with nuclear pumping.

REFERENCES

1. Gulevich A.V., Dyachenko P.P., Zrodnikov A.V., Kukharchuk O.F. *Coupled Pulsed Reactor System*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2003 (in Russian).
2. Karelin A.V. *Physical Basis of Reactor-Laser*. Moscow. FGUP «NPP VNIIE» Publ., 2007 (in Russian).
3. Melnikov S.P., Sizov A.N., Sinyanskii A.A. *Nuclear Pumping Lasers*. Sarov. «RFNC-VNIIEF» Publ., 2008 (in Russian).
4. Melnikov¹ S.P., Sizov¹ A.N., Sinyanskii¹ A.A., Miley² G.H.. *Lasers with Nuclear Pumping*. Springer Science + Business Media (New York), 2015. – 455 p. [¹Russian Federal Nuclear Center – All Russian Scientific-Research Institute of Experimental Physics. Sarov, Nizhniy Novgorod reg., Russia. ²University of Illinois, Urbana, USA].
5. Prells Mark. *Nuclear Pumped Lasers*. Q Springer International Publishing Switzerland, 2016, 417 p.
6. Walters R., Schneider R., Borland R. Nuclear Pumped Laser Reactors. *Trans. ANS*. 1979, v. 31, p.742.
7. McArthur D.A., Schmidt Th.R., Tolefsrud Ph.B. *Concepts for Construction of Large Reactor Exited Laser Systems*. SAND 76-0584. 1977.
8. Dyachenko P.P. Background in the Field of Nuclear Energy into Laser Energy Direct Conversion. In: «State Scientific Centre of The Russian Federation – Institute for Physics and

- Power Engineering, 50 years». Obninsk. GNTs RF-FEI Publ., 1996, p. 40 (in Russian).
9. Dyachenko P.P., Elovskiy O.A., Prokhorov Ya.A., Fokin G.N., Yakubov P.A., Snopkov A.A. Reactor-Laser Facility «Set B». *Atomnaya Energiya*. 2000, v. 88, iss. 5, pp. 337-342 (in Russian).
 10. Dyachenko P.P., Fokin G.N. *Reactor-Laser System with Direct Fission Fragments Pumping*. Patent RU 2502140 C1, 2012 (in Russian).
 11. Dyachenko P.P., Seregina E.A., Tikhonov G.V. *Active Material for Liquid Lasers and Amplifiers*. Patent RU 2075143 C1, 1997 (in Russian).
 12. Levakov B.G., Lukin A.V., Magda E.P., Pogrebov I.S., Snopkov A.A., Terekhin V.A. *Pulsed Nuclear Reactors of RFNC-VNIITF*. Snezhinsk. RFNC-VNIITF Publ., 2002 (in Russian).
 13. Dyachenko P.P. Status of the SSC IPPE n.a. A.I. Leypunsky Investigations for Nuclear Energy into Laser Energy Direct Conversion. *Proc. of the Int. Conference «Nuclear Pumping Lasers Problems and Nuclear Pulsed Reactors»*. Snezhinsk. RFNC-VNIITF Publ., 2003, pp. 5-30 (in Russian).
 14. Dyachenko P.P., Fokin G.N. Driver Nuclear Reactor and Pumping Pulse Parameters in Reactor-Laser System. *Atomnaya energiya*. 2012, v. 112, iss. 5, pp. 277-282 (in Russian).
 15. Seifritz W., Wydler P. Criticality of Neptunium-237 and its Possible Utilization in Nuclear Reactors. *Nucl. Sci. Engng.* 1979, v. 72, no. 2, pp. 272-276.
 16. Konev V.N. *Neptunium-237. Behaviour, Structure of the Alloys and Chemical Compounds*. Preprint No 11 (68). Moscow. VNIIEP Publ., 1981 (in Russian).
 17. Kolesov V.F. *Aperiodic Pulsed Reactors*. Sarov. RFNC-VNIIEF Publ., 1999 (in Russian). Monograph (Vol. 1, 2). Revised and additional edition. Sarov. RFNC-VNIIEF Publ., 2007 (in Russian).
 18. Shabalin E.P., Aksenov V.L., Komyshev G.G., Rogov A.D. Highly Intense Pulsed Neutron Source Based on Neptunium. *Atomnaya Energiya*. 2018, v. 124, no. 6, pp. 309-313 (in Russian).
 19. Dyachenko P.P., Dyachenko N.P., Poletaev E.D. Influence of the Active Element Diameter and Uranium Coating 1) Thickness on Gas Nuclear Pumping Laser Efficiency. *Atomnaya Energiya*. 2015, v. 118, iss. 4, pp. 183-187 (in Russian).
 20. Denezhkin I.A., Dyachenko P.P., Stepanov S.P. Generation Characteristics of Cadmium Laser with Fission Fragments Extraction. *Proc. of the Conference «Pulsed Reactors: Creation History and Use Prospects»*. Sarov. VNIIEF Publ., 2015, v. 2, pp. 129-132 (in Russian).
 21. Denezhkin I.A., Dyachenko P.P., Stepanov S.P. Characteristics of the Cadmium Vapor Nuclear Pumping Laser Active Element. *Atomnaya energiya*, 2019 (under publication, in Russian).
 22. Lapidus V.I., Dobrovol'skii A.F., Dyachenko P.P., Seregina E.A., Tikhonov G.V. Pumping Efficiency and Lifetime of the ${}^4F_{3/2}$ Level of a Neodymium Ion in a Liquid Nd^{3+} : $POCl_3 - SnCl_4 - UO_2^{2+}$ Laser-Active Medium upon Pulsed Irradiation by Fission Fragments in a BARS-6 Reactor. *Kvantovaya Elektronika*. 2003, v. 33, iss. 6, pp. 507-510 (in Russian).
 23. Dyachenko P.P., Kulikov P.A., Seregina E.A., Seregin A.A., Tikhonov G.V. Laser Beam Transmission by Neodymium and Uranyl Activated Inorganic Liquid upon Pulsed Irradiation by Uranium Fission Fragments. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 121, iss. 6, pp. 350-356 (in Russian).

Authors

Dyachenko Petr Petrovich, Advisor to the Director of Department, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math),
E-mail: dpp@ippe.ru

Zrodnikov Anatoly Vasilyevich, Scientific Advisor of Director, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math)
E-mail: azrodnikov@ippe.ru

Kukharchuk Oleg Filaretovich, Director of Department, Associate Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math)
E-mail: kuh@ippe.ru

Suvorov Alexey Anatolyevich, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math)
E-mail: suvorov@ippe.ru