

РЕАКТОРНО-ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

REACTOR-LASER SYSTEM FOR TECHNOLOGICAL APPLICATION

П. П. Дьяченко, Ю. А. Дюжов, О. Ф. Кухарчук, Е. Д. Поletaев,
В. Н. Смольский, А. А. Суворов, О. Г. Фокина
P. P. Dyachenko, Yu. A. Dyuzhov, O. F. Kukharchuk, E. D. Poletaev,
V. N. Smolsky, A. A. Suvorov, 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 представлена концепция реакторно-лазерной установки технологического применения, состоящая из двух пространственно разделенных основных блоков: запального реактора и лазерного блока. В качестве запального реактора выбран импульсно-периодический реактор с модуляцией реактивности (ИРМ). Приведены результаты расчетов нейтронно-физических, динамических и тепловых характеристик системы «реактор ИРМ – лазерный блок» при аperiodическом и импульсно-периодическом режимах работы системы.

In the report the concept of reactor-laser system for technological application consisting of two spatially separated main blocks (the burst reactor and laser block) is presented. The pulsed periodic reactor with modulation of reactivity (IRM) is selected as the burst reactor. The results of the neutronic, dynamic and thermal characteristics calculations for the system «reactor IRM – laser block» with nonperiodic and periodic-pulsed modes of operation are given.

На сегодняшний день технологии на основе традиционных лазеров получили широкое распространение во многих отраслях промышленности, науки и техники. Из традиционных лазеров к самым мощным относятся технологические лазеры: газовые CO₂ лазеры с длиной волны около 10 мкм и волоконные лазеры с длиной волны около 1 мкм. Режим работы таких лазеров – непрерывный или импульсно-периодический. Основные технические параметры существующих лазерных установок технологического применения, которые созданы на базе этих лазеров, следующие: потребление электрической мощности лазера от 28 кВт до 150 кВт; выходная мощность лазерного излучения – 2–7 кВт и 20–50 кВт при этом вес установки составляет 0,7–4 т и 7–40 т соответственно [1].

С помощью лазерных установок технологического применения большой мощности можно эффективно решать актуальные задачи ядерной энергетики, развить целый ряд инновационных технологий, требующих высокоэнергетических источников большой плотности. К таким технологиям можно отнести: резка и сварка металла большой толщины, нанесение специальных защитных покрытий; энергоемкий химический синтез; трехмерная металлокерамическая литография; передача энергии на большие расстояния без применения транспортных средств; системы связи и глобального мониторинга; глубокая очистка загрязненных поверхностей, включая радиационноопасные; разделение изотопов; инерциальный термоядерный синтез.

Одним из перспективных направлений развития лазерных технологий является разработка и создание мощных лазерных установок технологического применения на основе прямого преобразования энергии деления ядер в энергию оптического (лазерного) излучения. В подобных установках источником накачки лазера является реактор, который в сравнении с традиционными источниками накачки, является автономным, компактным, мобильным устройством, обладает громадной энергоемкостью и позволяет накачивать большие объемы лазерно-активных сред [2]. В исследованиях лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) получен ряд важных результатов [3, 4], которые позволяют обоснованно говорить о возможности создания подобных установок.

В данной работе рассматривается первоначальный вариант концепции установки перспективного ЛЯН технологического применения, схема которой приведена на рис. 1. Реакторно-лазерная установка состоит из двух пространственно разделенных основных блоков: запального

импульсного реактора (ЗИР) и лазерного блока (ЛБ). В качестве ЗИР был выбран импульсно-периодический реактор с модуляцией реактивности (ИРМ), работающий на среднем уровне тепловой мощности 20,5 МВт. Его конструкция и принцип действия подробно изложены в работе [5]. ЛБ представляет собой цилиндрическую конструкцию с осевой полостью шестигранной формы, в которой располагается ЗИР и трубопроводы первого контура системы охлаждения ЗИР. В нейтронно-физическом отношении ЛБ является подкритической сборкой и управляется нейтронами запального реактора [6].

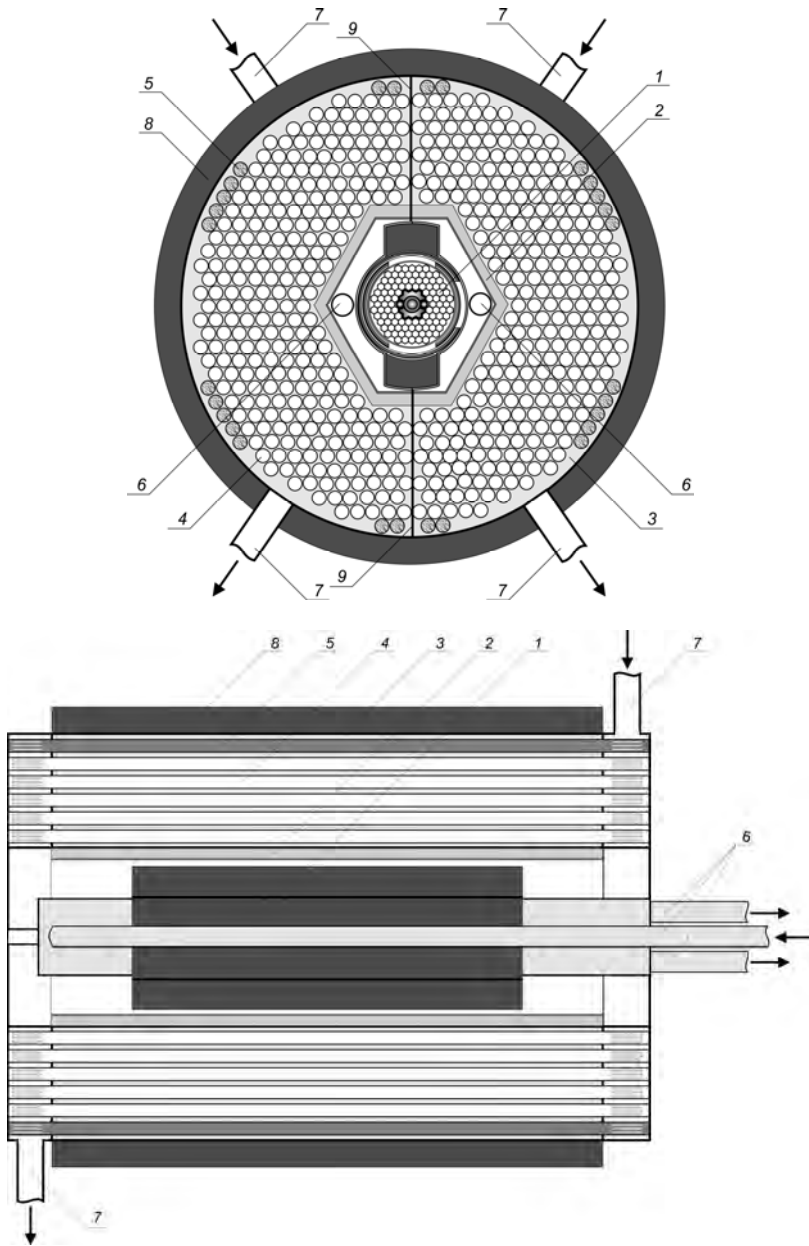


Рис. 1. Общая схема реакторно-лазерной установки технологического назначения: 1 – ЗИР; 2 – внутренний отражатель нейтронов; 3 – зона накачки ЛБ; 4 – ЛАЭЛ; 5 – канал увеличения мощности; 6 – трубопроводы системы охлаждения ЗИР; 7 – патрубки системы охлаждения и регенерации смеси; 8 – внешний отражатель нейтронов; 9 – разделитель петель

Активная зона ЗИР длиной 1560 мм, диаметром 274 мм набирается из 102 тепловыделяющих сборок (ТВС). В каждую ТВС установлено семь твэлов конструкции, близкой к конструкции твэлов БН-600. Активная часть твэла набирается из таблеток спеченной двуокиси плутония, по торцам которой установлен отражатель нейтронов из бериллия. Органы воздействия на реактив-

ность установлены в центре реактора и содержат пять стержней трех типов из карбида бора, покрытого стальной защитной оболочкой. За корпусом ЗИР расположены модулятор реактивности (два вращающихся цилиндра) и два стационарных бериллиевых отражателя нейтронов. Модулятор реактивности позволяет реализовать частоты следования импульсов (ν) 4,55; 10, 21,5, 30, 50 и 150 Гц. Охлаждается ЗИР жидким натрием с температурой на входе в активную зону 300 °С и общим расходом 205 т/час.

Лазерный блок длиной 2500 мм, диаметром 1480 мм набирается из 538 шт. лазерно-активных элементов (ЛАЭЛ) и 28 шт. каналов увеличения мощности (КУМ), схемы которых приведены соответственно на рис. 2 и 3. В зоне накачки ЛБ, ЛАЭЛы и КУМы установлены в замедлителе нейтронов из гидрида циркония в сквозных отверстиях, расположенных по правильной треугольной решетке, высверленных по длине замедлителя. Торцы замедлителя нейтронов и корпуса ЛБ герметизированы стальными оболочками, которые формируют входной и выходной коллекторы для лазерно-активной смеси. Конструктивно ЛАЭЛ и КУМ разные, но они имеют одинаковые размеры и оба изготовлены из циркониевого сплава применяемого в конструкции оболочек твэлов реакторов типа ВВЭР [7, 8]. На внутреннюю цилиндрическую поверхность ЛАЭЛ нанесен слой из делящегося уран-молибденового сплава (4 % весовых Мо) с обогащением по изотопу ^{235}U 96%. Снаружи ЛАЭЛ по всей длине покрыт слоем термоизоляционного материала. В торцах ЛАЭЛ установлены оптические элементы, образующие резонатор лазера с индивидуальным для каждого ЛАЭЛ показателем преломления излучения выходного зеркала. На обоих концах ЛАЭЛ имеются отверстия для входа (выхода) лазерно-активной смеси. Площадь отверстий индивидуальна для каждого лазерно-активного элемента, обеспечивая тем самым профилирование расхода через него активной среды.

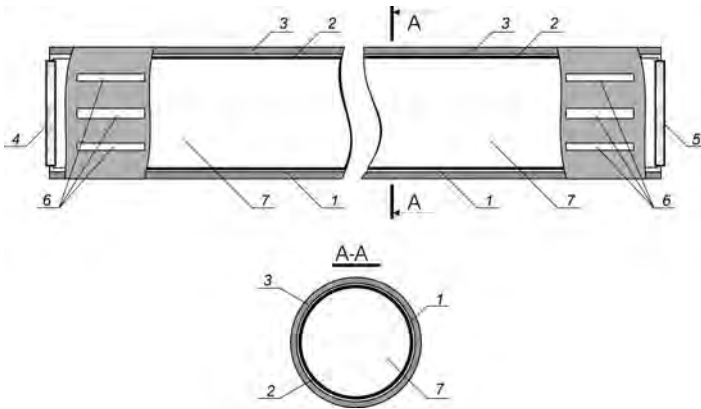


Рис. 2. Схема ЛАЭЛ: 1 – стенка; 2 – делящееся

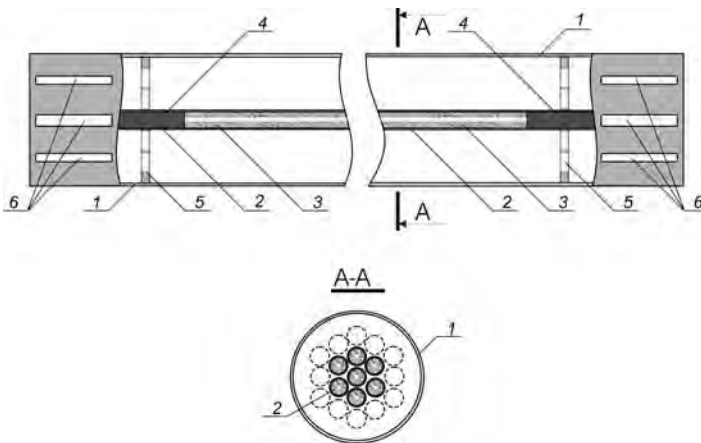


Рис. 3. Схема КУМ: 1 – корпус; вещество; 3 – термоизоляционное покрытие; 2 – твэл; 3 – топливный сердечник; 4, 5 – зеркала резонатора; 6 – отверстия для 4 – торцевой отражатель; входа (выхода) лазерно-активной среды; 5 – дистанционирующая решетка; 7 – лазерно-активная среда; 6 – отверстия для входа (выхода) рабочей среды

В каждый КУМ установлено семь твэлов конструкцией, близкой к конструкции запального импульсного реактора [5]. Активная часть твэла набирается из уран-молибденовый сплава (4 % весовых Мо) с обогащением по изотопу ^{235}U 96 %, по торцам которого установлены отражатели нейтронов из бериллия. Дистанционируются твэлы внутри КУМ специальными решетками, которые в случаи необходимости позволяют увеличить число твэлов в канале до 19 шт. На обоих концах канала увеличения мощности ЛБ имеются отверстия для входа (выхода) лазерно-активной смеси, которая используется для его охлаждения. Площадь отверстий одинакова для всех каналов.

Снаружи лазерного блока расположен внешний отражатель нейтронов из бериллия. Внутренний отражатель нейтронов из гидрида циркония, защищенный стальной оболочкой, находится внутри ЛБ в осевой шестигранной полости. ЛБ по всей длине корпуса, в продольном направлении, разделен на две части стальной перегородкой, образуя тем самым две независимые петли системы охлаждения и регенерации лазерно-активной смеси. В качестве базовой лазерно-активной среды рассматривалась смесь Не-Аг-Хе [4, 9]. Начальное (между импульсами) давление в первом контуре системы охлаждения и регенерации лазерно-активной смеси составляет 2 атм.

Используя разработанный ранее расчетно-теоретический аппарат [6, 10, 11] были выполнены расчеты нейтронно-физических и динамических характеристик установки.

Основные интегральные нейтронно-физические характеристики системы «реактор ИРМ – лазерный блок», рассчитанные методом Монте-Карло с использованием программы АМСНР [10], представлены в таблице 1 (статистическая погрешность расчетов ~2 %). Здесь обозначено: N_L – количество лазерно-активных элементов в ЛБ; k_{bb} – значение эффективного коэффициента размножения нейтронов в ЛБ (в отсутствии ЗИР); Δk_{rb}^{pas} – «пассивная» составляющая реактивности ЗИР в присутствии ЛБ; α^* – «активная» составляющая реактивности ЗИР в присутствии ЛБ; G^* – отношение энерговыделения в ЛБ к энерговыделению в ЗИР.

Таблица 1

Основные нейтронно-физические характеристики системы «реактор ИРМ – лазерный блок»

Параметр	Значение
N_L	538
k_{bb}	0,9405±0,0007
$\Delta k_{rb}^{pas}, \beta^1$	21,7
α^*, β^1	10,2
G^*	1,6
G^* / N_L	$2,9 \cdot 10^{-3}$

$$^1 - \beta = 0,002$$

Расчетные мощностные и энергетические характеристики системы «реактор ИРМ – лазерный блок», работающей в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 5 и 10 Гц были получены в рамках модифицированной интегральной модели нейтронной кинетики [6] и представлены в табл. 2. Здесь обозначено: N_r^{\max} – мощность запального импульсного реактора в максимуме импульса; N_b^{\max} – мощность лазерного блока в максимуме импульса; θ_b – длительность импульса накачки в ЛБ на полувысоте; \overline{W}_b^{\max} – средняя по всему объему лазерно-активной среды в ЛБ мощность накачки в максимуме импульса; \overline{E}_b^{imp} – средний по всему объему лазерно-активной среды в ЛБ энерговыклад за один период следования импульсов; N_ℓ^{\max} – мощность выходного лазерного излучения в максимуме импульса при эффективности преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения (ϵ) 0.01.

Основные характеристики реакторно-лазерной установки при работе в импульсно-периодическом режиме

ν , Гц	N_r^{\max} , ГВт	N_b^{\max} , ГВт	θ_b , мс	\overline{W}_b^{\max} , Вт/см ³	$\overline{E}_b^{\text{imp}}$, Дж/см ³	N_ℓ^{\max} , МВт
5	2,6	1,6	1,8	83	0,3	2,5
10	1,8	1,1	1,4	56	0,2	1,7

В качестве примера на рис. 4 показано временное поведение полной (интегральной по объему) мощности лазерного блока (N_b) для $\nu = 5$ Гц.

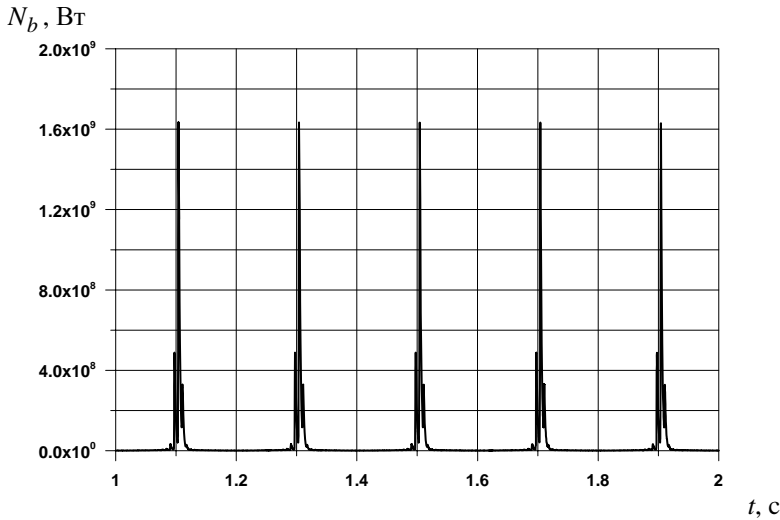


Рис. 4. Временное поведение мощности лазерного блока излучателя при частоте следования импульсов 5 Гц

Из приведенных данных можно видеть, что при использовании в качестве ЗИР реактора ИРМ со средним уровнем тепловой мощности 20,5 МВт мощность выходного лазерного излучения в максимуме импульса, при импульсно-периодическом режиме работы установки, достигает мегаваттного уровня.

В аperiodическом режиме (режиме генерации одиночных импульсов) уровень выходных характеристик системы определяется, прежде всего, уровнем энерговыделения в компонентах системы (ЗИР и ЛБ), а значит температурами их элементов конструкции на конец переходного процесса.

В расчетах этого режима предполагалось:

1) системы охлаждения ЗИР и охлаждения и регенерации лазерно-активной среды ЛБ работают в штатном режиме и обеспечивают прокачку рабочего тела (температура натрия на входе в реактор 300 °С);

2) для реализации режима используется импульсный стержень [5], который под действием пневмопривода выводится из реактора, а по истечении временной задержки равной ~30 мс поступает сигнал на сброс (ввод в реактор) органов регулирования и защиты ЗИР;

3) скоростные характеристики цилиндров модулятора реактивности соответствуют частоте следования импульсов в системе 30 Гц.

Результаты расчетов представлены в табл. 3, где обозначено: E_r – энерговыделение в запальном импульсном реакторе; \overline{E}_b – средний по всему объему лазерно-активной среды в ЛБ энерговыделенный за время переходного процесса; E_ℓ – энергия выходного лазерного излучения за время генерации импульса при эффективности преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения (ϵ) 0,01.

Основные характеристики реакторно-лазерной установки при работе в аperiodическом режиме

E_r , МДж	N_r^{\max} , ГВт	N_b^{\max} , ГВт	θ_b , мс	\bar{W}_b^{\max} , Вт/см ³	\bar{E}_b , Дж/см ³	N_ℓ^{\max} , МВт	E_ℓ , кДж
10	12,7	5,6	2,3	283	0,8	8,3	23,3
30	43,5	17,5	2,2	891	2,4	26,2	71,0
60	105,6	36,7	2,1	1870	4,8	55,1	140,7

Как можно видеть из табл. 3, система «реактор ИРМ – лазерный блок» в аperiodическом режиме обеспечивает достаточно высокие уровни накачки лазерно-активной среды. Это позволяет получить на выходе из реакторно-лазерной установки технологического применения лазерное излучение с энергетикой в десятки килоджоулей и мощностью в десятки мегаватт, что является хорошим результатом для мощных импульсных лазерных систем.

В качестве примера на рис. 5 показаны импульсы мощности в ЛБ для вариантов, приведенных в табл. 3.

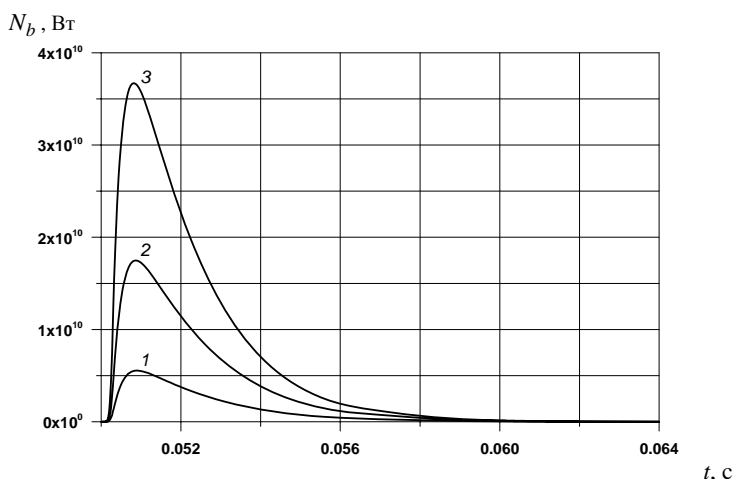


Рис. 5. Импульсы мощности в лазерном блоке при работе реакторно-лазерной установки в аperiodическом режиме: 1 – $E_r = 10$ МДж; 2 – $E_r = 30$ МДж; 3 – $E_r = 60$ МДж

Расчеты тепловых процессов в системе, которые иллюстрирует рисунок 6, показали, что элементы АЗ за время импульса не нагреваются до температур плавления, а характерное время расхолаживания элементов ее конструкции после генерации импульса не превышает 30 с.

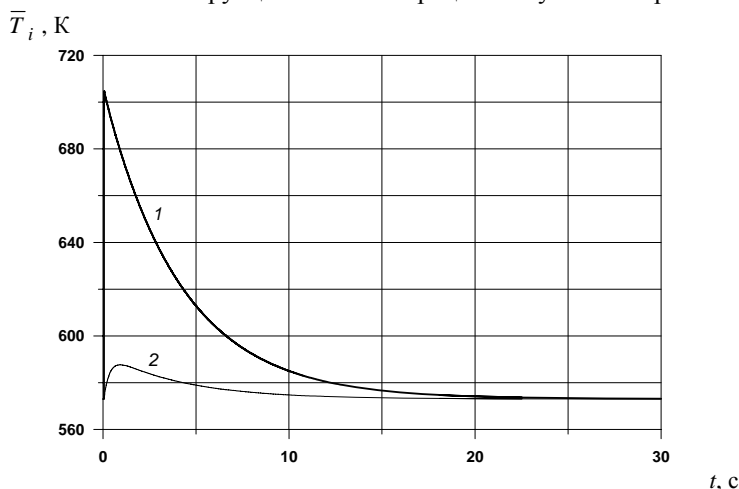


Рис. 6. Временное поведение средней температуры элементов конструкции активной зоны ЗИР при генерации одиночного импульса с энерговыделением 10 МДж: 1 – топливо; 2 – оболочка твэла

Таким образом, результаты проведенных расчетных исследований уже демонстрируют достаточно высокий энергетический потенциал лазеров с ядерной накачкой, работающих не в стационарном режиме, при весьма умеренных массогабаритных характеристиках. Дальнейшее увеличение выходных параметров лазерного излучения возможно за счет оптимизации конструкции установки с точки зрения улучшения ее нейтронно-физических и динамических характеристик, увеличения средней тепловой мощности ЗИР (при обеспечении требуемых режимов охлаждения), увеличения энергонапряженности (интенсивности делений) отдельного ЛАЭЛ в лазерном блоке, оптимизации условий генерации лазерного излучения с увеличением эффективности ядерно-оптического преобразования энергии и т. д. Кроме того, при работе таких систем необходимо иметь ввиду возможность генерации электроэнергии реакторной системой, прежде всего, для обеспечения собственных нужд.

Список литературы

1. Дюжов Ю. А., Дьяченко П. П., Кухарчук О. Ф. и др. Промышленные технологии на основе ядерно-оптического преобразователя энергии импульсного действия // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 48–53.
2. Зродников А. В. // 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.
3. Труды межд. конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой»: ЛЯН*92, г. Обнинск, 1992. Т. 1–3, ЛЯН*94, г. Саров, 1994, т. 1, 2; «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы (ЛЯН-ИР-2002)», г. Снежинск, 2003; «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы (ЛЯН-ИР-2007)», г. Обнинск, 2009, т. 1, 2.
4. Загидулин А. В., Бочков А. В., Мироненко В. В., Софиенко Г. С. 500-Джоульный лазер с ядерной накачкой // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 23. С. 31–38.
5. 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.
6. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кухарчук О. Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. М.: Энергоатомиздат, 2003.
7. Саркисов А. А., Гусев Л. Б., Калинин Р. И. Основы теории и эксплуатации судовых ядерных реакторов / Под общ. ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М.: Наука, 2008.
8. Герасимов В. В., Монахов А. С. Материалы ядерной техники. М.: Энергоиздат, 1982.
9. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
10. Бережной К. В., Кухарчук О. Ф. Применение кода MCNP для расчета нейтронно-физических характеристик связанных реакторных систем // Препринт ФЭИ, г. Обнинск. 2002. № 2961.
11. Гулевич А. В., Качанов Б. В., Кухарчук О. Ф. Модели и программы расчета динамических характеристик реакторно-лазерных систем // Препринт ФЭИ, г. Обнинск. 1995. № 2454.