

Таким образом, численные исследования с применением программного комплекса ЛОГОС позволили спроектировать и обосновать прочность и герметичность упаковочного комплекта ТУК-109Т при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях. Достоверность численных расчетов на основе компьютерной модели ТУК-109Т размерностью более 6 млн конечных элементов подтверждается близостью результатов моделирования и полномасштабных испытаний. Разработанная технология компьютерного моделирования позволяет на этапе проектирования находить оптимальные конструкторские решения, значительно сокращать сроки и стоимость новых разработок сложных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циберева К.В., Рябов А.А., Романов В.И. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для

решения задач прочности. — В сб.: XIII межд. сем. «Супервычисления и математическое моделирование». Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2012, с. 541—549.

2. Дерюгин Ю.Н., Козелков А.С., Спиридонов В.Ф. и др. Многофункциональный высокопараллельный пакет программ ЛОГОС для решения задач тепломассопереноса и прочности. Тезисы докл. С.-Петербургского научн. форума «Наука и общество». СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
3. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S. Numerical simulation of dynamic deformation of air transport package in high-speed accidental impact. — In: Proc. of 16th Intern. Symp. on the Packaging and Transport of Radioactive Materials. UK, PATRAM, Oct. 2010, № 133.
4. Рябов А.А., Романов В.И., Кукунов С.С. и др. Численный анализ ударопрочности и термостойкости авиационного контейнера РАТ-2. — Проблемы прочности и пластичности, 2016, т. 78, № 1, с. 101—111.
5. Il'kaev R.I., Solovyov V.P., Ryabov A.A. e.a. Numerical stress analysis of spent nuclear fuel transport package in normal and accident conditions. — In: Proc. of 18th Intern. Symp. on the Packaging and Transport of Radioactive Materials. Japan, PATRAM, Sept. 2016, № 2041.

Поступила в Редакцию 06.12.18

УДК 621.373.8

ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛАЗЕРА С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ НА ПАРАХ КАДМИЯ

Денежкин И.А., Дьяченко П.П., Степанов С.П.

(АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

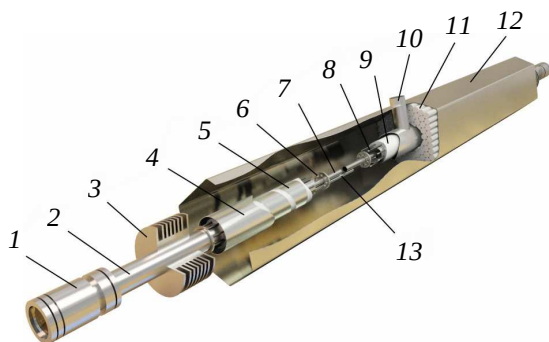
e-mail: denezhkin@ippe.ru

Эффективность лазера на переходе атомарного ксенона с длиной волны 2,03 мкм при прямой накачке осколками деления урана смеси газов He, Ag и Xe с уменьшением диаметра лазерно-активного элемента и толщины уранового покрытия возрастает [1]. Этот эффект объясняется внутренними потерями лазерного излучения в активном элементе, которые связаны с его рассеянием на поперечных звуковых волнах плотности газа, возникающих во время импульса накачки из-за радиальной неравномерности энерговклада. Если гипотеза верна, то при уменьшении длины волны лазерного излучения следует ожидать увеличения этого эффекта, так как коэффициент преломления света в прозрачных средах, включая газы, с уменьшением длины волны возрастает.

В этой связи представляют интерес экспериментальные данные, подобные полученным в работе [1], для лазера с меньшей длиной волны при накачке осколками деления урана. В принципе, такие данные в настоящее время есть и они не противоречат предлагаемой гипотезе. Так, изучены характеристики He—Cd-лазера с ядерной накачкой на переходе $5s^{22}D_{5/2} \rightarrow 5p^2P_{1/2}$ иона Cd II с длиной волны 441,6 нм при использовании активных элементов разной конструкции [2, 3]. Однако достаточно точные количественные выводы на их основе сделать трудно, поскольку для разных активных элементов экспериментальные данные получены в разных условиях: в разных лабораториях, на разных импульсных реакторах, с использованием разной аппаратуры и методов обработки данных.

Для корректной проверки обсуждаемой гипотезы и оптимизации конструкции лазерно-активного элемента представляется целесообразным проведение исследований лазерных характеристик He—Cd-лазера с использованием активного элемента с малыми диаметром и толщиной уранового покрытия в условиях, близких к тем, в которых ранее были проведены измерения для элемента диаметром 48 мм и толщиной уранового покрытия ~ 10 мг/см² [3]. Настоящая работа посвящена таким исследованиям.

Устройство He—Cd-лазера и метод измерений (рис. 1). В качестве лазерно-активного в нем применен активный элемент, аналогичный использованному в работе [1]. Он представляет собой алюминиевую трубку внутренним диаметром 15,3 мм, покрытую изнутри слоем U_3O_8 толщиной 3 мг/см² (обогащение ^{235}U 90%), установленную на оси точно такой же, как в работе [3], трубы (кюветы) из коррозионно-стойкой стали (диаметр 48 мм, длина 2,8 м), но без уранового покрытия. Алюминиевая трубка состоит из пяти секций — двух наружных длиной 49 см, трех внутренних длиной 45 см. Соосность секций обеспечивается специальным тонкостенным дистанционирующим каркасом из дюралюминия. Длина промежутков между секциями составляет 1,5 см. На концах кюветы установлены герметичные торцевые узлы с юстируемыми диэлектрическими зеркалами внутреннего резонатора, вводами системы откачки, наполнения и очистки гелия, термопар и датчика давления.



Р и с. 1. Устройство He—Cd-лазера: 1 — торцевой юстировочный узел; 2 — труба (кювета); 3 — охлаждающий радиатор; 4 — дистанционирующая труба; 5 — экран из алюминиевой фольги; 6 — кольцо дистанционирующего каркаса; 7 — активный элемент; 8 — термоэлектрический нагреватель; 9 — втулка из кварцевой керамики; 10 — воздуховод; 11 — полиэтиленовый прутки; 12 — листовой кадмий; 13 — газоотводящая трубка

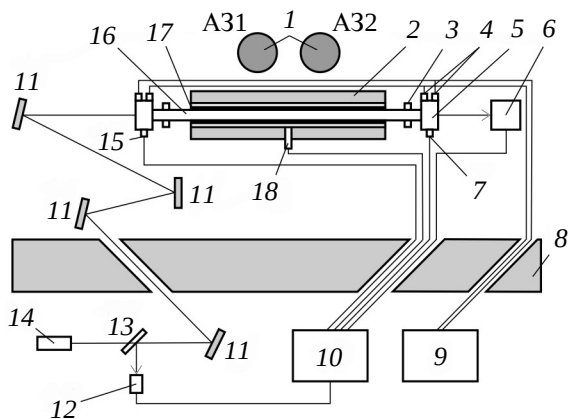
Трубу нагревали с помощью восьми термоэлектрических элементов диаметром 1,5 мм и длиной 2 м каждый, расположенных на ее внешней поверхности вдоль оси. Термоизоляция осуществлялась с помощью набираемых на трубу втулок из кварцевой керамики внутренним диаметром 49, наружным 70 мм и общей длиной 2 м. Для выравнивания продольного распределения температуры был применен экран из алюминиевой фольги с переменной по длине отражательной способностью. Температуру по длине активного элемента контролировали пятью термопарами, размещенными внутри трубы. Термопары внутрь трубы были введены через один из торцевых узлов с помощью герметичного ввода.

В исследованиях гелий непрерывно очищали путем прокачки со скоростью около 10 см³/с по замкнутому контуру через кювету и угольную ловушку, погруженную в жидкий азот. Холодный газ поступал в кювету с торцов, горячий отбирался с середины кюветы с помощью газоотводящих трубок из коррозионно-стойкой стали диаметром 10 мм. Такая система циркуляции газа, охлаждающие радиаторы на концевых частях кюветы, а также подогрев зеркал резонатора до 323 К минимизировали конденсацию паров кадмия на зеркалах.

Навески из металлического кадмия располагали в четырех закрытых сетками углублениях в газоотводящих трубках напротив промежутков между секциями активного элемента. В работе использовали естественную смесь изотопов кадмия. Полная масса загрузки составляла ~ 10 г.

Кювету размещали на оси облицованного листовым кадмием толщиной 0,5 мм цилиндрического замедлителя нейтронов длиной 2 м. Замедлитель набирался из полиэтиленовых прутков диаметром 20 мм и имел среднюю толщину стенки около 55 мм. Для предотвращения оплавления полиэтилена использовали тонкостенную дистанционирующую трубу диаметром 90 мм, которая позволяла создать гарантированный зазор между ним и кюветой, покрытой термоизоляцией и алюминиевой фольгой. Воздух в зазоре продували с помощью компрессора.

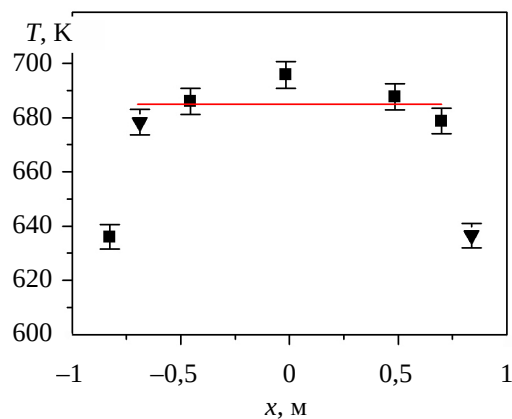
В эксперименте замедлитель с кюветой устанавливали на среднем ярусе первого рабочего места стенда «Б» на расстоянии ~ 350 мм



Р и с. 2. Схема эксперимента: 1 — активная зона реактора БАРС-6; 2 — замедлитель нейтронов; 3 — охлаждающий радиатор; 4 — вентиль; 5 — торцевой юстировочный узел; 6 — калориметр КДМ-3; 7 — устройство ввода термопар; 8 — радиационная защита реакторного бокса; 9 — система откачки, наполнения и очистки гелия; 10 — система регистрации показаний датчиков на базе персонального компьютера; 11 — плоское поворотное зеркало; 12 — поверхностно-барьерный кремниевый детектор; 13 — светоделительная пластина; 14 — юстировочный лазер; 15 — датчик давления ДМИ-2-3; 16 — кювета; 17 — нагреватель; 18 — вакуумная камера деления КНТ-5

между линией, соединяющей центры активных зон реактора БАРС-6, и осью активного элемента [4]. Расстояние между центрами активных зон реактора составляло 70 см (рис. 2). Систему откачки, наполнения, прокачки и очистки гелия располагали в измерительном зале и соединяли с кюветой с помощью двух трубопроводов из коррозионно-стойкой стали диаметром 10 мм, длиной около 15 м и четырех вентилях, установленных на ее торцевых узлах. Перед каждым пуском реактора кювету откачивали до давления 0,1 Па и наполняли свежим гелием. Давление гелия в кювете при комнатной температуре составляло 0,4 МПа. На рис. 3 видно, что на рабочем участке активного элемента длиной ~1,4 м, в котором выделяется более 90% энергии импульса накачки, распределение температуры с учетом погрешности измерения можно описать константой, составляющей 685 К.

Энергию лазерного излучения измеряли калориметром типа КДМ-3 с апертурой 70 мм, установленным в реакторном боксе на оси кюветы на расстоянии ~1,5 м от зеркала резонатора с пропусканием $T_1 = 2,35\%$ и кривизной $R = 10$ м. Часть излучения (~7%), выходящего через второе зеркало ($T_2 = 3,18\%$, $R = \infty$), выводили в измерительный зал и регистрировали поверхност-



Р и с. 3. Распределение температуры по длине активного элемента: ■ — измеренная температура; ▼ — температура, равная измеренной в точке, симметричной относительно $x = 0$; — — аппроксимация методом наименьших квадратов (координата $x = 0$ соответствует середине активного элемента)

но-барьерным кремниевым детектором с апертурой входного зрачка 10 мм. Сигнал с детектора поступал на цифровой запоминающий осциллограф Tektronics TDS 1012 (США) и фиксировался в памяти персонального компьютера. Форму импульса накачки регистрировали вакуумной камерой деления КНТ-5, установленной в замедлителе. Энерговклад осколков деления в активную среду определяли по изменению давления гелия в кювете во время импульса накачки, который измеряли датчиком давления ДМИ-2-3, установленным в одном из торцевых узлов кюветы. При этом кювета находилась при комнатной температуре, давление гелия в ней составляло 0,2 МПа, вентили на торцевых узлах были закрыты. При давлении 0,2 МПа и комнатной температуре плотность гелия, определяющая потери энергии осколков деления, равна его плотности в рабочем режиме ($P = 0,47$ МПа, $T = 685$ К).

Следует отметить, что устройство исследуемого лазера, за исключением диаметра активного элемента, толщины уранового покрытия и давления гелия, методы измерения и обработки данных были идентичны использованным в работе [3].

Результаты и обсуждение. В работе было выполнено пять пусков реактора БАРС-6 — два для измерения генерационных характеристик лазера, один для определения энерговклада и два для изучения влияния газовой термолинзы на работу лазера. Результаты первых трех

Результаты эксперимента

Номер опыта	$N_f, 10^{17}$ дел.		P_k , МПа	T , К	P_T , МПа	ΔP_y^* , кПа	Q , Дж	E_k^* , Дж	$E_{\text{л}}$, Дж	ϵ_E , %
	Активная зона									
	1	2								
1	1,02	1,00	0,4	685	0,47		20	0,046	0,108	$0,5 \pm 0,1$
2	1,00	0,95	0,4	685	0,47		19	0,044	0,104	$0,5 \pm 0,1$
3	1,07	1,03	0,2	293	0,2	2,7	21			

*Погрешность измерения получена из разброса серий в дополнительном эксперименте и составляет ~10%.

пусков приведены в таблице и показаны на рис. 4, 5. В таблице N_f — число делений в импульсе реактора в активных зонах 1 и 2, P_k — давление гелия в кювете при комнатной температуре, T — рабочая температура гелия в кювете, P_T — давление гелия при рабочей температуре, ΔP_y — установившееся изменение давления гелия в кювете после действия импульса накачки, Q — энерговклад осколков деления в актив-

ную среду элемента, E_k — показания калориметра, $E_{\text{л}}$ — энергия лазерного излучения, ϵ_E — эффективность лазера (по энергии).

Энерговклад осколков деления в активную среду активного элемента определяли по формуле [5]

$$Q = k \Delta P_y V,$$

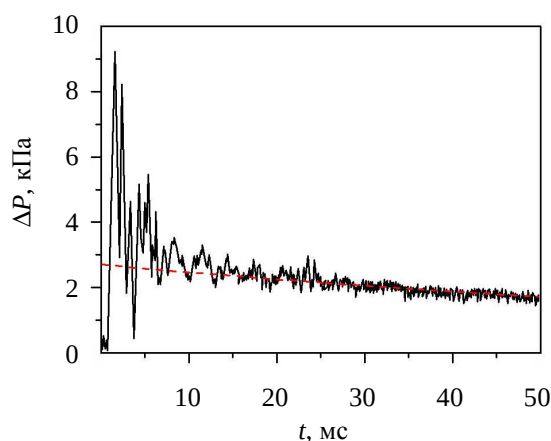
где $k = 1,54 \text{ Дж}/(\text{Па} \cdot \text{м}^3)$ — размерный множитель; ΔP_y — установившееся изменение давления гелия в кювете в результате действия импульса накачки; $V = 5,066 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ — объем кюветы. Изменение давления ΔP_y определяли по данным датчика ДМИ-2-3 в приближении экспоненциального закона остывания газа в кювете. С этой целью экспериментальные данные аппроксимировали экспоненциальной зависимостью (см. рис. 4). Постоянную времени и предэкспоненциальный множитель определяли методом наименьших квадратов по интервалу времени 20—50 мс, к началу которого, как видно на рис. 4, звуковые процессы в значительной мере затухают и их влиянием можно пренебречь. В качестве установившегося изменения давления ΔP_y принимали экспоненту при $t = 1 \text{ мс}$. Энерговклад Q для опытов 1, 2 получали путем нормировки экспериментальных данных опыта № 3 на соответствующее число делений в импульсе реактора.

Энергию лазерного излучения и эффективность лазера определяли по формулам

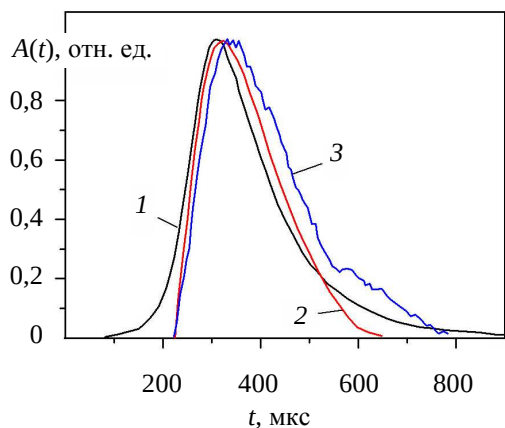
$$E_{\text{л}} = E_k T_1 / (T_1 + T_2); \quad \epsilon_E = 100 E_{\text{л}} / Q,$$

где $T_1 = 2,35\%$, $T_2 = 3,18\%$ — пропускание зеркал резонатора.

Из таблицы и работы [3] следует, что эффективность лазера с активным элементом диаметром 15,3 мм и толщиной покрытия из U_3O_8 3 мг/см² в 2,5 раза больше эффективности лазера



Р и с. 4. Зависимость от времени изменения давления гелия в кювете после действия импульса накачки: — — эксперимент; - - - функция $\Delta P(t) = 2,7 \exp(-t/110)$

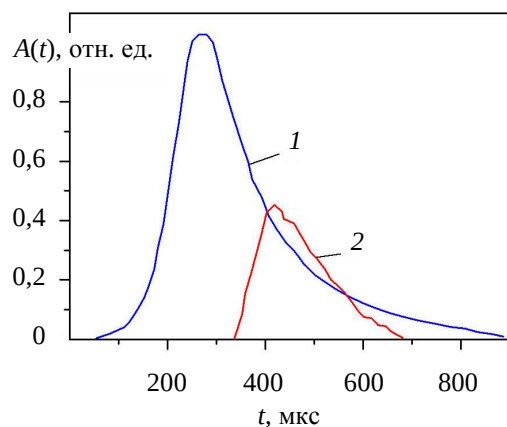


Р и с. 5. Импульс накачки (1), генерации (2) [3] и в опыте № 2 настоящей работы (3)

с активным элементом диаметром 48 мм и толщиной покрытия из металлического урана $\sim 10 \text{ мг/см}^2$. Это примерно в 1,5 раза больше соответствующего эффекта, наблюдаемого в работе [1] для He—Ar—Xe-лазера. Это подтверждает гипотезу о внутренних потерях лазерного излучения, обусловленных его рассеянием на поперечных звуковых волнах плотности газа, возникающих во время импульса накачки из-за радиальной неоднородности энерговклада.

Особенностями приведенных к одному импульсу накачки импульсов лазерной генерации, полученных в настоящей работе и работе [3], являются смещение максимума импульса и уширение его заднего фронта с уменьшением диаметра и толщины покрытия активного элемента (см. рис. 5). Качественно такое поведение можно объяснить, если учесть влияние на потери излучения двух конкурирующих процессов в активной среде в течение импульса накачки, имеющих разную природу и приводящих к противоположной зависимости потерь излучения от времени, — не связанный с переносом вещества сравнительно быстрый процесс распространения в среде звуковых волн и более медленный процесс образования собирающей термолинзы, обусловленный переносом газа. Уширение заднего фронта импульса 3 и смещение его максимума относительно максимума импульса 2 объясняются меньшим влиянием соответствующих процессов на потери излучения из-за меньшей радиальной неоднородности энерговклада.

Влияние образования термолинзы на потери излучения показано рис. 6. Видно, что в отличие от эксперимента с более устойчивым плоско-



Р и с. 6. Импульс накачки (1) и генерации (2) в опыте с плоскопараллельным резонатором

гнутым резонатором (см. рис. 5) при использовании глухого плоскопараллельного резонатора с пропусканием зеркал 0,15% лазерная генерация возникает на заднем фронте импульса накачки. Отсюда следует, что только к этому времени в активной среде элемента формируются параметры термолинзы, которые необходимы для компенсации сравнительно высоких потерь лазерного излучения, характерных для плоскопараллельного резонатора.

Заключение. Полученные в работе результаты подтверждают высказанную ранее [1] гипотезу о внутренних потерях лазерного излучения в активном элементе газового лазера с накачкой осколками деления урана, связанных с рассеянием света на поперечных звуковых волнах плотности газа, возникающих во время импульса накачки из-за радиальной неравномерности энерговклада.

Одним из способов увеличения эффективности лазера является уменьшение диаметра и толщины уранового покрытия активного элемента. Экспериментально показано, что для He—Cd-лазера уменьшение диаметра активного элемента и толщины уранового покрытия примерно в 3 раза приводит к увеличению его эффективности с 0,2 до 0,5%.

Следует отметить, что в работе применялась естественная смесь изотопов кадмия. При использовании моноизотопного кадмия ^{112}Cd , например, ^{114}Cd или ^{116}Cd можно ожидать увеличения эффективности лазера до $\sim 1,5\%$ благодаря увеличению коэффициента усиления за счет исключения эффекта изотопического сдвига спектральных линий у разных изотопов кадмия [6].

В заключение авторы выражают признательность А.А. Суворову и В.А. Жеребцову за интерес к работе и полезные обсуждения, Ю.А. Дюжову за помощь в проведении эксперимента на реакторе, а также персоналу стенда «Б» за бесперебойную работу реактора БАРС-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Magda E., Grebyonkin K., Kryzhanovsky V. Nuclear pumped lasers at the institute of technical physics. — In: Proc. Intern. Conf. LASER'90. McLean, USA, 1991, p. 827—834.
3. Денежкин И.А., Дьяченко П.П., Степанов С.П. Генерационные характеристики кадмиевого лазера с накачкой осколками деления. — В сб.: Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2016, т. 2, с. 129—132.
4. Дьяченко П.П., Еловский О.А., Прохоров Ю.А. и др. Реакторно-лазерный комплекс «Стенд-Б». — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 337—342.
5. Дьяченко П.П., Дьяченко Н.П., Зродников А.В., Чанов В.П. Измерение импульсного энерговклада осколков деления в газовую среду по скачку давления: Препринт ФЭИ-2256, 1992.
6. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981.

Поступила в Редакцию 23.11.18

УДК 621.039.51

ВОЗМОЖНОСТЬ ЭКСПОРТА БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ В УСЛОВИЯХ МЕЖДУНАРОДНОГО РЕЖИМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

Гулевич А.В., Декусар В.М., Чебесков А.Н. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск),

Кучинов В.П. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),

Волошин Н.П. (РФЯЦ — ВНИИТФ, г. Снежинск)

e-mail: chebes@ippe.ru

На современном этапе развития в мире сложился консенсус о главенствующей роли быстрых реакторов в будущей широкомасштабной ядерной энергетике. Помимо основной роли таких реакторов по обеспечению топливом в условиях дефицита ресурсов природного урана, как это рассматривалось ранее, в настоящее время важным элементом их использования становится также снижение в рамках двухкомпонентной ядерной энергетике объема отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов. Технология быстрых натриевых реакторов отечественной конструкции успешно показана и в настоящее время вступает в этап ее коммерциализации. В этой связи в будущем может появиться возможность экспорта быстрых реакторов в страны, такими технологиями не обладающие. Впервые эта тема была предложена для обсуждения на Международной конференции МАГАТЭ по быстрым реакторам, которая состоялась в Париже (Франция) в 2013 г. [1]. Затем последовали заявления Государственной корпорации «Росатом» о том, что отечественная технология быстрых реакторов и замкнутого ядерного топливного цикла может выйти на международные рынки через 10—15 лет в качестве экспортного продукта ядерно-энергетической отрасли [2, 3].

Все это определяет необходимость анализа экспорта АЭС с быстрыми реакторами, включая ядерное топливо, а также установок их ядерного топливного цикла с учетом как технико-экономических показателей энергоблоков, так и системы международного режима нераспространения ядерного оружия.

Настоящая статья является продолжением рассмотрения условий экспорта, начатого в мае 2018 г. в рамках образованной рабочей группы, состоящей из представителей организаций Государственной корпорации «Росатом». Рабочая группа подготовила заключение «Условия экспорта энергоблоков на базе реакторов на быстрых нейтронах и установок пристанционного ядерного топливного цикла с учетом требований нераспространения ядерного оружия», которое было рассмотрено на заседании Президиума НТС Госкорпорации «Росатом» 26 декабря 2018 г. с учетом замечаний, высказанных представителями самой Госкорпорации «Росатом», АО «Концерн «Росэнергоатом», учеными подведомственных НИИ и институтов РАН. Настоящая статья продолжает обсуждение основных элементов, характеризующих место быстрых реакторов в будущем ядерном экспорте в контексте соблюдения международного режима нераспространения ядерного оружия.