

ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ НАКАЧКИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ЛЯН

PULSED REACTOR PARAMETERS FOR PUMPING A LARGE-SIZE NPL

В. Ф. Колесов, В. Х. Хоружий, В. Б. Гречушкин, А. А. ПикULEV
V. F. Kolesov, V. Kh. Khoruzhy, V. B. Grechushkin, A. A. Pikulev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Предложена и обоснована расчетами конструкция быстрого импульсного реактора с большой осевой полостью, способной вмещать многоканальный лазерный модуль для генерирования мощных импульсов оптического излучения. Приведены результаты расчета параметров реактора, а также смещений и напряжений в его топливных стержнях. Сформулированы предварительные заключения относительно процедуры генерирования импульсов делений в предложенном реакторе.

There is advanced and substantiated by calculations the design of a fast pulsed reactor with a large axial cavity that can contain a multi-channel laser module to generate high-power pulses of optical radiation. There are given the calculation results of reactor parameters as well as those of displacements and tensions in its fuel rods. Preliminary conclusions concerning the procedure of fission pulses generation in the suggested reactor are formulated.

До настоящего времени остается актуальной задача создания мощных и мобильных генераторов импульсного лазерного излучения. Один из перспективных путей создания таких устройств связан с использованием лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН), действующих на базе импульсных ядерных реакторов. Обычно ЛЯН представляют собой лазеры ближнего инфракрасного или видимого диапазона излучения, возбуждаемые продуктами ядерных реакций делящихся материалов с нейтронами [1]. Имеются указания, что в отношении эффективности преобразования энергии ядерных излучений в лазерное излучение определенными преимуществами обладают реакторы с наиболее короткой длительностью импульса, т. е. импульсные реакторы на быстрых нейтронах.

В докладе предложена и обоснована расчетами конструкция быстрого импульсного реактора с большой осевой полостью, способной вмещать многоканальный лазерный модуль для генерирования мощных импульсов оптического излучения. Приведены конфигурация и расчетные параметры реакторно-лазерной системы, действующей на базе указанного импульсного реактора. Рассмотрены первоначальный, т. е. исходный вариант системы, несколько этапов оптимизации этого варианта и заключительный вариант системы, названный «оптимальным». Сформулированы предварительные заключения относительно процедуры генерирования импульса делений в предложенной системе.

Структурное исполнение лазерного модуля в первоначальном варианте реакторно-лазерной системы принято аналогичным структуре успешно испытанного модуля в реакторе «БАРС-5 + РУН-2» [2]. Здесь он также представляет собой ансамбль из большого числа плотно упакованных лазерных каналов в окружении общего для всего ансамбля замедлителя. Отличие лазерного модуля первоначального варианта рассматриваемой реакторно-лазерной системы от модуля работы [2] в основном заключается в многократно большем числе лазерных каналов и существенно большей длине их рабочих зон.

1. Первоначальный вариант реакторно-лазерной системы

Предполагалось, что активная зона (АЗ) реактора имеет вид полого цилиндра с горизонтальной ориентацией оси. Цилиндр по длине разбит на три блока, разведенных по оси на некоторое расстояние (рис. 1, 2). Каждый блок АЗ составлен продольными, клиновидными в поперечном сечении топливными стержнями (рис. 3) из сплава урана 90 %-го обогащения по ^{235}U с 10 масс. % молибдена. Разбиением АЗ на три блока достигается, во-первых, укорочение клиновидных стержней в целях снижения в них динамических напряжений и обеспечение большей конструктивности

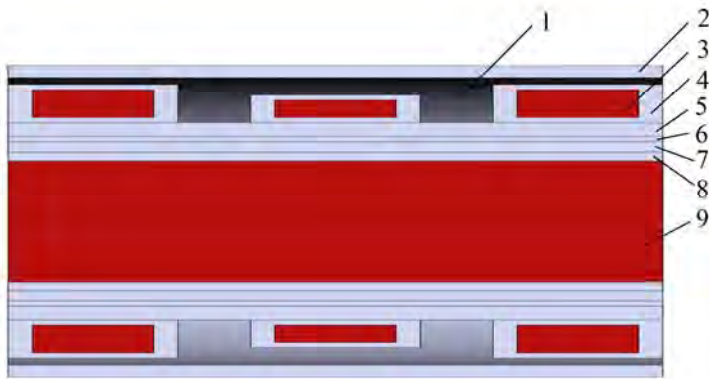
при их изготовлении. Во-вторых, это создает условия для эффективного выравнивания осевого распределения потока нейтронов в АЗ и лазерном модуле и обеспечивает гарантированную отрицательность температурного коэффициента реактивности.

Далее, принималось, что:

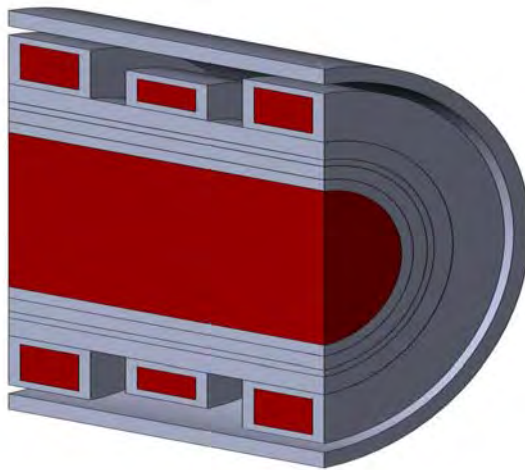
– в целях реализации эффективного средства аварийной защиты реактора каждый из трех блоков АЗ разбит на неподвижную верхнюю и мобильную нижнюю половины. Каждый из шести элементов АЗ заключен в свой корпус из стали толщиной 1 см;

– в целях уменьшения массы уран-молибденового сплава и реализации приемлемо конструктивных импульсных блоков, активная зона окружена боковым отражателем из железа толщиной 5 см. Аварийная защита реактора осуществляется в результате быстрого перемещения на расстояние 30 см всей нижней половины реактора под действием силы тяжести, мощных пружин, или пневматического устройства.

В конструкции реактора предусмотрены меры для реализации свободного и независимого температурного расширения каждого топливного стержня во всех направлениях. Свободные, независимые посадка и расширение топливных стержней в поперечных направлениях осуществляются, как показано на рис. 3, 4, в результате предусмотренных на корпусе и стержнях продольных выступов и пазов, в продольном направлении – в результате размещения на торцах стержней легких тарельчатых пружин. Воздействие на корпус радиальных изгибных колебания стержней нейтрализуется специальными кольцевыми поясками на внутренних поверхностях чехлов АЗ.



а



б

Рис. 1. Конфигурация реактора и загруженного в полость АЗ расчетного макета лазерного модуля (масштаб условный): а) конфигурация с указанием функционального назначения узлов: 1 – воздушное пространство между блоками АЗ и зазоры; 2 – отражатель нейтронов; 3 – блок АЗ; 4 – корпус блока АЗ; 5 – корпус макета лазерного модуля; 6 – слой кадмия; 7 – полиэтиленовый замедлитель нейтронов; 8 – алюминиевый корпус лазерного модуля; 9 – макет лазерного модуля; б) сечение АЗ реактора и лазерного модуля в аксонометрической проекции

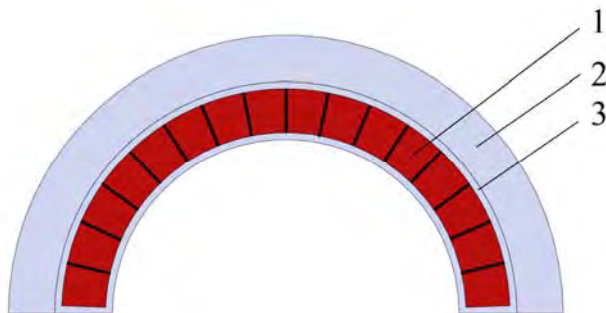


Рис. 2. Вид активной зоны в радиальном разрезе: 1 – клиновидный топливный стержень; 2 – отражатель нейтронов; 3 – корпус блока АЗ

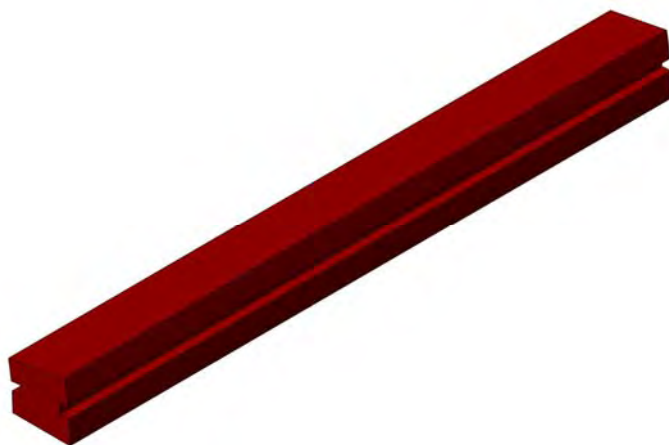


Рис. 3. Аксонометрическая проекция клиновидного топливного стержня

Указанные меры будут гарантировать отсутствие ударов стержней друг по другу и по корпусу, сохранность во время импульса первоначальной конфигурации АЗ реактора и лазерного модуля, а также воспроизводимость параметров импульсов ядерного и оптического излучений.

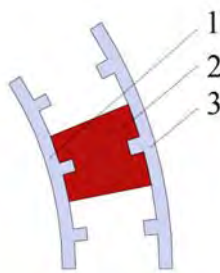


Рис. 4. Конструкционные ограничители азимутального смещения топливных стержней: 1 – внутренняя стенка корпуса; 2 – клиновидный топливный стержень; 3 – внешняя стенка корпуса

В расчетах нейтронных характеристик первоначального варианта системы была применена модель лазерного модуля с однородно распределенными в его объеме материальными ингредиентами среды. При этом предполагалось, что усредненный материальный состав в заполнителе объема алюминиевой лазерной кюветы в рассматриваемой системе в точности такой же, как в устройстве статьи [2] (см. табл. 1).

Усредненный состав лазерного модуля

материал	Al	Fe	U ₃ O ₈	He	Ar	Xe
плотность, г/см ³	0,4094	0,0925	3,031 · 10 ⁻³	0,5218 · 10 ⁻³	0,7447 · 10 ⁻³	0,0248 · 10 ⁻³

Применительно к рассмотренной здесь системе принято:

– диаметр полости по корпусу АЗ равен 60,2 см;

– толщина стенки, внутренний диаметр и длина трубчатого полиэтиленового замедлителя нейтронов равны 3, 52 и 246 см соответственно;

– аналогичные параметры для алюминиевой лазерной кюветы равны 1, 50 и 246 см.

Критические размеры реактора и распределение чисел делений в различных его областях рассчитывались методом Монте-Карло с помощью пакета программ С-007 [3]. Расчеты коэффициентов реактивности проводились с помощью многогрупповой теории возмущений [4]. Расчет функции возмущений реактивности осуществлялся по программе САТУРН [5]. По этой программе рассчитывались также распределения потока нейтронов, плотности делений и температур в объеме активной зоны реактора. Расчеты импульсов делений проводились в рамках точечной модели кинетики с учетом присутствия в реакторе водородосодержащего замедлителя (полиэтилена).

Нейтронные константы для делящихся и большинства других ядер брались из пакета программ С-007 [3], для водорода в полиэтилене – из библиотеки ENDF/B-5, для кадмия – из ENDL-82, для ксенона – из ENDF/B-6.8.

Реальная плотность уран-молибденового сплава, равная ~ 17 г/см³, из-за наличия зазоров между клиновидными стержнями была понижена на 5 %. Таким образом, в расчетах она принималась равной 16,15 г/см³. Теплоемкость уран-молибденового сплава принята равной 0,147 Дж/(г·°С). Плотности и теплоемкости других материалов брались из Справочника [6].

В реакторах с металлической активной зоной реактивная обратная связь осуществляется лишь посредством теплового расширения структурных элементов реактора. Связь изменений коэффициента размножения нейтронов $k_{эф}$ с деформациями среды АЗ и реактора в целом задается с помощью функционала [7]

$$\Delta k_{эф}(t) = \int_V \bar{u}(\vec{r}, t) grad W(\vec{r}) d\vec{r} \quad (1)$$

где $\bar{u}(\vec{r}, t)$ – вектор термоупругих смещений; $W(\vec{r})$ – функция возмущений реактивности.

Для расчета коэффициентов температурного гашения реактивности в быстрых импульсных реакторах, а также механических напряжений в активных зонах требуются аналитические решения динамических задач термоупругости применительно к составляющим АЗ деталям. Если механические напряжения в АЗ могут быть определены также с помощью двумерных и трехмерных численных программ, то для расчета динамических коэффициентов гашения реактивности требуются именно аналитические решения. Только такие коэффициенты гашения реактивности можно адекватно встраивать в уравнения динамики быстрых реакторов [7].

В этих целях были найдены решения квазистатической и динамической задач термоупругости для стержня при произвольном относительно z распределении температуры [8], поскольку имеющиеся в литературе решения получены лишь для стержней с симметричным относительно их середины разогревом. Кроме того, ввиду больших перепадов температуры в радиальном направлении АЗ, на основе данных монографий [9, 10], также было сформулировано решение динамической задачи термоупругости для поперечных изгибных смещений стержня.

Отъюстированная конфигурация реактора представлена на рис. 5 с указанием размеров. Толщина бокового железного отражателя в реакторе равна 5 см. Внутренний диаметр блоков АЗ по топливному материалу равен 62,2 см. Статические параметры этого реактора, полученные в результате расчетов, приведены в табл. 2.

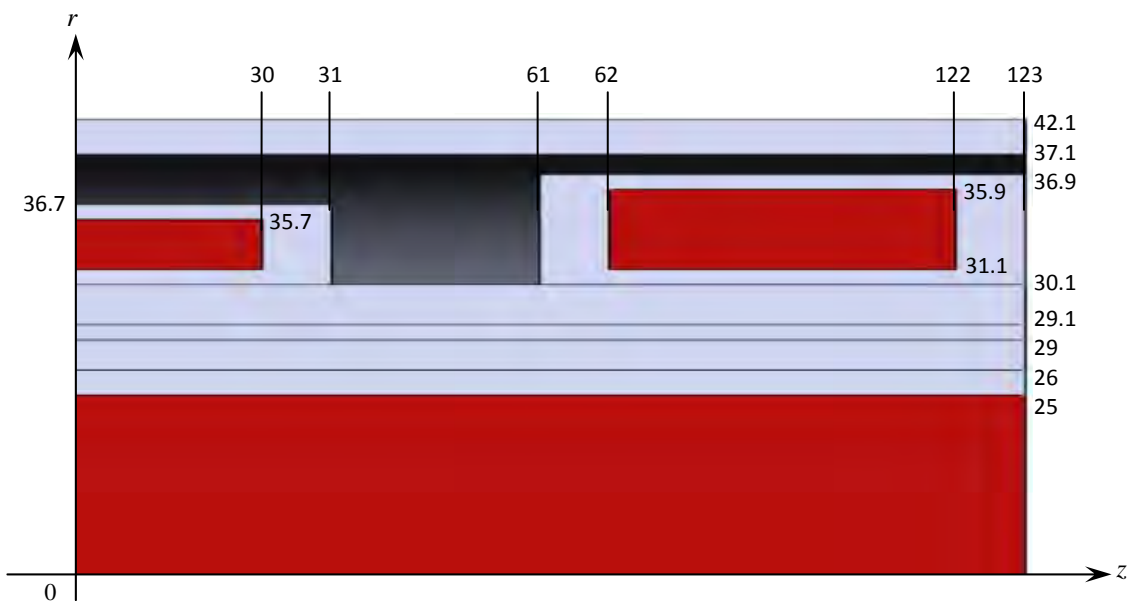


Рис. 5. Расчетно отъюстированная конфигурация реактора в первоначальном варианте реакторно-лазерной системы с указанием принятых или полученных в результате расчета размеров

Таблица 2

Статические параметры реактора

Параметр	Значение параметра	Параметр	Значение параметра
$k_{эф}$	0,9977	Доля делений в блоках АЗ и макете лазерного модуля, %:	35,31
Время жизни мгновенных нейтронов, мкс	13,2		
$\beta_{эф}$	0,00666	– левый крайний блок АЗ	25,68
Полная масса уран-молибденового сплава в АЗ, т	2,90	– центральный блок АЗ	35,10
		– правый крайний блок АЗ	3,91
Масса железного отражателя, т	2,20	Убыль реактивности при сбросе на 30 см (в единицах $\beta_{эф}$) нижней половины отражателя	– 4,60
Коэффициент гашения реактивности, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (дел. $^{-1}$)	$-4 \cdot 10^{-6}$ ($-6,3 \cdot 10^{-22}$)		

Максимальная температура АЗ достигается к концу импульса, конкретно, – ко времени окончания счета на ЭВМ, равного 100 мс после пика импульса. Предполагалось, что на пространственном распределении температуры в АЗ эффекты теплопроводности и теплоотдачи не успевают сказываться и, таким образом, это распределение зависит только от плотности делений в топливном материале. Существенно, что максимальная температура АЗ определялась с учетом всплеска плотности делений, наблюдаемого в узкой полоске уран-молибденового сплава, граничащей с полостью, где размещен лазерный модуль. Этот всплеск обусловлен проникающими через кадмиевую защиту замедленными нейтронами. Получено, что приграничный всплеск плотности делений повышает максимальную температуру АЗ примерно на 25 %.

Результаты расчетов свидетельствуют, что разбиение АЗ по оси на три блока и разведение блоков на заметное расстояние позволило, как и задумывалось, не только резко снизить механические напряжения в топливном материале, но и создать условия для регулирования осевого распределения плотности делений в АЗ и макете лазерного модуля. Оно позволило также реализовать достаточно высокий коэффициент температурного гашения реактивности. Несмотря на очень значительные размеры макета лазерного модуля и наличие пустых промежутков между блоками АЗ, пространственное распределение плотности делений в макете лазерного модуля на удивление однородно. Изменения в осевом распределении плотности делений в макете практически на всей его

длине не выходят за пределы 25 %. Еще меньше масштаб перепада в радиальном распределении плотности делений. Так, отношение плотности делений на оси макета к средней по радиусу плотности делений равно $\sim 0,9$.

Масса загруженного в АЗ уран-молибденового сплава получена равной 2,9 т, масса отражателя из железа – 2,2 т. Коэффициент температурного гашения реактивности получен равным $-6,3 \cdot 10^{-22}$ дел. $^{-1}$ или $-4 \cdot 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$.

При максимальной температуре АЗ 600 $^{\circ}\text{C}$ импульс делений в первоначальном варианте реакторно-лазерной системы характеризуется числом делений $\sim 4 \cdot 10^{18}$ и энерговыделением 115 МДж.

Приближенная оценка энергии лазерного импульса для первоначального варианта реакторно-лазерной системы сделана на основе привязки к экспериментальным данным для лазерного модуля реактора «БАРС-5 + РУН-2». Учитывалось, что отношение рабочих объемов модулей рассмотренного здесь реактора и реактора «БАРС-5 + РУН-2» равно 21 и максимальная энергии лазерного импульса в модуле «БАРС-5 + РУН-2» равна 500 Дж. С помощью этих данных получено, что модуль рассматриваемого здесь устройства будет способен генерировать лазерный импульс с энергией около 10 кДж.

2. Оптимизация первоначального варианта реакторно-лазерной системы

В настоящем разделе доклада приведены результаты расчетной оптимизации первоначального варианта реакторно-лазерной системы и уточнения расчетной модели рассматриваемой системы. Было выполнено несколько этапов оптимизации.

На первом этапе были произведены:

1. Замена в АЗ сплава урана 90 %-ого обогащения по ^{235}U с 10 масс. % молибдена сплавом урана 96 %-ого обогащения по ^{235}U с 1,5 масс. % молибдена.
2. Замена полиэтилена (замедлитель нейтронов) гидридом циркония.
3. Замена кадмия (поглотитель тепловых нейтронов) титан-гадолиниевым сплавом.
4. Переход от лазерного модуля в виде однородной среды (макет лазерного модуля) к модулю со структурой, близкой к реальной (рис. 6).
5. Переход к оценке энергии лазерного луча не путем сравнения с выходными данными лазерного устройства в реакторе «БАРС-5 + РУН-2», а на основе прямой расчетной оценки доли делений в лазерном модуле, энергии делений, передаваемой рабочему газу лазера, и предположения о 2 %-ой эффективности преобразования этой энергии в оптическое излучение.

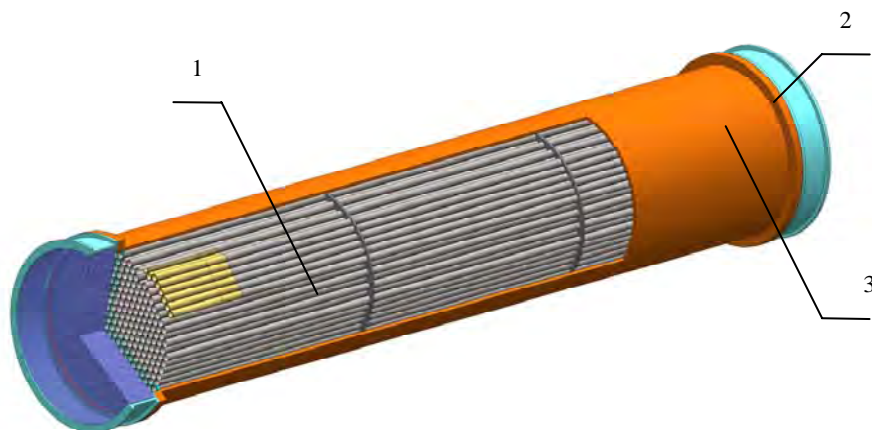


Рис. 6. Кювета лазерного модуля: 1 – лазерные каналы (361 канал); 2 – окно лазерного модуля; 3 – кювета лазерного модуля

Целями расчетной оптимизации являлись уточнение параметров реакторно-лазерной системы, снижение массы активной зоны и расширение рабочих диапазонов температуры для материалов, замедляющих и поглощающих нейтроны.

На втором этапе оптимизации реакторо-лазерной системы к изменениям первого этапа добавлен еще один пункт, заключающийся в переносе части гидрида циркония из монолитного слоя замедлителя в объем лазерного модуля, где он заполнил все промежутки между лазерными каналами. В результате второго этапа оптимизации достигнуто дальнейшее уменьшение полной массы АЗ, повышение эффективности замедлителя нейтронов и, вследствие этого, значительное увеличение энерговыделения в лазерном модуле. К сожалению, операции второго этапа имели и отрицательное последствие: почти полторакратное увеличение ширины импульса делений.

Главной целью третьего, заключительного, этапа оптимизации реакторно-лазерной системы было введение в конструкцию системы коаксиальных цилиндрических щелей для реализации гелиевого охлаждения АЗ реактора и лазерного модуля. Одновременно с созданием щелей для прокачки охлаждающего гелия вносились изменения в слои гидрида циркония и титан-гадолиниевого сплава, положительно сказавшиеся на параметрах импульса оптического излучения.

Заключительный вариант реакторно-лазерной системы назван «оптимальным». Расчетные конфигурация и параметры оптимальной реакторно-лазерной системы с урановым слоем на подложках лазерных каналов толщиной 5 мг/см^2 (90 % обогащения по ^{235}U) представлены на рис. 7 и в табл. 3.

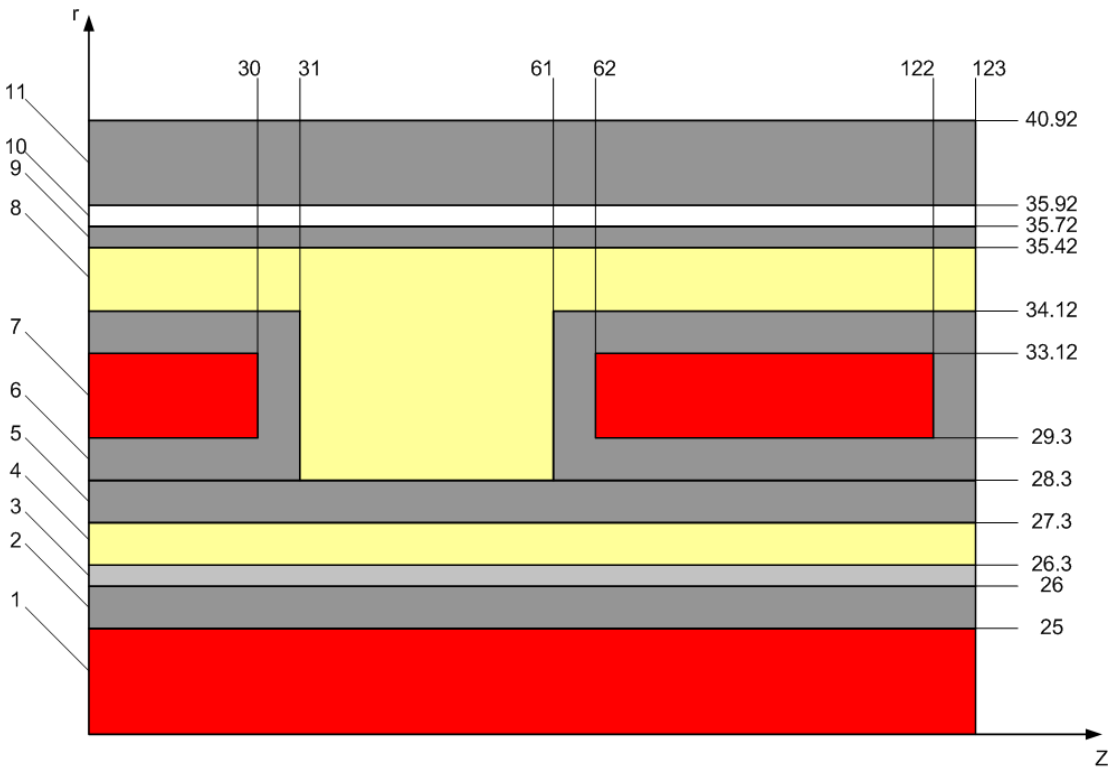


Рис. 7. Конфигурация и размеры компонентов оптимальной реакторно-лазерной системы (масштаб условный): 1 – лазерный модуль; 2 – корпус лазерного модуля (сплав Zr с 2,5% Nb); 3 – бор; 4, 8 – охлаждающий газ He; 5 – корпус (сталь 12X18H10T); 6 – стальные чехлы; 7 – активная зона; 9 – стальной ограничитель течения газа; 10 – вакуум; 11 – стальной отражатель

Приведенное в табл. 3 значение полуширины импульса определялось как $\theta_{1/2} \approx \frac{3.5255}{\alpha}$,

где α – начальный обратный период реактора $\alpha = \frac{\rho_{\text{МГН}}}{\tau}$, $\rho_{\text{МГН}}$ – начальная реактивность, τ – время жизни нейтронов в реакторе.

Осевые смещения топливных стержней в оптимальном варианте системы осуществляют- ся, практически, без проявления динамических эффектов. В отличие от осевых смещений, ради- альные изгибные смещения, ввиду низкочастотности этого процесса, имеют четко выраженный осциллирующий характер с периодом колебаний 3,2 мс. В изгибных смещениях стержня заметно проявляется лишь первая гармоника колебаний, имеющая простую дугообразную форму.

Таблица 3

Параметры оптимальной реакторно-лазерной системы

Параметр	Значение параметра	Параметр	Значение параметра
Состав лазерно-активной среды	He – 3,5 атм Ar – 0,5 атм Xe – 1 мм рт. ст.	Полное энерговыделение в системе Y, дел. (МДж)	$5,19 \cdot 10^{18}$ (149)
Время жизни нейтронов, мкс	0,4850	Коэффициент гашения реактивности A, дел. ⁻¹	$0,975 \cdot 10^{-21}$
Полуширина импульса, мс	0,756	Начальная реактивность $\rho_{мен}$	$0,00219 \ 0,329 \beta_{эф}$
Полная масса АЗ, кг	2370	Энергия лазерного излучения, кДж U / U _{3O₈}	10,09 / 8,20
Полная масса лазерного модуля, кг	950	Масса отражателя нейтронов, кг	2316
Полная масса всей реакторно-лазерной системы, кг	6990	–	–

Примечания:

U – слой металлического урана-235 (90 % обогащения); U_{3O₈} – слой окиси-закиси урана-235 (90 % обогащения). В расчетах мощности лазерной генерации (выход света) принималось, что эффективность преоб- разования поглощенной газом энергии в лазерное излучение равна 2 %

Максимальное осевое смещение торцов стержня в импульсе составляет ~2 мм для правого торца и ~–2 мм для левого торца стержня. Максимальные радиальные изгибные смещения равны ~ 0,6 мм на торцах и ~ –0,4 мм в середине стержня. Механические напряжения в стержне в зави- симости от времени слегка осциллируют. Максимальное в объеме стержня эквивалентное по Ми- зесу напряжение равно ~ 280 МПа, что не превышает пределов текучести и прочности материала стержня.

Процедура генерирования импульса в рассмотренной здесь реакторно-лазерной системе более сложна, чем в существующих быстрых реакторах. Осложнения в нашем случае возникают в связи с массивностью органов регулирования реактивности и значительным, в виду большой мас- сы АЗ, источником нейтронов от спонтанных делений ядер урана. Метод флуктуационной задерж- ки импульса в нашем случае не столь эффективен, как в случае компактных быстрых реакторов.

При составлении предварительного заключения относительно возможных в применении к рассмотренной реакторно-лазерной системе процедурах генерирования импульса предполагалось, что эти процедуры могут базироваться на операциях быстрого подъема нижних половин АЗ и от- ражателя. Применительно к этому случаю получено, что при детерминированной стартовой мощ- ности реактора (при мощности ~1 Вт) скорость подъема нижней половины отражателя должна быть не меньше 83 см/с. В условиях предельно низкой стартовой мощности эта скорость может быть понижена в 2–3 раза.

Заключение

Предложена и обоснована расчетами конструкция быстрого импульсного реактора с боль- шой осевой полостью, способной вмещать многоканальный лазерный модуль для генерирования мощных импульсов оптического излучения. Реактор имеет форму цилиндра с горизонтальным направлением оси, составленного по длине из трех блоков, разделенных пустыми промежутками. Разбиением АЗ на три разведенных на некоторое расстояние блока достигается:

– заметное удлинение лазерных каналов и значительное выравнивание в них осевого рас- пределения плотности делений;

– упрощение технологии изготовления топливных стержней и резкое снижение в них амплитуды динамических напряжений;

– увеличение температурного (отрицательного) коэффициента реактивности.

Выбором конструкции топливных стержней с пазами на боковой поверхности и легкими тарельчатыми пружинами на торцах и созданием специальных кольцевых выступов на внутренних поверхностях чехлов АЗ гарантируется отсутствие ударов стержней друг по другу и по корпусу. Этим, в свою очередь, гарантируется сохранность во время импульса начальной конфигурации АЗ и воспроизводимость параметров импульса.

Выполнено несколько этапов оптимизации первоначально подобранной реакторно-лазерной системы. В результате оптимизации достигнуто повышение точности расчетов, заметное снижение массы активной зоны, существенное расширение рабочих диапазонов температуры замедлителя и поглотителя нейтронов. Заключительный вариант реакторно-лазерной системы имеет следующие параметры:

– полное энерговыделение в активной зоне системы – 150 МДж;

– полуширина нейтронного импульса – 0,76 мс;

– оцененная энергия лазерного излучения – около 10 кДж;

– полная масса всей реакторно-лазерной системы – 6990 кг.

Приведены некоторые данные об осевых и изгибных радиальных смещениях и напряжениях в топливных стержнях. Максимальное в объеме стержня эквивалентное по Мизесу напряжение равно ~280 МПа, что не превышает пределов текучести и прочности материала стержня.

Составлено предварительное заключение о процедуре генерирования импульса делений в системе. Показано, что эта процедура может базироваться на операциях быстрого подъема нижних половин АЗ и отражателя. При детерминированной стартовой мощности реактора (при мощности ~ 1 Вт) скорость подъема нижней половины отражателя должна быть не меньше 83 см/с. В условиях предельно низкой стартовой мощности эта скорость может быть понижена в 2–3 раза.

Авторы благодарят Цветкова В. М. и Плужяна К. Г. за помощь в оформлении рисунков и презентации доклада.

Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
2. 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. 31–39.
3. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011. Вып. 1. С. 17–24.
4. Колесов В. Ф., Хоружий В. Х., Воронцов С. В., Евдокимов В. В. Продолжение поиска вариантов реактора с форсированными параметрами импульсов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2004. Вып. 1. С. 13–24.
5. Шагалиев Р. М., Шумилин В. А., Алексеев А. В. и др. Математическое моделирование и методики решения многомерных задач переноса частиц и энергии, реализованные в комплексе САТУРН-3 // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 20–26.
6. Тепловые свойства веществ: Справочные таблицы. Составитель Иванов Г. Н. М.: 1978.
7. Колесов В.Ф. Аperiodические импульсные реакторы, т. 2. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
8. Колесов В.Ф. Решения динамических задач термоупругости для полусферической оболочки и стержня // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2014. Вып. 3. С. 61–71.
9. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений: Пер. с англ. М.: МИР, 1964.
10. Коваленко А. Д. Термоупругость. Киев: Изд. «Вища школа», 1975.