

РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РЕАКТОРНО-ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАПАЛЬНЫМ РЕАКТОРОМ И ВНЕШНИМИ ЛАЗЕРНЫМИ МОДУЛЯМИ

WORKING PARAMETERS OF PERSPECTIVE REACTOR-LASER SYSTEM WITH PRIMER REACTOR AND EXTERNAL LASER MODULES

В. Б. Гречушкин, В. Х. Хоружий, А. А. Пикунев
V. B. Grechushkin, V. Kh. Khoruzhiy, A. A. Pikulev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.
 Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Предложена конструкция импульсной реакторно-лазерной установки с запальным реактором и внешними лазерными модулями. Проведена оптимизация статических и динамических параметров установки

Construction of pulsed reactor-laser system consisting of initiation reactor and external laser modules is presented. Optimization of system static and dynamic parameters has been conducted

В докладе представлена конструкция и основные параметры реакторно-лазерной (РЛ) установки, представляющей собой запальный реактор, вокруг которого расположено несколько лазерных модулей. Предложенная компоновка позволяет, в отличие от компоновки, рассмотренной в докладе [1], осуществить накачку шести лазерных модулей диаметром до 70 см (объем активной среды $\sim 3 \text{ м}^3$) и получить энергию лазерной генерации на уровне 90 кДж, что недостижимо для РЛ установки с внешней активной зоной (АЗ) [1]. Суммарная доля энерговыделения во всех лазерных модулях (ЛМ) для предложенной системы на порядок выше, чем в случае РЛ установки с внешней АЗ, что связано с более эффективным «использованием» нейтронов (снижена утечка нейтронов из системы, использован эффект размножения нейтронов в умножителе и т.д.)

На первом этапе проводился выбор конструкции РЛ установки. Критериями выбора были: практическая реализуемость, возможность получения однородной накачки активной среды в лазерных модулях, отсутствие перегрева элементов АЗ запального реактора и максимизация доли энерговыделения в лазерных модулях (по отношению к полному энерговыделению в системе) при сохранении умеренной длительности импульса нейтронов ($\sim 10 \text{ мс}$).

С нейтронно-физической точки зрения наиболее эффективным является вариант с одним цилиндрическим лазерным модулем, на оси которого имеется полость, где размещается запальный реактор (рис. 1А). Однако, данный вариант был отброшен в связи с трудностью герметизации лазерного модуля такого большого объема; кроме того, изготовление оптических элементов (зеркала, прозрачные окна и т. д.) такого диаметра ($\sim 2 \text{ м}$) крайне затруднительно с технологической точки зрения, их масса слишком велика.

Также был отклонен вариант с размещением ЛМ в центральной полости запального реактора (рис. 1Б, 1В): уровень накачки лазерно-активной среды в центральном лазерном модуле существенно выше, чем в периферийных ЛМ, что приводит к перегреву среды в центральном ЛМ, кроме того, для такой схемы сложно предложить реализуемую оптическую систему. В результате было решено отказаться от центрального ЛМ и разместить в полости запального реактора органы регулирования реактивности (ОРР) и генерации импульса.

Из двух вариантов РЛ системы с 6 и 12 лазерными модулями (рис. 1В, 1Г) был выбран вариант с шестью лазерными модулями, поскольку 12-модульный РЛ имеет большие габаритные размеры и массу, а также избыточно сложную оптическую систему. Кроме того, в 12-модульном варианте трудно добиться однородной накачки лазерно-активной среды: энерговыделение в периферических лазерных модулях оказывается существенно ниже, чем в центральных (расположенных ближе к запальному реактору).

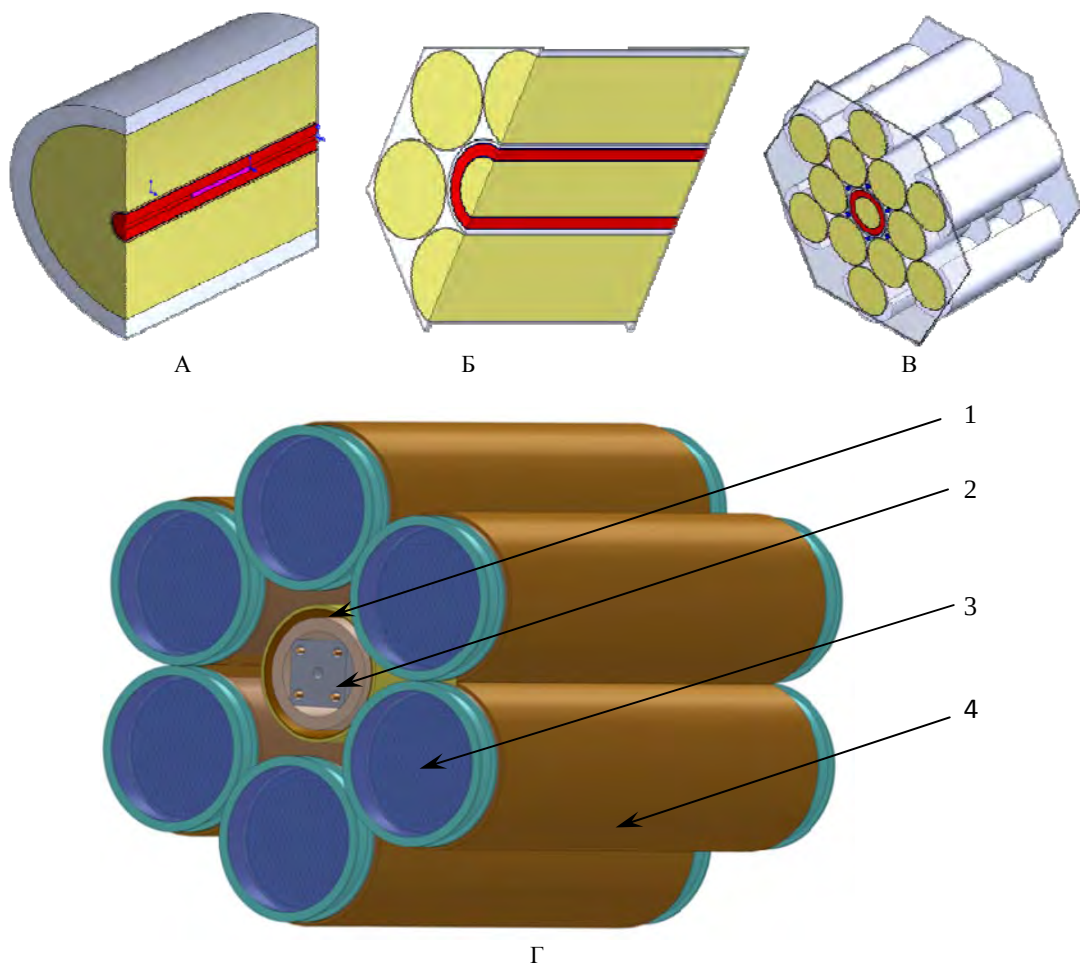


Рис. 1. Варианты конструкции РЛ установки с запальным реактором и внешними лазерными модулями: А – цилиндрический реактор с запальным реактором и внешний отражателем; Б – система с 6 модулями снаружи и одним модулем внутри запального реактора; В – система с 12 модулями снаружи запального реактора и одним внутри и с отражателями вокруг внешних модулей; Г – 6-модульная система с отражателями вокруг наружной стороны модулей. 1 – 5 импульсных и регулирующих стержней; 2 – запальный реактор, окруженный фильтром тепловых нейтронов; 3 – лазерные модули, 6 шт.; 4 – цилиндрические отражатели нейтронов на лазерных модулях

Для эффективной накачки активной среды (смеси инертных газов с давлением 1–4 атм) необходимо использовать лазерные каналы небольшого диаметра – около 2 см. При длине лазерного канала 2 м объем активной среды в лазерном канале составляет 0,63 л. Учитывая, что максимальная эффективность преобразования энергии осколков деления в лазерное излучение составляет около 2 % (для переходов атома ксенона 1,73, 2,03 и 2,65 мкм), а предельно-допустимый энерговыход в лазерную среду составляет не более 2 Дж/см³, получаем, что максимальная энергия лазерного излучения, которая может быть получена, составляет 40 Дж/л. Т.о., для получения лазерной энергии на уровне 10 кДж необходимый объем активной среды должен быть не менее 250 л что соответствует объему ~400 лазерных каналов.

Необходимым условием получения генерации является герметизация внутреннего объема лазерного модуля и возможность наполнения-откачки этого объема. Причем с торцов лазерных каналов должны быть герметично установлены прозрачные окна или зеркала оптического резонатора, закрепляемые с помощью специальных фланцев. Поскольку лазерный модуль состоит как минимум из нескольких сотен лазерных каналов, обеспечить герметизацию каждого лазерного канала по отдельности представляется весьма затруднительным. Поэтому предпочтительнее собрать лазерные каналы в группы и заключить их в общую герметичную кювету, имеющую на торцах два прозрачных окна. Максимальный диаметр такой кюветы ограничен размерами окон и составляет 70–80 см, а максимальный объем – около 500 л.

В расчетах параметров установки использовалось два типоразмера ЛМ:

- модуль с диаметром 500 мм и объемом лазерно-активной среды 220 л (рис. 2, 3);
- модуль с диаметром 700 мм и объемом лазерно-активной среды 440 л.

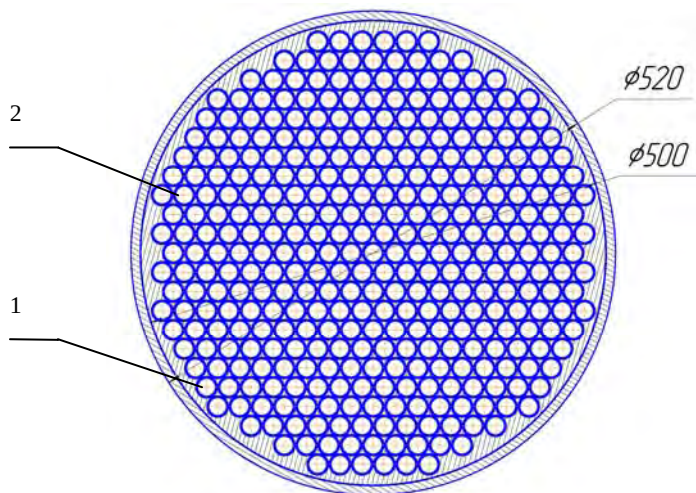


Рис. 2: Вид лазерного модуля в поперечном сечении: 1 – лазерные каналы (сборка из 361 канала); 2 – кювета лазерного модуля

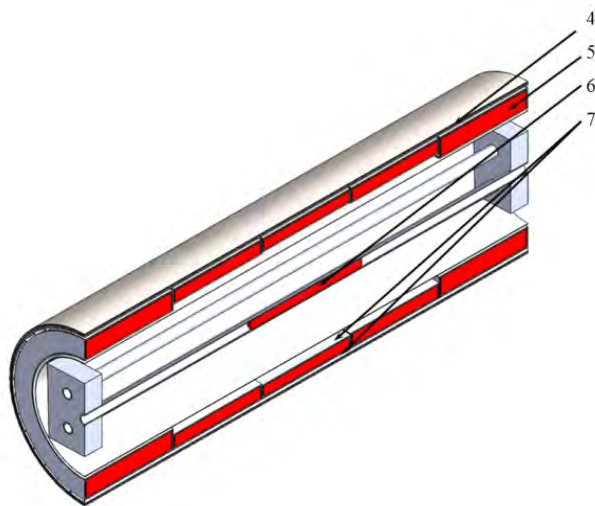
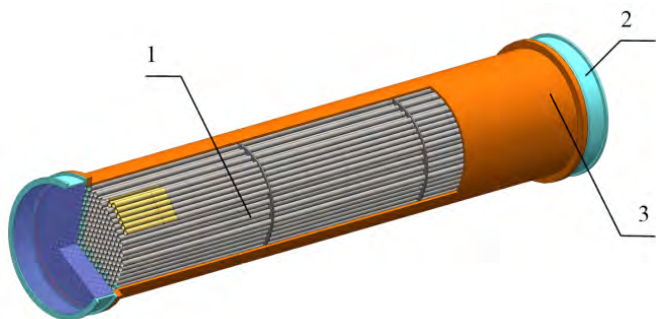


Рис. 3. Кювета лазерного модуля и запальный реактор в разрезе: 1 – лазерные каналы; 2 – окно лазерного модуля; 3 – корпус лазерного модуля; 4 – оболочка реактора и фильтр тепловых нейтронов; 5 – блоки активной зоны реактора; 6 – регулирующие и импульсные стержни; 7 – внутренний и внешний каналы охлаждения

После выбора конфигурация РЛ установки была проведена расчетная оптимизация ее нейтронно-физических характеристик. При проведении расчетов было принято, что установка состоит из 7 модулей равного диаметра (50 или 70 см) и равной длины ~ 206 см. В центральном модуле размещается запальный реактор со вспомогательными системами.

Рассмотрим конструкцию запального реактора (двигаясь от оси вдоль радиального направления) (рис.3).

В центре запального реактора находится 5 импульсно-регулирующих стержней длиной 50 см и диаметром 1,8 см, размещенных в стальных чехлах: один стержень на оси и 4 располагаются вокруг него по углам квадрата. Размер стержней подобран так, чтобы перемещение одного стержня с края установки в середину приводило к изменению реактивности на $\sim 1 \beta_{эф}$.

Далее находятся 5 блоков АЗ различной толщины: более тонкие в середине (рядом с центральным сечением) и более толстые по краям. Блоки АЗ набираются из колец из уран-молибденового сплава. Толщина блоков сделана переменной для того, чтобы выровнять распределение плотности делений в лазерных модулях по длине установки (см. рис. 3). Блоки АЗ заключены в герметичные стальные чехлы.

Вокруг блоков АЗ размещается трехслойный фильтр тепловых нейтронов, состоящий из борной засыпки, заключенной в кадмиевый чехол. Он служит для предотвращения перегрева блоков реактора тепловыми нейтронами из лазерных модулей.

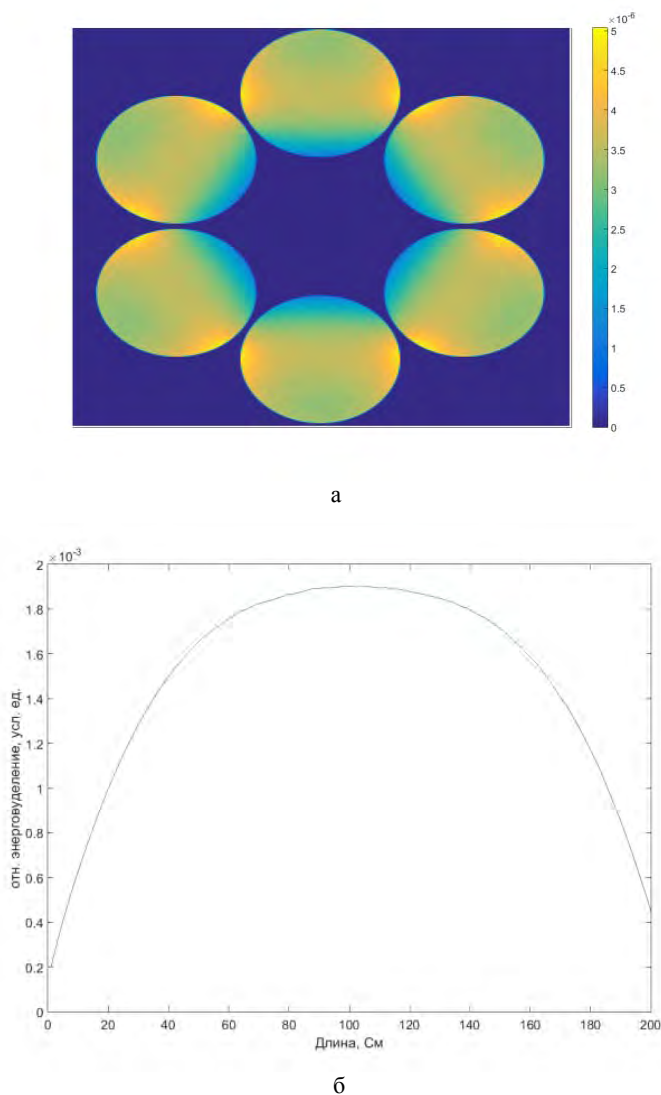


Рис. 4. Распределение энерговыделения в лазерных модулях после оптимизации:
а – в поперечном сечении; б – по длине установки

Вокруг фильтра тепловых нейтронов размещено шесть лазерных модулей такого же диаметра и длины, как и модуль запального реактора. Каждый лазерный модуль представляет собой цилиндрический корпус, в котором располагаются цилиндрические трубки лазерных каналов. Трубки представляют собой двухслойную структуру. Внешняя оболочка – стальная трубка длиной 200 см, внутрь которой вставляются короткие алюминиевые трубки, на внутреннюю поверхность которых нанесен слой металлического урана-235 плотностью $\sim 3 \text{ мг/см}^2$. Эффективность энерговыклада доля таких слоев составляет около 20 %. Свойства веществ, входящих в состав установки, использованные в ходе расчетов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов установки [2]

Материал:	Плотность, г/см^3 :	Модуль Юнга, Па:	Отношение Пуассона:	Линейный коэффициент расширения, K^{-1}
Сталь	7,86	$2 \cdot 10^{11}$	0,28	$1,74 \cdot 10^{-5}$
Уран-молибденовый сплав **	17,2	$9,21 \cdot 10^9$	0,37	$1,26 \cdot 10^{-5}$
Кадмий	8,65	- *	- *	- *
Бор	2,34	- *	- *	- *
Алюминий	2,7	- *	- *	- *
Гидрид Циркония	5,74	- *	- *	- *

* – материал не используется при прочностных расчетах, механические свойства не требуются;

** – обогащение по изотопу уран-235 93 %

При использовании лазерных модулей с диаметром 50 см (тип I) максимальная энергия генерации рассматриваемой установки составит около 50 кДж, а в случае лазерных модулей с диаметром 70 см (тип II) – около 90 кДж.

Сначала была проведена оптимизация статических характеристик РЛ установки методом Монте-Карло [3]. В процессе проведения расчетов было обнаружено несколько особенностей распределения энерговыделения, ухудшающих равномерность энерговыделения по объему лазерных модулей: наблюдалось существенное падение плотности делений у внешней границы модулей и на стыках между ними. Также, несмотря на замедлитель, размещенный снаружи фильтра нейтронов между реактором и лазерными модулями, плотность делений спадала от центра к краям установки.

Для того, чтобы решить проблему уменьшения плотности делений на внешней границе ЛМ был добавлен внешний отражатель. Анализ показал, что из основных твердых материалов отражателя, таких, как гидриды металлов, бериллий и железо, наилучшие результаты дает гидрид циркония. Оптимальная толщина отражателя – 5 см, при большей толщине влияние отражателя практически не изменяется. В случае необходимости, толщина отражателя может быть уменьшена до 3 см, при этом равномерность поля делений останется удовлетворительной.

Проведенные расчеты показали, что лучшие результаты по выравниванию поля делений достигаются если размещать замедлитель не снаружи лазерных модулей, а внутри, путем заполнения зазоров между лазерными каналами. Провал плотности делений между ЛМ был устранен путем замены общего цилиндрического отражателя отдельными полуцилиндрическими оболочками, размещенными вокруг каждого лазерного модуля. Распределение энерговыделения по модулям после оптимизации приведено на рис. 4.

После оптимизации статических параметров установки были проведены расчеты динамики нейтронного импульса. Для расчета импульса использовано точечное приближение нейтронной кинетики.

В силу ограниченной применимости отдельных программ [4], используемых для расчета неосесимметричных систем, стандартный метод расчета динамики нейтронного импульса с уче-

том инерции и термоупругих колебаний топливных элементов оказался неприменим для рассматриваемой РЛ установки. Но, как показало моделирование методом конечных элементов, при полуширине нейтронного импульса свыше 1 мс для деталей АЗ диаметром до 50 см и свыше 2 мс для деталей диаметром до 70 см, колебания топливных элементов и другие инерциальные эффекты оказываются пренебрежимо малыми. На этом основании расчет нейтронной динамики проводился исходя из того, что смещение элементов АЗ и изменение реактивности прямо пропорционально их нагреву и следует за нагревом без задержки по времени.

Если принять вышеописанное приближение, то система уравнений кинетики примет вид [5]:

$$\begin{cases} \Lambda \frac{dP(t)}{dt} = P(t) [\rho(t) - \beta_{эфф}] + \Lambda \sum_m \lambda_m C_m(t) \\ \frac{dC_m(t)}{dt} = \frac{\beta_m}{\Lambda} P(t) - \lambda_m C_m(t) \\ \frac{d\rho(t)}{dt} = -P(t) \cdot a' \\ \frac{dY(t)}{dt} = P(t) \end{cases}$$

где Λ – время генерации нейтронов в системе, $P(t)$ – мощность установки, $\rho(t)$ – реактивность, β_m , C_m и λ_m – доли, концентрации и времена жизни источников запаздывающих и/или отраженных нейтронов, $Y(t)$ – энерговыделение, a' – коэффициент гашения.

Начальные условия для решения данной системы следующие:

- значение начальной реактивности ρ_0 подбирается так, чтобы обеспечить требуемую длительность и энерговыделение в импульсе;
- начальная мощность $P(0)$ принимается равной 1 Вт.

Период разгона вычислялся путем решения относительно α уравнения [5]:

$$\rho_0 = \beta_{эфф} + \alpha \cdot \Lambda - \sum_m \frac{\beta_m \lambda_m(t)}{\alpha + \lambda_m}$$

где время генерации нейтронов Λ бралось из расчетов методом Монте-Карло.

Начальные концентрации источников запаздывающих нейтронов вычислялись по формуле [5]:

$$C_m(0) = \frac{\beta_m}{\Lambda} \frac{1}{\lambda_m + a} P_0$$

Решение системы дифференциальных уравнений выполнялось численно в пакете программ Scilab. Точность решения была проверена путем моделирования системы, описанной в докладе на нынешней конференции [1]. Проведенное сравнение показало, что точность расчетов составляет не хуже 10 %.

При использовании в лазерных модулях чистого гидрида циркония, время жизни поколения нейтронов может превышать 70–100 мкс, что приводит к значительному уширению импульса. Для того, чтобы уменьшить этот эффект, в лазерные модули был добавлен поглотитель нейтронов, что несколько снизило общий кпд установки (долю делений в лазерных модулях). В результате импульс нейтронов сократился до 10 мс при времени генерации нейтрона 18–23 мкс и доле делений в модулях ~11–12 %.

В целях увеличения энерговыделения в запальном реакторе были проведены расчеты с топливными элементами АЗ, содержащими уран-235 с обогащением 47 %. Как видно из таблицы 2, при этом энергия лазерной генерации достигает 56 и 90 кДж для вариантов I и II соответственно.

Таблица 2

Параметры максимальных импульсов установки

Диаметр ЛМ и обогащение, см	Объем урана, м ³	Масса урана, кг	Максимальное энерговыведение в реакторе, МДж	Доля энерговыведения в модулях %	Энергия излучения модулей, кДж
50 93% ²³⁵ U	0,0857	1474	69,6	11,1	31
70 93% ²³⁵ U	0,1223	2104	99,3	12,4	50
50 47% ²³⁵ U	0,1543	2654	125	11,3	56
70 47% ²³⁵ U	0,2257	3881	183	12,4	91

Для всех четырех вариантов были проведены расчеты параметров импульса, $K_{эф}$ и пространственного распределения нейтронов. По пространственному распределению нейтронов рассчитано смещение элементов АЗ, изменение $K_{эф}$ и определен коэффициент гашения реактивности.

Результаты приведены в табл. 3. Рассмотрение первого варианта показало, что коэффициент гашения реактивности слишком велик, поэтому требуется вносить большую начальную реактивность и сокращать длительность импульса до 3–7 мс. Уменьшить величину коэффициента гашения реактивности можно, если рассечь топливные кольца по азимуту, оставив зазор и скомпоновать так, чтобы исключить расширение в направлении от центра. Если для установки с обогащением урана-235 93 % для достижения необходимого энерговыведения (120 и 180 МДж) требуется сокращение импульса до 6,5–6,75 мс, то при пониженном обогащении импульс полушириной ~10 мс имеет энерговыведение, обеспечивающее достижение максимальных параметров лазерной генерации.

Как было отмечено выше, инерциальные явления и термоупругие колебания слабо проявляются при полуширине импульса и размере элемента, характерном для данной установки. Основной вклад в напряжения дает перепад температуры в топливных элементах, а влияние термоупругих колебаний и инерциальных явлений мало. Для оценки величины возникающих напряжений был рассмотрен элемент АЗ в виде сплошного кольца максимального размера: внешний радиус 33,2 см, толщина 7 см и высота 40 см. Элемент был нагружен температурой в 700 градусов, одна часть которой однородно распределена по объему, а вторая имеет вид колокола с максимумом в центре и спадает до нуля на краях. Расчет, проведенный для импульсов с характерной шириной 3–10 мс показал, что динамические нагрузки пренебрежимо малы (единицы – максимум десятки МПа) по сравнению с напряжениями, вызванными перепадом температур.

При относительном перепаде температур около 20 % напряжения достигают предела текучести материала элемента, а при 28 % – статического предела прочности при температуре 700 °С. Как видно из распределения плотности делений, представленной на рис. 5, в трех центральных элементах перепад температуры не превышает 20 %. Для того чтобы напряжения в крайних кольцах не превышали предельно допустимых значений, желательно разделить каждое кольцо на несколько колец меньшего размера.

Таблица 3

Характеристики нейтронных импульсов для различных вариантов

Диаметр модуля, см и обогащение	$K_{эф}$ ($\Delta T = 0^\circ C$)	$K_{эф}$ ($\Delta T = 400^\circ C$)	$\Delta\rho/Q$ Дж ⁻¹	Подстройка по полуширине импульса		Подстройка по полуширине импульса	
				Полу- ширина, мс	Энерго- выделение, МДж	Полу- ширина, мс	Энерго- выделение, МДж
50 93 %	1,000741	0,979577	3,10E-10	9,27	52,7	6,75	70
70 93 %	1,005873	0,979473	2,70E-10	9,46	70,3	6,5	100
50 47 %	1,008567	0,994436	1,12E-10	10,7	123	-	-
70 47 %	1,005369	0,988483	9,28E-11	10,1	176	-	-

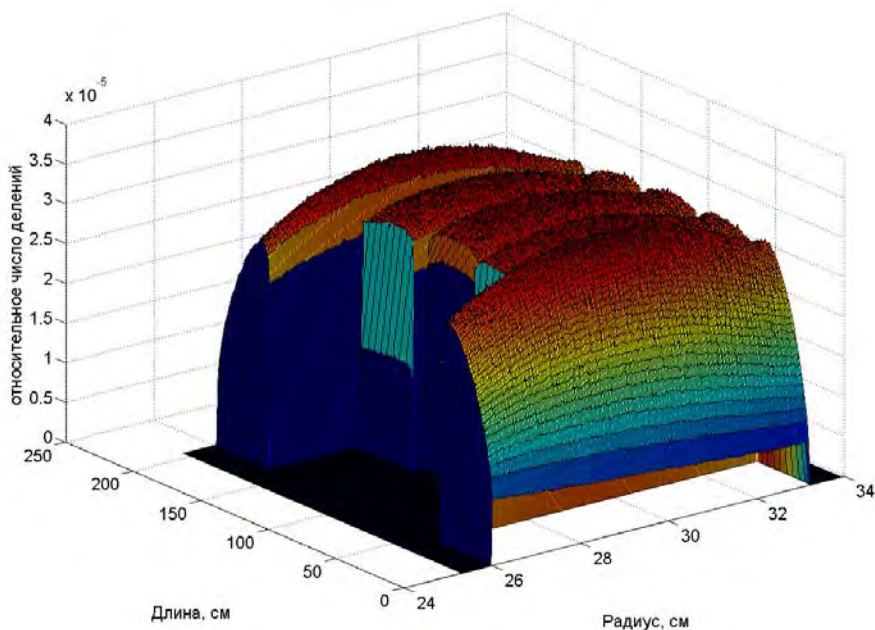


Рис. 5. Распределение числа делений по активной зоне установки

В докладе представлена конструкция и основные параметры импульсной реакторно-лазерной установки представляющей собой запальный реактор, вокруг которого расположено шесть лазерных модулей. Показано, что данная установка позволяет генерировать импульсы лазерного излучения с энергией 50–90 кДж и длительностью около 10 мс.

Список литературы

1. Колесов В. Ф., Хоружий В. Х., Гречушкин В. Б., Пикулев А. А. Параметры импульсного реактора для накачки крупногабаритного ЛЯН. Доклад на настоящей конференции.
2. Тепловые свойства веществ: Справочные таблицы. Составитель Иванов Г. Н. М.: Атомиздат, 1978.
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 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011. Вып. 1. С. 17–24.
4. 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.
5. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.