

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НА БАЗЕ КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА ИКАР-С СТАТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА С БОЛЬШОЙ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ ПОЛОСТЬЮ

PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF STATIONARY REACTOR WITH A LARGE IRRADIATING CAVITY ON THE BASIS OF CRITICAL IKAR TEST BENCH

Г. В. Влох, А. А. Пикулев, В. А. Попов, С. В. Фролова
G. V. Vlokh, A. A. Pikulev, V. A. Popov, S. V. Frolova

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

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

Приведены результаты расчётных исследований основных параметров реактора-облучателя, создаваемого на базе критического стенда ИКАР-С. Рассмотрены различные режимы работы в интервале тепловой мощности от ~0,1 МВт до ~50 МВт.

There are presented the results of calculation researches of basic parameters for reactor-irradiator created on the base of IKAR critical test bench. Different operation modes within the heat power interval from ~0,1 MW to ~50 MW are considered.

Во ВНИИЭФ в течение последних лет проводились работы по созданию макета реактора-лазера (РЛ) непрерывного действия с накачкой осколками деления U^{235} . Макет включает в себя реактор ИКАР-500 (замедлитель – графит) с объёмом активной зоны (АЗ) $\sim (2,4 \times 2,4 \times 2,4) \text{ м}^3$ и лазерный модуль ЛМ-16 $(0,5 \times 0,5 \times 2,4) \text{ м}^3$, размещаемый в АЗ [1]. Максимальное энерговыделение в адиабатическом режиме (быстрая часть аperiодического импульса длительностью $\sim 0,3$ с) составляет (оценка) ~ 350 МДж, при этом флюенс нейтронов в центре АЗ $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Функционально ИКАР-500 выполняет в составе макета РЛ роль реактора-облучателя и очевидно, что может эксплуатироваться в таком качестве самостоятельно. Как облучатель ИКАР-500 может эффективно использоваться в изучении радиационной стойкости материалов и изделий, в экспериментальных исследованиях в области фундаментальной физики и в различных приложениях, в том числе в исследованиях аварийных ситуаций на объектах ядерной энергетики в реальном масштабе времени и мощности. Особенно значительной может быть его роль при испытаниях крупногабаритных узлов и изделий, облучение которых до высоких значений нейтронного флюенса на других ИЯР России затруднено или невозможно.

Физический пуск и последующие исследования ядерно-физических параметров ИКАР-500 проводились на первом этапе в режиме стенда для критических сборок (СКС) ИКАР-С [2]. В настоящее время созданный стенд ИКАР-С рассматривается как базовая установка для создания статического реактора-облучателя с большой облучательной полостью $\sim (0,5 \times 0,5 \times 2,0) \text{ м}^3$. Для этого вместо лазерного модуля ЛМ-16 в АЗ предполагается размещать облучательный модуль, в который загружаются исследуемые образцы.

Критический стенд ИКАР-С

Общий вид стенда показан на рис. 1.

В настоящее время на СКС ИКАР-С собрана размножающая система (РС), моделирующая АЗ реактора ИКАР-500. Структурная схема стенда с собранной РС представлена на рис. 2.

Общая масса урана-235 в зоне составляет ~ 22 кг, общая масса замедлителя (графит) ~ 17 т; среднее по сечению деления ~ 100 барн, среднее время жизни мгновенных нейтронов $\sim 0,7$ мс. Массовое содержание урана в дисперсионном U-C топливе $\sim 0,5$ %, в дисперсионном U-Al топливе $\sim 2,5$ %. Температурный коэффициент реактивности $dk_{эфф}/dT \cong -14 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, адиабатический коэффициент реактивности $dk_{эфф}/dQ \cong -5 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}^{-1}$. Более полно нейтронно-физические параметры ИКАР-500 представлены в работах [3]–[5].

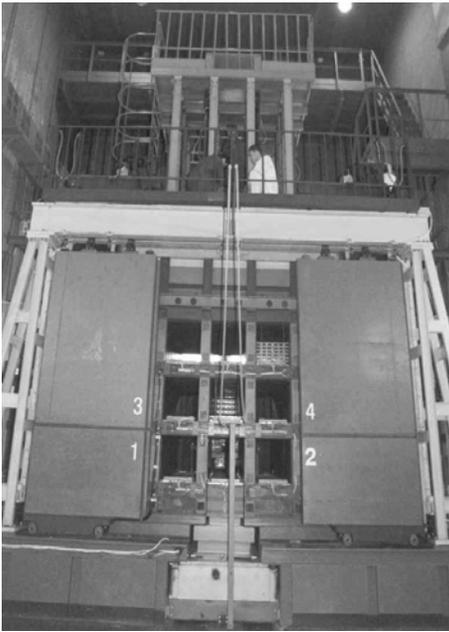


Рис. 1. Общий вид СКС ИКАР-С

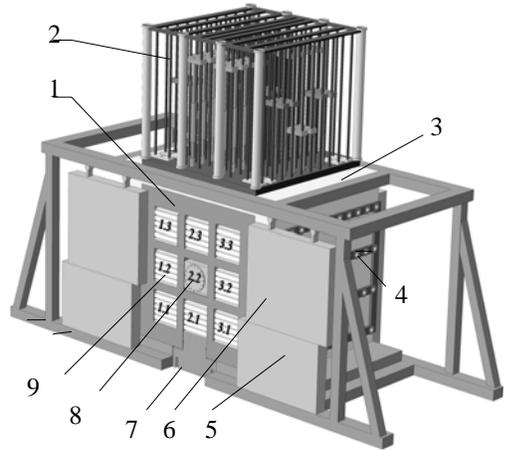


Рис. 2. Структура СКС ИКАР-С, моделирующая АЗ реактора ИКАР-500: 1 – графитовая матрица; 2 – механизмы СУЗ; 3 – биологическая защита; 4 – горизонтальные каналы СУЗ; 5 – нижние защитные шиберы; 6 – верхние защитные шиберы; 7 – телега станда для транспортировки лазерного модуля ЛМ-16; 8 – реакторный модуль с дисперсионным U-C топливом; 9 – реакторные модули с дисперсионным U-Al топливом

Переход от конфигурации реактора ИКАР-500 к конфигурации комплекса ИКАР-ЛМ16 (макет РЛ) предполагалось осуществить путём замены реакторного модуля 2.1 (см. рис. 2) на равновеликий лазерный модуль, имеющий аналогичные критмассовые характеристики. Для этого модуль 2.1 располагался на движущейся платформе («телеге станда»), что позволяло дистанционно производить такую замену, используя ресурсы СУЗ.

Реактор-облучатель

Конфигурацию реактора-облучателя (ИКАР-М) предполагается реализовать путём аналогичной замены модуля 2.1 на специально разработанный облучательный модуль, с близкими критмассовыми характеристиками. Предполагаемая структура реактора-облучателя показана на рис. 3.

Облучательный модуль содержит облучательную кювету с исследуемыми образцами и функциональный наполнитель, формирующий необходимое гамма-нейтронное поле в кювете. Кроме того, наполнитель может служить для обеспечения необходимых критмассовых параметров облучательного модуля. В частном случае наполнитель может отсутствовать, при этом облучательный объём модуля максимален.

Структурная схема облучательного модуля представлена на рис. 4.

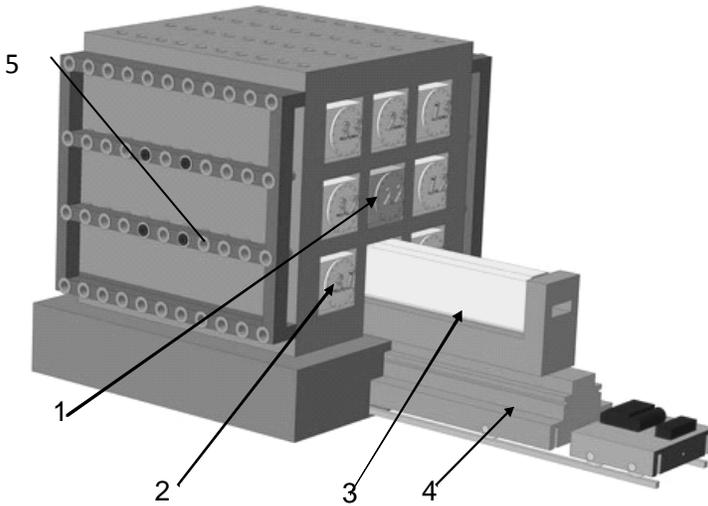


Рис. 3. Предполагаемая структура реактора-облучателя: 1 – реакторный модуль с дисперсионным U-C топливом; 2 – реакторные модули с дисперсионным U-Al топливом; 3 – облучательный модуль; 4 – телега станда; 5 – горизонтальные каналы СУЗ

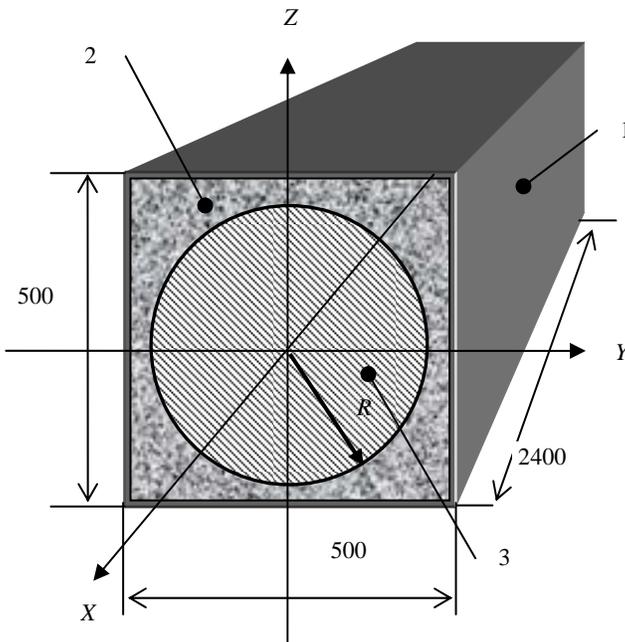
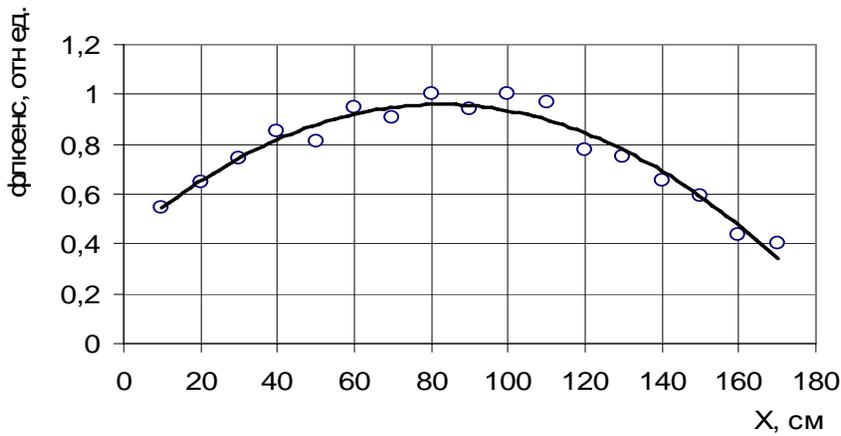


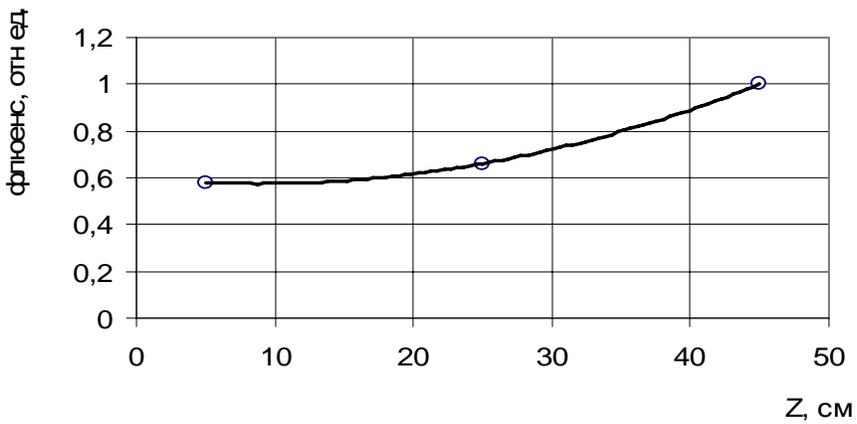
Рис. 4. Структурная схема облучательного модуля: 1 – корпус; 2 – функциональный наполнитель; 3 – облучательная кювета

Результаты оценочных расчётов

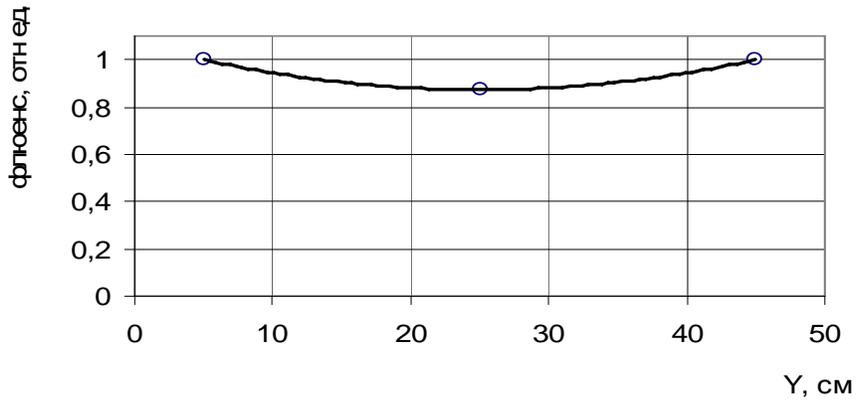
Расчёты проводились методом Монте-Карло по программам «Polina» и «С-95» [6] с использованием констант ENDL-B4. На рис. 5 представлено распределение невозмущённого (отсутствие наполнителя и образцов) нейтронного поля в облучательном модуле.



а



б



в

Рис. 5. Относительное распределение нейтронного флюенса в облучательном модуле
Распределение по направлению: а – $(X, 0, 0)$, б – $(-1200, 0, Z)$, в – $(-1200, Y, 0)$

Из рис. 5 видно, что однородность нейтронного поля в облучательном модуле довольно высока, что создает дополнительные преимущества при проведении испытаний объектов на радиационную стойкость.

В табл. 1 представлены основные параметры нейтронного поля в облучательном модуле.

Таблица 1

Параметры невозмущённого нейтронного поля в облучательном модуле

Параметр	Значение
Доля тепловых нейтронов ($< 0,4$ эВ), %	~20
Доля быстрых нейтронов ($> 10^5$ эВ), %	~50
Доля делений в U^{235} на тепловых нейтронах, %	~92
Доля делений в U^{235} на быстрых нейтронах, %	~0,7
Среднее сечение деления U^{235} , барн	~105

Некоторые возможные варианты структуры экспериментального модуля для реактора-облучателя представлены в табл. 2. В качестве функционального наполнителя использованы графитовые блоки и U-C твэлы с одинаковыми размерами ($52 \times 73 \times 485$) мм³.

Таблица 2

Варианты структуры экспериментального модуля

№	Наполнитель	Сечение (радиус R) кюветы, см	Объём наполнителя, см ³ (доля от объёма модуля, %)	Критический вес модуля, $\beta_{эфф}$
1	нет	~ 50 × 50	Нет (0)	0
2	графит	24	$1,4 \cdot 10^5$ (~ 32)	~ 1,1
3	графит	20	$2,4 \cdot 10^5$ (~ 52)	~ 2,4
4	U-C твэлы	24	$1,4 \cdot 10^5$ (~ 32)	~ 3,3
5	U-C твэлы	20	$2,4 \cdot 10^5$ (~ 52)	~ 5,8

Предельное энерговыделение

Предельное энерговыделение реактора-облучателя при работе в статическом режиме ограничивается допустимой радиационной обстановкой в реакторном помещении в промежутках между пусками. Мощность гамма-дозы за биологической защитой (ослабление дозы $\sim 10^{-4}$) определяется накопленной за время облучения осколочной активностью в АЗ реактора. Эта активность монотонно возрастает вместе с увеличением энерговыделения.

На рис. 6 приведена расчётная зависимость мощности дозы в помещении от энерговыделения через 10 суток после облучения на мощности 0,1 МВт.

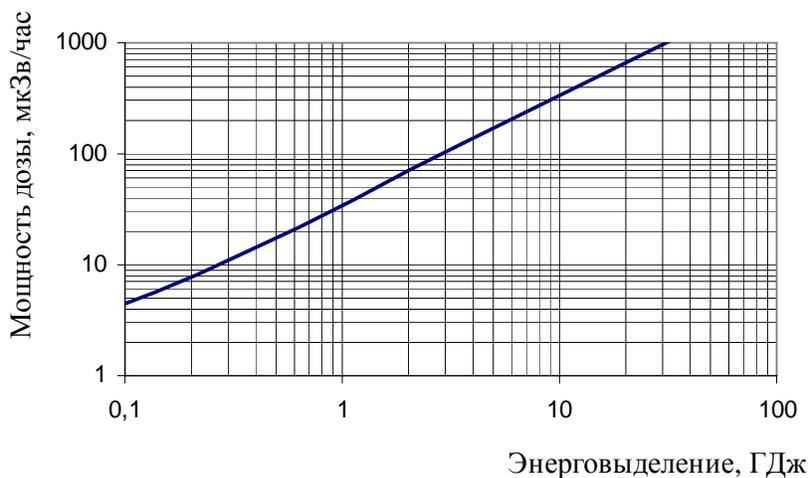


Рис. 6. Мощность гамма-дозы в реакторном помещении через 10 суток после облучения на мощности 0,1 МВт

Из рис. 6 видно, что при энерговыделении ≥ 10 ГДж для проведения работ в реакторном помещении после облучения требуется пауза гораздо больше 10 суток (безопасная доза ~ 10 мкЗв/час). Однако длительность паузы между пусками реактора должна иметь разумное ограничение. Принимая, в этом смысле, предельную мощность дозы (через 10 суток после облучения) ~ 1000 мкЗв/час, получим оценку предельного энерговыделения при работе на мощности 0,1 МВт $Q_{\text{пред}} \approx 30$ ГДж, после чего необходима пауза длительностью до двух месяцев.

В конструкции стенда ИКАР-С, являющегося базой для реактора-облучателя, не предусмотрена специальная система охлаждения. Проведённый анализ теплообменных процессов позволяет сделать вывод о том, что при наличии лишь естественной конвекции статическое облучение может проходить на мощности, не превышающей 0,01 МВт.

Предварительные оценки показывают, что теплоотвод от АЗ на уровне $\sim 0,1$ МВт может быть реализован при продувке воздуха через горизонтальные каналы реактора (см. рис. 3) со скоростью ~ 30 м/с.

Предельное энерговыделение реактора – облучателя при работе в квазистатическом режиме (работа без охлаждения на собственной теплоёмкости) ограничивается предельно допустимой температурой разогрева внутренней поверхности биологической защиты $T_{\text{пред}} \sim 100$ °С. Предельная мощность ограничивается требованием отсутствия перегрева центрального U-C модуля ($T \leq 500$ °С). Предварительные оценки дают: $Q_{\text{пред}} \approx 2$ ГДж; $W_{\text{пред}} \approx 1$ МВт.

Апериодический импульс

Максимальная скорость введения положительной реактивности на СКС ИКАР-С составляет $\sim 0,02\beta_{\text{эфф}}/с$, что позволяет генерировать аperiодический импульс только на запаздывающих нейтронах. На рис. 7 представлена расчётная форма аperiодического импульса, генерируемого при вводе реактивности $1,0 \cdot \beta_{\text{эфф}}$ со скоростью $0,02\beta_{\text{эфф}}/с$.

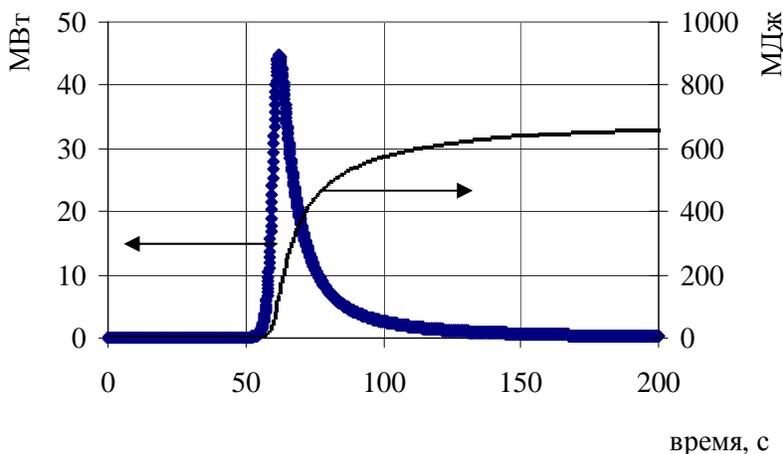


Рис. 7. Мощность и энерговыделение в аperiодическом импульсе

Как видно из рис. 7, энерговыделение в импульсе может достигать $\sim 0,7$ ГДж, мощность ~ 50 МВт («полуширина» импульса ~ 10 с, энерговыделение в «быстрой» части $\sim 0,5$ ГДж).

Окончательно, результаты оценочных расчётов приведены в табл. 3. Там же, для сравнения, приведены соответствующие данные для реактора БИГР [7].

Предельные значения параметров невозмущённых нейтронных полей

Параметр	БИГР		ИКАР-М		
	Центр	Боковая поверх.	Апериод. импульс	Квазистат.	Статика
Предельное энерговыделение реактора, ГДж	~ 0,3		~ 0,7	~ 2	~ 30
Максимальная мощность, МВт	~ 10 ⁵		~ 50	~ 1	~ 0,1
Максимальный флюенс нейтронов, 10 ¹⁷ см ⁻²	~ 0,1	~ 0,01	~ 0,03	~ 0,1	~ 1,5
Максимальная плотность потока нейтронов, 10 ¹⁴ см ⁻² ·с ⁻¹			2,5	0,05	0,005
Максимальная плотность делений в уране-235, 10 ¹⁴ г ⁻¹	~ 0,5	~ 0,6	~ 0,5	~ 1,5	~ 20
Максимальный объём облучаемых объектов, см ³	~ 3·10 ³	~ 3·10 ⁴	~ 5·10 ⁵		
Максимальный объём квазигоднородного поля с градиентом < 10 %·м ⁻¹ , см ³	~ 3·10 ²	~ 3·10 ³	~ 6·10 ⁴		

Из табл. 3 видно, что ИКАР-М на несколько порядков уступает реактору БИГР по мощности и плотности потока нейтронов, однако значительно превосходит его по остальным параметрам. Если сравнивать эти облучатели по параметру «ценности» $\Sigma \equiv$ «облучаемый объём» \times «флюенс нейтронов», то $\Sigma_{ИКАР} / \Sigma_{БИГР} \cong 10^3$.

Таким образом, в настоящей работе показана принципиальная возможность создания на базе существующего критического стенда ИКАР-С уникального статического реактора-облучателя с большой облучательной полостью $\sim(0,5 \times 0,5 \times 2,0) \text{ м}^3$ и максимальным энерговыделением ~ 30 ГДж. Нейтронное поле в пределах облучаемого объёма характеризуется повышенной однородностью, максимальный флюенс нейтронов может достигать $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Список литературы

1. Ильяев Р. И. Исследования в области физики лазеров и высокотемпературной плазмы // Фундаментальные исследования РФЯЦ-ВНИИЭФ в области высоких плотностей энергии. Саров, 2003. С. 13–34.
2. Воинов А. М., Влох Г. В., Кривоносов В. Н. и др. Стенд критических сборок «ИКАР-С». Результаты физического пуска // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. № 2. С. 29–33.
3. Влох Г. В., Кривоносов В. Н. и др. Стенд критических сборок «ИКАР-С». Распределение плотности делений / Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. Материалы IV Межд. конф. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007. С. 499–504.
4. Воинов А. М., Влох Г. В., Кривоносов В. Н. и др. Стенд критических сборок «ИКАР-С». Результаты физического пуска / Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. Материалы IV Межд. конф. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007. С. 488–493.
5. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В., Житник А. К., Кривоносов В. Н., Попов В. А., Синянский А. А. Расчёт и экспериментальное определение $K_{эф}$ размножающих систем, моделирующих активную зону реактора-лазера / Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. Материалы IV Межд. конф. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007. С. 494–498.
6. Донской Е. Н., Ельцов В. А., Житник А. К., Иванов Н. В., Кочубей Ю. К., Моренко А. И., Рослов В. И., Ронжин А. Б., Субботин А. Н. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ // ВАНТ, Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1993. Вып. 2. С. 61–64.
7. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф., Воинов А. М., Смирнов И. Г. Апериодический импульсный реактор БИГР // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и ПКС, 1988. Вып. 1. С. 3–12.