

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСА ДЕЛЕНИЙ НА МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНАХ РЕАКТОРА БР-1М В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СТАРТОВОЙ МОЩНОСТИ

А. С. Кошелев, В. Х. Хоружий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» 607188, г. Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

Представлены результаты расчетного моделирования формирования импульсов на мгновенных нейтронах реактора БР-1М с существенно инерционным гашением реактивности в режиме генерирования с инициирующего (стартового) уровня мощности в активной зоне $\sim 2 \cdot 10^{20}$ дел. АЗ/с. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными, полученными в совместных пусках реактора БР-1М и ускорителя ЛИУ-30.

Ключевые слова: реактор БР-1М, импульс делений на мгновенных нейтронах, стартовая мощность, параметры импульса делений.

SHAPING OF FISSION PULSES ON PROMPT NEUTRONS OF BR-1M REACTOR UNDER HIGH INITIAL POWER / A. S. KOSHELEV, V. Kh. KHORUZHYY // There are presented the results of calculated simulation of shaping pulses on prompt neutrons of BR-1M reactor with essentially inertial reactivity quenching in the mode of generation from the initiating (starting) level of power in the core $\sim 2 \cdot 10^{20}$ core fissions/s. The results of calculations are compared to the experimental data obtained in joint start-ups of BR-1M reactor and LIU-30 accelerator.

Key words: reactor BR-1M, fission pulse on prompt neutrons, initial power, fission pulse parameters.

Несмотря на обширную библиографию как расчетных, так и экспериментальных публикаций, посвященных вопросам работы импульсных реакторных установок совместно с мощными ускорителями электронов [1], отдельные, значимые в аспекте практической реализации особенности формирования мощных импульсов делений с использованием мощных инициирующих источников остаются явно недостаточно конкретизированными в плане расчетно-прогнозируемых ожиданий.

Динамика увеличения выходных параметров излучений ускорителя ЛИУ-30, определяющих их эффективность формирования всплеска мощности делений в активной зоне (АЗ) реактора БР-1М в процессе комплексной работы установок [2, 3], очевидным образом свидетельствует о целесообразности детализации расчетного рассмотрения ожидаемых параметров импульсов делений реактора в режиме их генерирования с высокого инициирующего (стартового) уровня мощности делений.

В практике расчета параметров импульсов делений реакторов на быстрых нейтронах давно и успешно находит применение расчетно-теоретическая модель, используемые уравнения кинетики

реактора в которой, ориентированные на наличие внешнего (привнесенного извне) источника делений $Q(t)$, сформулированы в работе [4], а жестко устойчивые методы их решения – в работе [5].

Для учета влияния защитной бетонной оболочки реакторных помещений, к которым относится и зал совместной работы ускорителя и реактора, хорошо зарекомендовали себя методы расчета, конкретизированные в работе [6].

Существенно инерционное гашение реактивности реактора описывается с помощью характерных для импульсных реакторов с металлической активной зоной уравнений [7]:

$$\rho(t) = \rho_0 - \sum_{\omega} a_{\omega} v_{\omega}(t) - \Delta \rho(t),$$

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2 v_{\omega}}{dt^2} + v_{\omega} = Y(t), \quad Y(t) = \int_{t_0}^t dt' P(t'),$$

$$\Delta \rho(t) = c(t - t_{\text{пнк}} - \Delta)^2 \quad \text{при } t \geq t_{\text{пнк}} + \Delta.$$

Здесь ρ_0 – стартовая реактивность реактора; $P(t)$ – скорость делений в реакторе; $Y(t)$ – энерговыделение в реакторе к моменту времени t ; $v_{\omega}(t)$ –

условные смещения в единицах энерговыделения, соответствующие частотам колебаний элементов активной зоны ω , а a_{ω} – коэффициенты гашения реактивности, оцененные с помощью теории возмущений. Член $\Delta\rho(t)$ приближенно описывает сброс реактивности после импульса делений.

После действия кратковременного (полуширина ~ 25 нс) инициирующего импульса в реакторе возникает начальная мощность $P_0 \sim Q_0/\Lambda$, где $\Lambda \sim 10^{-8}$ с – время генерации реактора, а $Q_0 = \int dt Q(t)$ – эффективное число первичных делений, вызванных источником.

Численные значения ρ_0 определялись на основе рассмотрения процесса формирования импульсов реактора с полным числом делений в АЗ за импульс $2,1 \cdot 10^{17}$, $2,3 \cdot 10^{17}$, $2,5 \cdot 10^{17}$ и $2,7 \cdot 10^{17}$. Выбор соответствующих ρ_0 , обеспечивающих реализацию указанных энерговыделений при генерировании импульса на мгновенных нейтронах (ИМН) реактора БР-1М, осуществлялся на основании табличного представления соответствующих функциональных зависимостей, включенных в эксплуатационные документы на реактор. Используемая выборка табулированных данных представлена в табл. 1.

С учетом выбранных границ интервала изменения полного энерговыделения Y интервал изменения $\Delta\rho_{\text{МК}} = \rho_0 - \beta_{\text{эф}}$ выделен в границах от $0,072\beta_{\text{эф}}$ до $0,086\beta_{\text{эф}}$. В табл. 1 включены также соответствующие ИМН с конкретным $\Delta\rho_{\text{МК}}$ значения полуширины импульса Θ и асимптотического периода разгона реактора τ .

С целью обеспечения возможности перехода от дискретного отображения параметров Y , Θ и τ в зависимости от $\Delta\rho_{\text{МК}}$ к непрерывному определены следующие аппроксиманты функционалов $Y(\Delta\rho_{\text{МК}})$, $\Theta(\Delta\rho_{\text{МК}})$ и $\tau(\Delta\rho_{\text{МК}})$:

$$Y = 952,38\Delta\rho_{\text{МК}}^2 - 88,452\Delta\rho_{\text{МК}} + 3,0114 \quad (1)$$

в границах отклонений для табулированных значений от $-0,08\%$ до $+0,16\%$;

$$\Theta = 5506\Delta\rho_{\text{МК}}^2 - 1265,8\Delta\rho_{\text{МК}} + 94,705 \quad (2)$$

в границах отклонений для табулированных значений от $-0,11\%$ до $+0,12\%$;

$$\tau = 35565\Delta\rho_{\text{МК}}^2 - 6499,7\Delta\rho_{\text{МК}} + 365,48 \quad (3)$$

в границах отклонений для табулированных значений от $-0,32\%$ до $+0,16\%$.

С использованием соотношения (1) для расчетной процедуры выбраны значения $\Delta\rho_{\text{МК}}$, равные $0,075$ ($Y = 2,110 \cdot 10^{17}$ дел. АЗ), $0,078$ ($Y = 2,296 \cdot 10^{17}$ дел. АЗ), $0,081$ ($Y = 2,500 \cdot 10^{17}$ дел. АЗ) и $0,084$ ($Y = 2,721 \cdot 10^{17}$ дел. АЗ).

Для полуширины Θ по соотношению (2) для выбранных значений $\Delta\rho_{\text{МК}}$, имеем, соответственно, $78,1$; $74,8$; $72,4$ и $70,4$ мкс, а для асимптотического периода τ по соотношению (3) – $30,7$; $29,5$; $28,3$ и $27,2$ мкс.

В конфигурации взаиморасположения АЗ реактора БР-1М и мишенного блока ЛИУ-30 с расстоянием центра АЗ от центральной оси ускорителя $L = 20$ см и равновысотном расположении центров АЗ и мишенного блока ($2,2$ м от уровня пола) осуществлен развернутый расчет формируемого в АЗ реактора источника делений (в используемой терминологии P_0). Результирующий итог – $P_0 = 5,91 \cdot 10^{19}$ дел. АЗ/с.

Для позиции $L = 0$ (центр АЗ реактора на центральной осевой ускорителя) развернутый расчет P_0 не производился. В результате оценки по геометрическому фактору ожидаемое значение P_0 получено в интервале от $1,2 \cdot 10^{20}$ до $2,4 \cdot 10^{20}$ дел. АЗ/с.

В рамках целевого интереса был выполнен следующий объем расчетов:

– полноформатный расчет для $\rho_0 = \beta_{\text{эф}} + \Delta\rho_{\text{МК}} = 1,075\beta_{\text{эф}}$ и каждого из четырех значений P_0 , принятых равными $5,00 \cdot 10^{12}$; $5,91 \cdot 10^{19}$; $1,18 \cdot 10^{20}$ и $2,36 \cdot 10^{20}$ дел. АЗ/с;

Таблица 1

Выборка эксплуатационно-регламентированных прогнозных параметров ИМН БР-1М

$\Delta\rho_{\text{МК}}, \beta_{\text{эф}}$	Y , дел. АЗ	Θ , мкс	τ , мкс	$\Delta\rho$, $\beta_{\text{эф}}$	Y , дел. АЗ	Θ , мкс	τ , мкс
0,072	1,94+17	82,0	32,1	0,080	2,43+17	73,0	28,7
0,074	2,05+17	79,0	31,2	0,082	2,57+17	71,7	27,9
0,076	2,17+17	77,0	30,3	0,084	2,72+17	70,5	27,2
0,078	2,30+17	75,0	29,5	0,086	2,88+17	69,5	26,6

– полноформатный расчет для $\rho_0 = \beta_{эф} + \Delta r_{мк} = 1,078\beta_{эф}$ и каждого из четырех значений P_0 , принятых равными $5,00 \cdot 10^{12}$; $5,91 \cdot 10^{19}$; $1,18 \cdot 10^{20}$ и $2,36 \cdot 10^{20}$ дел. АЗ/с;

– полноформатный расчет для $\rho_0 = \beta_{эф} + \Delta r_{мк} = 1,081\beta_{эф}$ и каждого из четырех значений P_0 , принятых равными $5,00 \cdot 10^{12}$; $5,91 \cdot 10^{19}$; $1,18 \cdot 10^{20}$ и $2,36 \cdot 10^{20}$ дел. АЗ/с;

– полноформатный расчет для $\rho_0 = \beta_{эф} + \Delta r_{мк} = 1,084\beta_{эф}$ и каждого из четырех значений P_0 , принятых равными $5,00 \cdot 10^{12}$; $5,91 \cdot 10^{19}$; $1,18 \cdot 10^{20}$ и $2,36 \cdot 10^{20}$ дел. АЗ/с.

Генеральная выборка полученных результатов расчета в количественном выражении представлена в табл. 2.

Таблица 2

Избранные расчетные параметры импульсов делений для избранных переходов над запаздывающей критичностью при их генерировании с избранных стартовых мощностей делений в абсолютном и относительном форматах

$\rho_0, \beta_{эф}$	P_0 , дел. АЗ/с	$Y_{\text{мин}}$, дел. АЗ отн. ед.	Y , дел. АЗ отн. ед.	$P_{\text{пик}}$, дел. АЗ/с отн. ед.	Θ , мкс отн. ед.	τ , мкс	$\Delta T_{\text{старт}}$, мкс
1,075	5,00+12	$\frac{1,649+17}{1,000}$	$\frac{1,850+17}{1,000}$	$\frac{1,746+21}{1,000}$	$\frac{84,1}{1,000}$	$\frac{32,03}{1,000}$	661,5
	5,91+19	$\frac{1,835+17}{1,113}$	$\frac{2,032+17}{1,098}$	$\frac{2,084+21}{1,194}$	$\frac{79,0}{0,939}$	$\frac{35,61}{1,112}$	144,1
	1,18+20	$\frac{1,989+17}{1,206}$	$\frac{2,182+17}{1,179}$	$\frac{2,362+21}{1,353}$	$\frac{75,8}{0,901}$	$\frac{35,97}{1,123}$	123,3
	2,36+20	$\frac{2,240+17}{1,358}$	$\frac{2,429+17}{1,313}$	$\frac{2,831+21}{1,621}$	$\frac{71,9}{0,855}$	$\frac{35,93}{1,122}$	102,8
1,078	5,00+12	$\frac{1,811+17}{1,000}$	$\frac{2,010+17}{1,000}$	$\frac{2,018+21}{1,000}$	$\frac{80,0}{1,000}$	$\frac{30,66}{1,000}$	638,7
	5,91+19	$\frac{2,004+17}{1,107}$	$\frac{2,198+17}{1,094}$	$\frac{2,374+21}{1,176}$	$\frac{75,6}{0,945}$	$\frac{34,59}{1,128}$	141,0
	1,18+20	$\frac{2,161+17}{1,193}$	$\frac{2,352+17}{1,170}$	$\frac{2,670+21}{1,323}$	$\frac{72,8}{0,910}$	$\frac{34,36}{1,121}$	121,9
	2,36+20	$\frac{2,416+17}{1,334}$	$\frac{2,603+17}{1,295}$	$\frac{3,163+21}{1,567}$	$\frac{69,3}{0,866}$	$\frac{34,21}{1,116}$	102,9
1,081	5,00+12	$\frac{1,975+17}{1,000}$	$\frac{2,181+17}{1,000}$	$\frac{2,316+21}{1,000}$	$\frac{76,3}{1,000}$	$\frac{29,39}{1,000}$	616,3
	5,91+19	$\frac{2,183+17}{1,100}$	$\frac{2,375+17}{1,089}$	$\frac{2,697+21}{1,165}$	$\frac{72,5}{0,950}$	$\frac{32,70}{1,113}$	139,9
	1,18+20	$\frac{2,344+17}{1,181}$	$\frac{2,533+17}{1,161}$	$\frac{3,008+21}{1,299}$	$\frac{70,1}{0,919}$	$\frac{32,74}{1,114}$	121,1
	2,36+20	$\frac{2,605+17}{1,312}$	$\frac{2,790+17}{1,279}$	$\frac{3,529+21}{1,524}$	$\frac{66,8}{0,875}$	$\frac{32,80}{1,116}$	101,5
1,084	5,00+12	$\frac{2,183+17}{1,000}$	$\frac{2,376+17}{1,000}$	$\frac{2,670+21}{1,000}$	$\frac{72,8}{1,000}$	$\frac{28,15}{1,000}$	596,0
	5,91+19	$\frac{2,385+17}{1,093}$	$\frac{2,575+17}{1,084}$	$\frac{3,076+21}{1,152}$	$\frac{69,4}{0,953}$	$\frac{31,03}{1,102}$	137,7
	1,18+20	$\frac{2,550+17}{1,168}$	$\frac{2,737+17}{1,152}$	$\frac{3,406+21}{1,276}$	$\frac{67,2}{0,923}$	$\frac{31,11}{1,105}$	119,9
	2,36+20	$\frac{2,815+17}{1,290}$	$\frac{2,997+17}{1,261}$	$\frac{3,951+21}{1,480}$	$\frac{64,3}{0,883}$	$\frac{31,03}{1,102}$	100,6

В дополнение к основным параметрам импульса делений, учитываемых на стадии подготовки к генерированию ИМН БР-1М, в табл. 2 включены важные в прикладном аспекте данные по энерговыделению собственно в импульсе реактора (до первого минимума в реализуемой форме импульса, Y_{\min}) и интервал между пиками импульса ЛИУ и пиком импульса реактора, обозначаемый далее по тексту как $\Delta T_{\text{старт}}^{\text{пик}}$.

Графические отображения расчетных данных для функциональных зависимостей мощности реактора в процессе развития ИМН $P(t)$ и $P(\rho)$ (от времени и от реализованной текущей реактивности) представлены на рис. 1, 3, 5, 7 и 2, 4, 6, 8, соответственно.

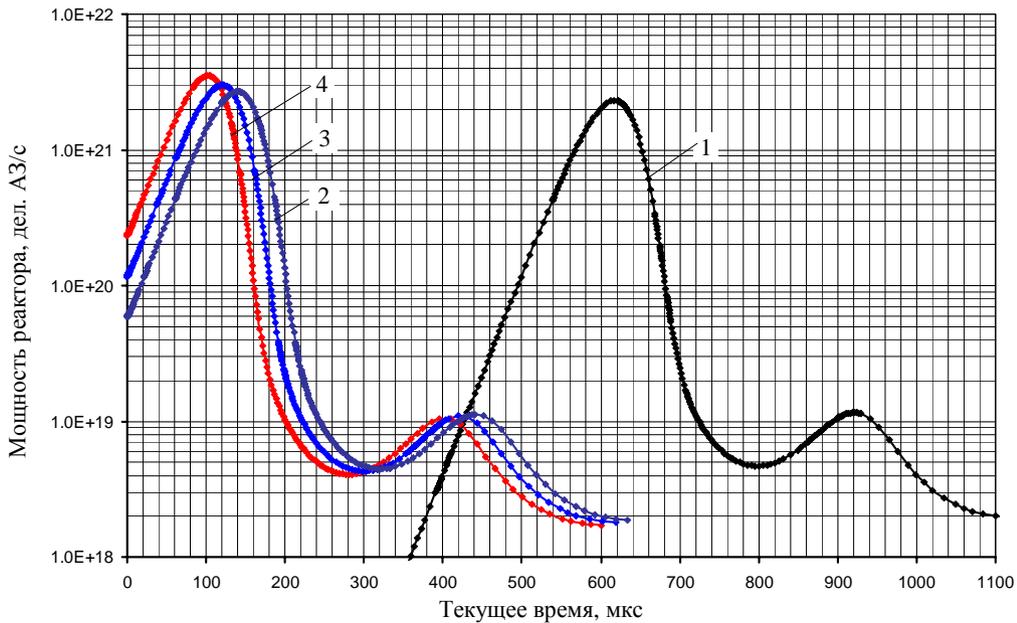


Рис. 1. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция времени в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,075\beta_{\text{эф}}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

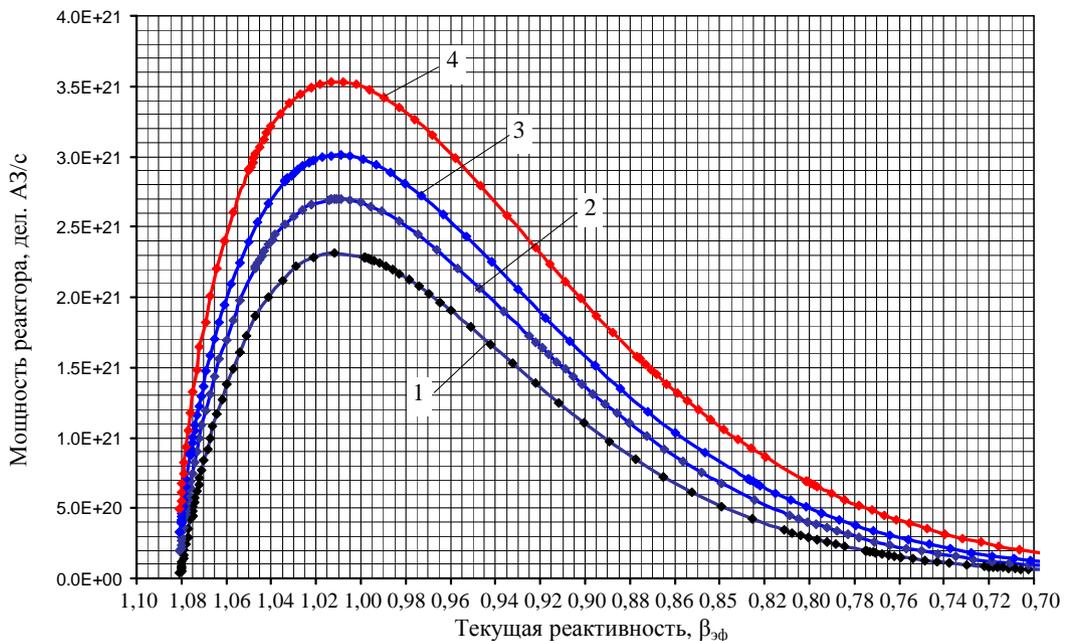


Рис. 2. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция текущей реактивности в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,075\beta_{\text{эф}}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

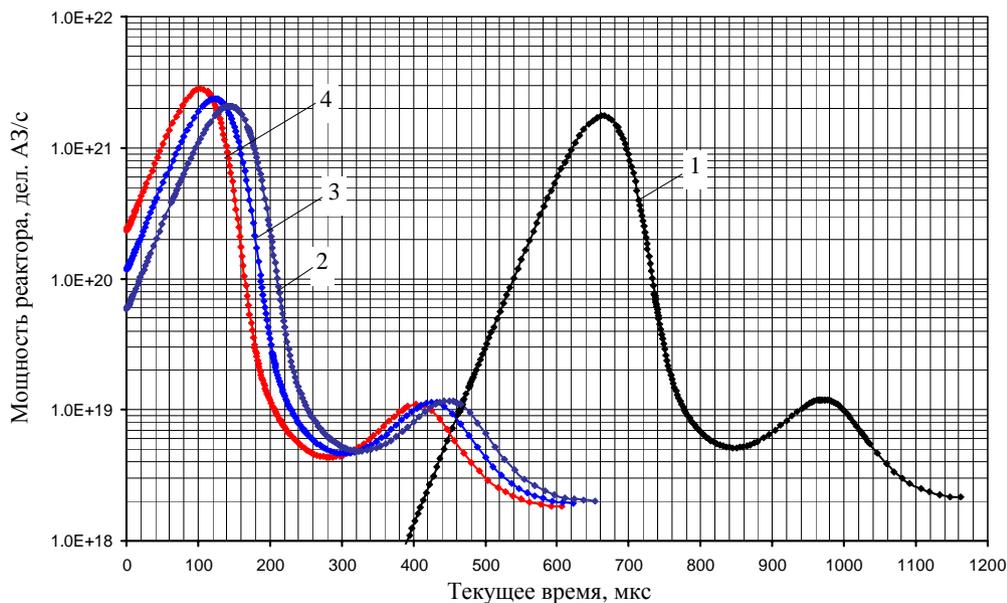


Рис. 3. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция времени в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,078\beta_{эф}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

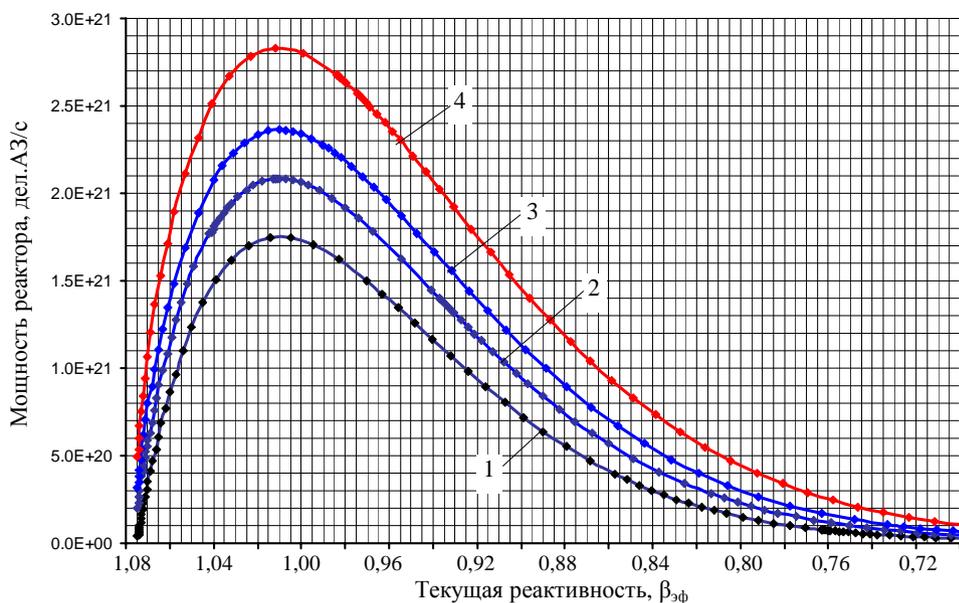


Рис. 4. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция текущей реактивности в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,078\beta_{эф}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

Для большей визуальной наглядности в графических представлениях $P(\rho)$ использован обратный отсчет численных значений реактивности ρ – от максимума вводимой реактивности ρ_0 в сторону ее уменьшения в процессе развития импульса делений с графическим ограничением по достижении первого минимального значения мощности, следующего за ее максимумом в пике импульса, после которого формируется колеба-

тельный характер изменения реактивности в процессе, в целом, системного ее уменьшения.

Анализ данных табл. 2 показывает:

- для всех ρ_0 и $P_0 = 5,00 \cdot 10^{12}$ дел. АЗ/с имеет место традиционный характер развития ИМН с асимптотическим периодом τ в интервале времени не менее 15τ ;

- для всех ρ_0 и P_0 от $5,91 \cdot 10^{19}$ дел. АЗ/с и более имеет место выраженное увеличение энерге-

тических параметров $Y_{1\min}$ и Y ; для ИМН с планируемым переходом $1,084\beta_{\text{эф}}$ и энерговыделением $2,7 \cdot 10^{17}$ дел. АЗ (верхняя граница планирования энерговыделения для ИМН БР-1М) прогнозируемый рост $Y_{1\min}$ составляет 1,29 раза, а Y – 1,26 раза; для рассмотренной выборки данных относительное возрастание параметров $Y_{1\min}$ и Y более выражено для ИМН с меньшим ρ_0 ;

– рост энергетических параметров с увеличением стартовой мощности вызывает заметное уменьшение полуширины импульса Θ , не превышающее, однако, 10 %;
 – при P_0 от $5,91 \cdot 10^{19}$ дел. АЗ/с и более область асимптотического периода разгона реактора практически отсутствует; приведенные значения τ определены на участке длительностью $\sim 0,5\tau$ с момента расчетного старта реактора;

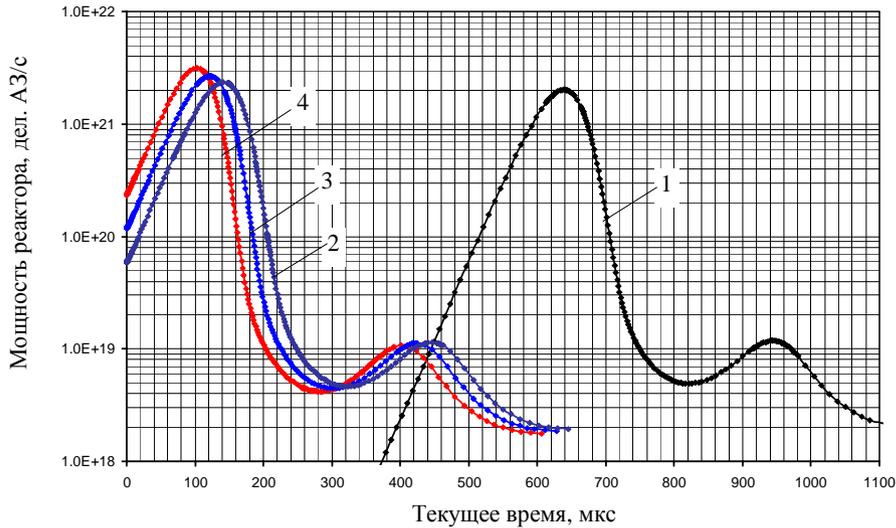


Рис. 5. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция времени в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,081\beta_{\text{эф}}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

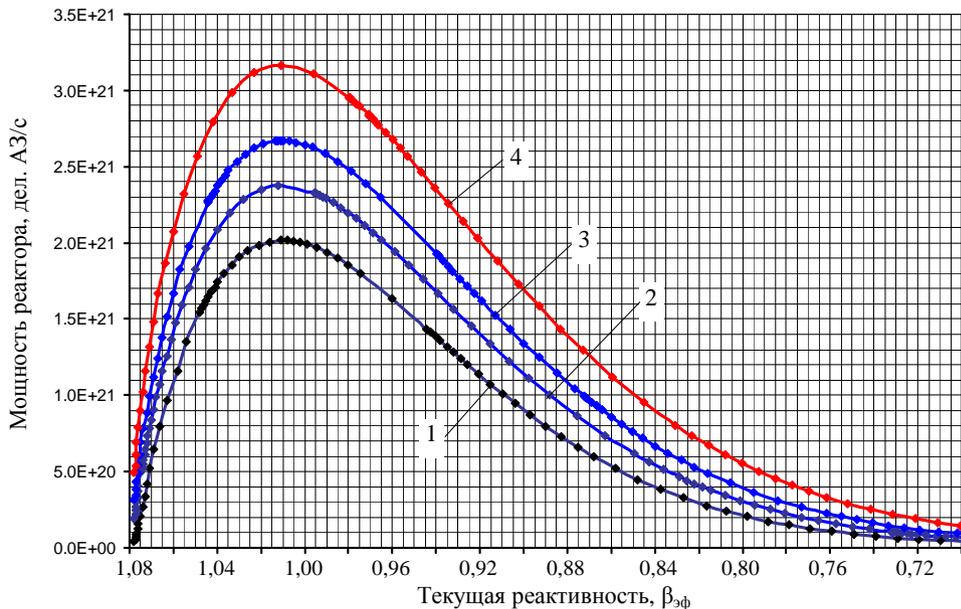


Рис. 6. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция текущей реактивности в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,081\beta_{\text{эф}}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

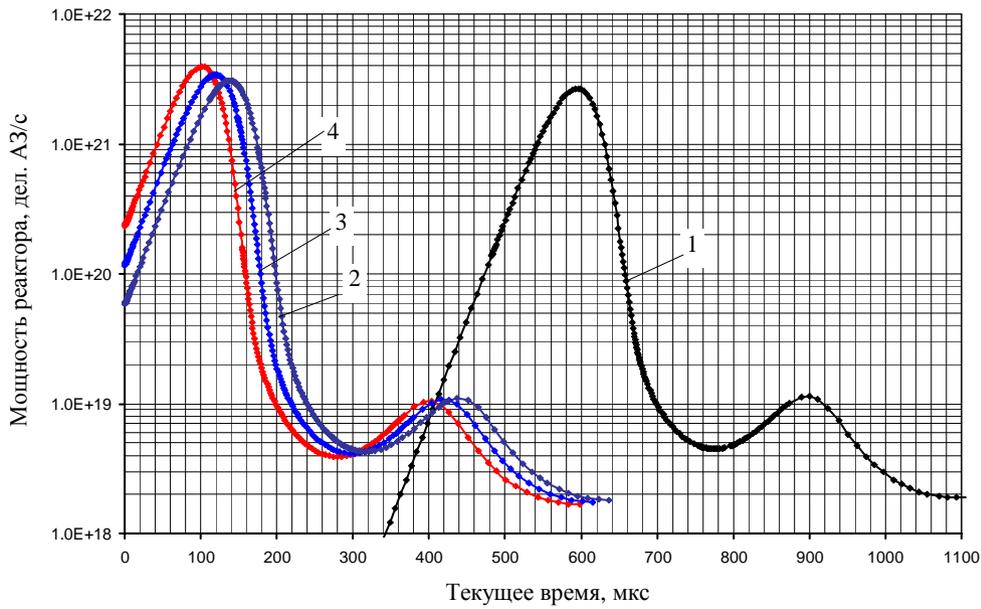


Рис. 7. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция времени в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,084\beta_{эф}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

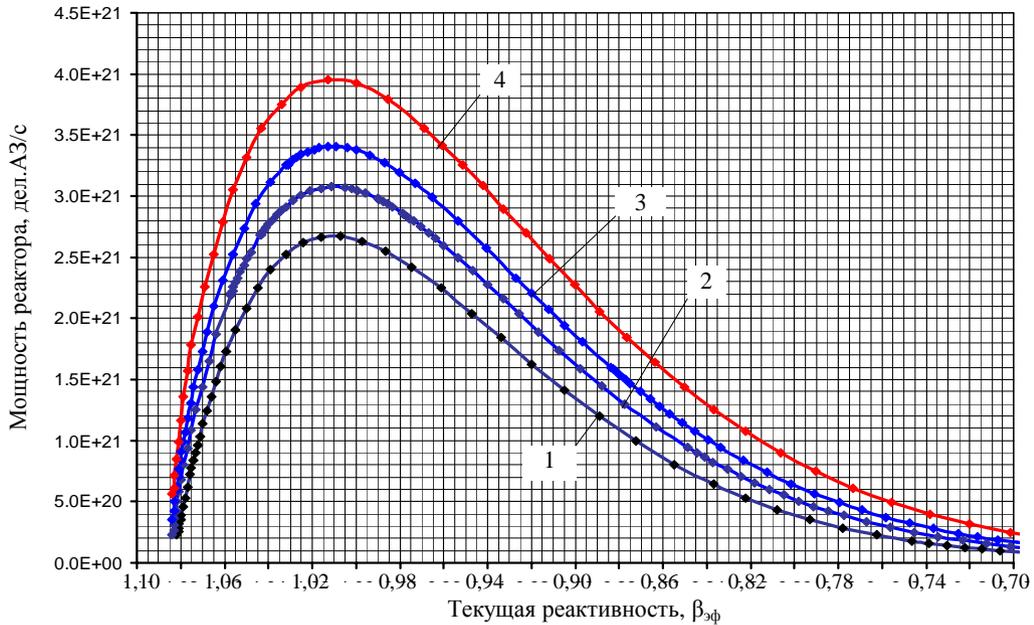


Рис. 8. Мощность в ИМН реактора БР-1М как функция текущей реактивности в зависимости от уровня стартовой мощности при генерировании с реактивности $1,084\beta_{эф}$; P_0 принято равным $5,00 \cdot 10^{12}$ (1); $5,98 \cdot 10^{19}$ (2); $1,18 \cdot 10^{20}$ (3); $2,36 \cdot 10^{20}$ (4) дел. АЗ/с

– для всех ρ_0 и P_0 от $5,91 \cdot 10^{19}$ дел. АЗ/с значительно (в несколько раз) сокращается интервал между моментом инициирования импульса делений и достижением пика его мощности; в рассмотренных условиях генерирования ИМН реактора БР-1М при инициировании его импульсом ускорителя ЛИУ-30 следует констатировать невозможность регулируемого варьирования интер-

вала времени между импульсом ускорителя и пиком импульса реактора длительностью большей, чем $\Delta T_{\text{старт}}^{\text{пик}}$.

В практике комплексной работы ядерно-физических установок ЛИУ-30 и БР-1М режим генерирования импульсов деления реактора с высокой начальной мощности, формируемой ускорителем

ЛИУ-30, фактически только начинает использоваться. Для проведения сравнения полученных расчетных данных с экспериментальным аналогом удалось выделить три ИМН БР-1М, осуществленных в требуемом режиме генерирования совместно с ЛИУ-30. Планируемые, фактически реализованные и следующие из расчетного прогноза с использованием рассмотренного выше формализма энергетические и временные параметры ИМН № 41, 79 и 80 представлены в табл. 3.

Численные значения для реактивности $\Delta\rho_{\text{МК}}$ приведены с сохранением формата ее определения в рамках эксплуатационного формализма. Численные значения штатного прогноза величин Y , Θ и τ определены по представленным ранее по тексту статьи соотношениям (1), (2), (3), соответственно.

Фактически реализованные численные значения таких параметров ИМН, как $Y_{1\text{мин}}$, $P_{\text{пик}}$, Θ , τ и $\Delta T_{\text{старт}}^{\text{пик}}$, определены по показаниям штатного регистратора формы импульса (РФИ) с вакуумированной камерой типа КНК-15 в борном чехле. Использовалось значение эффективности регистрационного тракта РФИ $\varepsilon = 1,39 \cdot 10^{-23}$ Кл/дел. АЗ.

Для определения реализованных значений энерговыделения за ИМН Y использованы показания штатных никелевых мониторов внешнего расположения и аттестованная связь этих показаний с энерговыделением в АЗ реактора БР-1М.

В качестве исходных параметров $\rho_0 = \beta_{\text{эф}} + \Delta\rho_{\text{МК}}$ и P_0 для расчета, представленных в разделе «Расчетный прогноз» табл. 3 энергетических и временных параметров ИМН, использовались соответствующие значения $\Delta\rho_{\text{МК}}$ и P_0 из раздела «Фактически получено» табл. 3. Для визуальной оценки уровня сопоставимости реальной и расчетной форм ИМН № 41, 79 и 80 на рис. 9–11 представлены графические отображения попарно совмещенных данных эксперимента и расчета, соответственно.

Из табл. 3 для параметра Y имеем следующее рассогласование значений штатного прогноза и фактически полученных:

- в ИМН № 41 фактически полученное энерговыделение в 1,045 раза больше штатно ожидаемого (превышение штатного прогноза на 4,5 %);
- в ИМН № 79 фактически полученное энерговыделение в 1,23 раза больше штатно ожидаемого (превышение штатного прогноза на ~23 %);
- в ИМН № 80 фактически полученное энерговыделение в 1,23 раза больше штатно ожидаемого (превышение штатного прогноза на ~23 %).

Для рассогласования фактически полученных значений Y и соответствующих им данных расчетного прогноза имеем:

- в ИМН № 41 расчетное энерговыделение в 0,908 раза меньше фактически полученного (различие на 9,2 %);

Таблица 3

Параметры импульсов делений БР-1М, полученные при иницировании от ЛИУ-30

ИМН №	$\Delta\rho_{\text{МК}}, \beta_{\text{эф}}$	P_0 , дел. АЗ/с	$Y_{1\text{мин}}$, дел. АЗ	Y , дел. АЗ	$P_{\text{пик}}$, дел. АЗ/с	Θ , мкс	τ , мкс	$\Delta T_{\text{старт}}^{\text{пик}}$, мкс
Штатный прогноз								
41	0,08081	–	–	2,487+17	–	72,5	28,4	–
79	0,08011	–	–	2,438+17	–	73,0	28,6	–
80	0,07575	–	–	2,155+17	–	77,2	30,4	–
Фактически получено								
41	0,08081	5,80+19	2,264+17	2,598+17	2,807+21	71,9	28,7	135,4
79	0,08011	2,35+20	2,455+17	2,994+17	3,171+21	69,8	31,0	99,9
80	0,07575	2,56+20	2,164+17	2,647+17	2,638+21	74,2	35,0	100,1
Расчетный прогноз								
41	0,08081	5,80+19	2,166+17	2,358+17	2,664+21	72,8	30,5	139,5
79	0,08011	2,35+20	2,543+17	2,729+17	3,407+21	67,6	32,1	102,8
80	0,07575	2,56+20	2,313+17	2,501+17	2,969+21	70,9	34,1	101,2

– в ИМН № 79 расчетное энерговыделение в 0,911 раза меньше фактически полученного (различие на 8,6 %);

– в ИМН № 80 расчетное энерговыделение в 0,945 раза меньше фактически полученного (различие на 5,5 %).

При очевидно выраженном значимом превышении фактически полученных значений Y над штатно прогнозируемыми имеющую место рассогласованность фактических и расчетных данных для Y можно рассматривать как системное смещение на ~5 % с вариативностью на уровне среднего ± 4 %.

В целом результаты сопоставления фактически полученных и установленных с привлечением предложенной расчетно-теоретической модели одноименных параметров ИМН, представленных в табл. 3 и на рис. 9–11, свидетельствуют, на наш взгляд, о приемлемом в аспекте практического применения уровне прогнозирования энергетических и временных параметров импульсов делений в режиме их генерирования с высокого уровня иницирующей (стартовой) мощности при использовании развитого расчетного подхода.

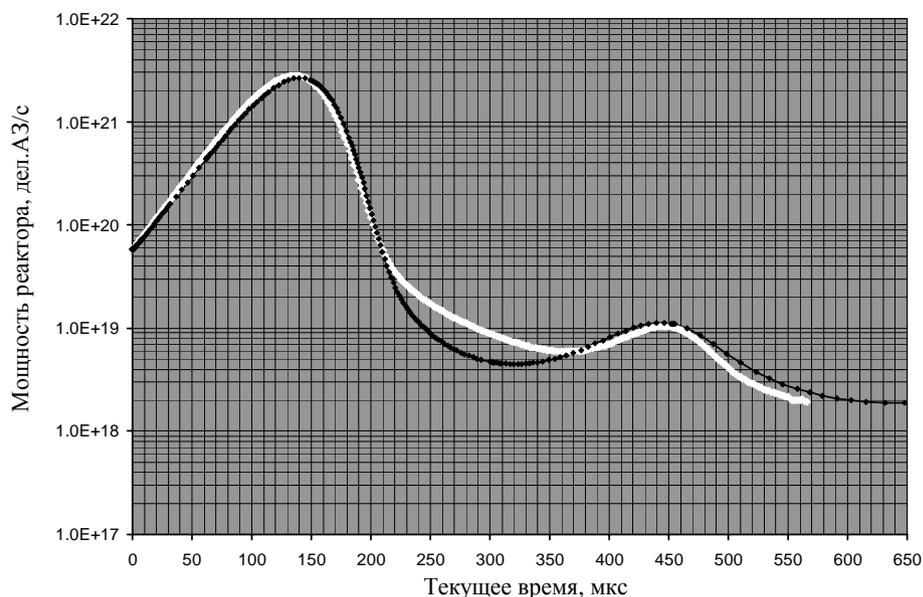


Рис. 9. Экспериментальная (белым) и расчетная (черным, $\rho = 1,08081\beta_{эф}$, $P_0 = 5,80 \cdot 10^{19}$ дел. А3/с) мощности реактора БР-1М в ИМН № 41

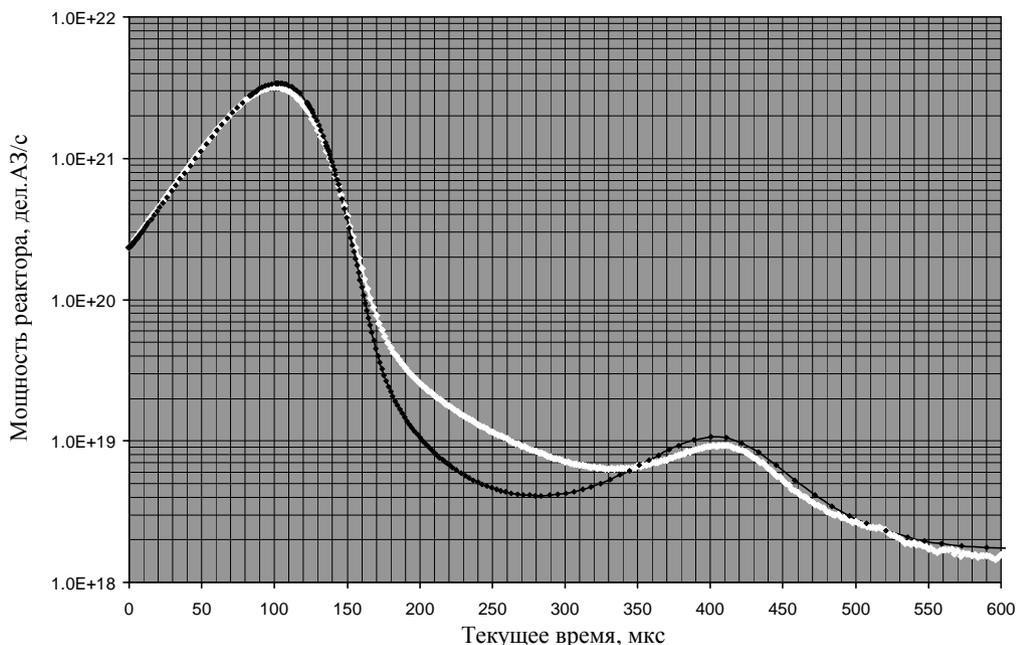


Рис. 10. Экспериментальная (белым) и расчетная (черным, $\rho = 1,08011\beta_{эф}$, $P_0 = 2,35 \cdot 10^{20}$ дел. А3/с) мощности реактора БР-1М в ИМН № 79

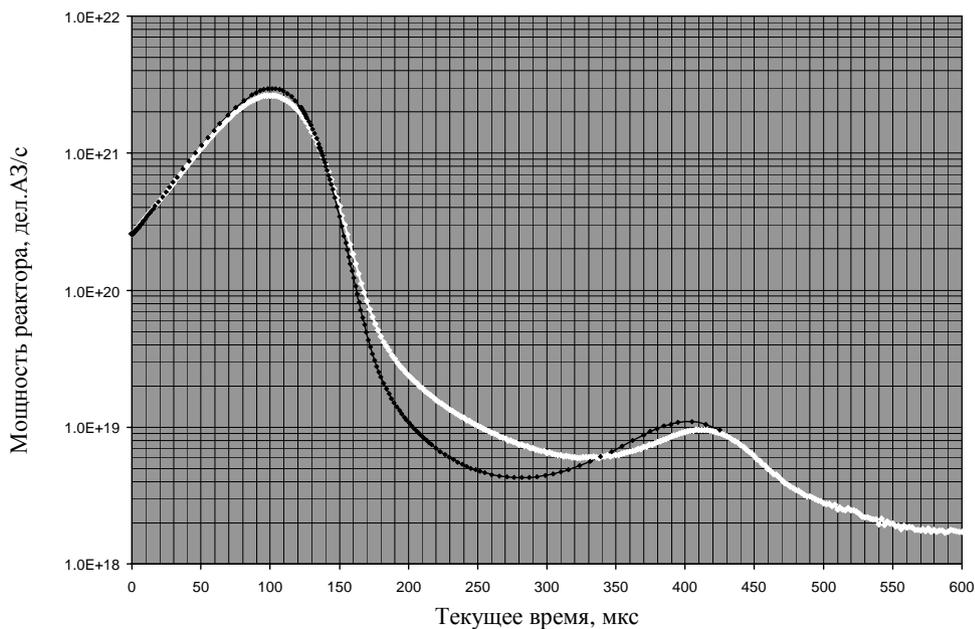


Рис. 11. Экспериментальная (белым) и расчетная (черным, $\rho = 1,07575\beta_{эф}$, $P_0 = 2,56 \cdot 10^{20}$ дел. Аз/с) мощности реактора БР-1М в ИМН № 80

В заключение авторы выражают благодарность специалистам группы эксплуатации реактора БР-1М, в первую очередь, специалистам по выводу реактора на требуемые физические параметры и определению этих параметров Мочкаеву М. В. и Арапову А. В., за доброжелательное отношение и помощь в получении экспериментальных данных в формате, необходимом для определения уровня сопоставимости результатов расчета и эксперимента.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы: Монография в двух томах. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 1.
2. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко В. А. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергий. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, вып. 1, с. 165–191.
3. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергий. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, вып. 1, с. 136–164.

4. Хоружий В. Х. Уравнения кинетики реактора и бустера в терминах интенсивности делений // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, № 2, с. 14–16.

5. Хоружий В. Х., Кошелев А. С., Колесов В. Ф. Интегрирование уравнений кинетики импульсного реактора на быстрых нейтронах жестко-устойчивыми методами Гира // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1989, № 1, с. 8–14.

6. Хоружий В. Х., Колесов В. Ф. К расчету полей отраженных нейтронов и нейтронов утечки с помощью методов инвариантного погружения и сложения // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1987, № 1, с. 3–11.

7. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы: Монография в двух томах. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 2.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,

тел.: (831 30) 3-06-87

Статья поступила в редакцию 17.06.2013.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2013, вып. 3, с. 102–111.