

P13-2022-52

Ю. Н. Пепелышев, Д. Сумхуу

ДИНАМИКА РЕАКТОРА **ИБР-2М**
ПРИ ЧАСТОТЕ ПОВТОРЕНИЯ
ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ 10 Гц

Направлено в журнал «Nuclear Engineering and Technology»

Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.

P13-2022-52

Динамика реактора ИБР-2М при частоте повторения импульсов мощности 10 Гц

Представлены результаты анализа математического моделирования динамики импульсного реактора ИБР-2М при переходе частоты повторения импульсов мощности с 5 на 10 Гц. Исследовалось изменение амплитудно-частотной характеристики реактора при изменении импульсной доли запаздывающих нейтронов. Использовались экспериментальные данные по параметрам мощностной обратной связи, полученные в 2021 г. при энерговыработке ИБР-2М 1820 МВт·сут. В результате показано, что при переходе реактора в режим с частотой повторения импульсов 10 Гц амплитуда колебаний энергии импульсов существенно зависит от величины импульсной доли запаздывающих нейтронов β_n . При изменении величины β_n может быть реализовано как подавление, так и усиление колебаний мощности реактора в интервалах частот 0,05–0,20 и 1,25–5,00 Гц.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2022

Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.

P13-2022-52

Dynamics of the IBR-2M Reactor at a Power Pulse Repetition Frequency of 10 Hz

The results of the analysis of a mathematical modeling for the IBR-2M pulsed reactor dynamics for a transition from a power pulse repetition frequency of 5 to 10 Hz are presented. The change in the amplitude response of the reactor for variable pulse delayed neutron fraction was studied. We used a set of power feedback parameters determined experimentally in 2021 at an energy output of 1820 MW·day. At a pulse repetition frequency of 10 Hz, the amplitude of pulse energy oscillations significantly depends on the value of the delayed neutron fraction in pulse β_p . Depending on β_p both suppression and amplification of reactor power fluctuations in the frequency ranges of 0.05–0.20 and 1.25–5.00 Hz can be realized.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2022

ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы импульсных реакторов периодического действия ИБР-2 и ИБР-2М возникают нехорошие с точки зрения безопасности колебания мощности на частотах вблизи $\sim 0,1$ Гц. Есть ряд мер, которые позволяют ослабить развитие неустойчивости. Эти меры не требуют переделок реактора или его окружения. Они доступны для использования [1–3]. Существует и другая возможность ослабить колебания мощности — перейти на повышенную частоту повторения импульсов, например на 10 Гц. Повышение частоты импульсов позволяет увеличить значение импульсной доли запаздывающих нейтронов β_n и тем самым уменьшить реакторный шум в целом. Но как при этом изменятся колебания, точно не известно. Уместно вспомнить, что на реакторе ИБР-2 в свое время исследовались режимы повторения импульсов 50 и 25 Гц, при которых особого увеличения β_n не произошло. Создать модулятор реактивности для ИБР-2М с повышенным β_n , вероятно, можно, но нужно отдавать себе отчет в том, что это будет новый режим работы реактора, фактически новый реактор, в связи с чем могут появиться ранее не учтенные проблемы. При этом нет 100%-й уверенности в том, что увеличение β_n позволит избавиться от колебаний мощности. При переходе на повышенную частоту импульсов сам реактор (активная зона и ее ближайшее окружение) не изменится, но его динамические свойства изменятся. В данной работе рассматривается динамика ИБР-2М в режимах 5 и 10 Гц в зависимости от изменения β_n . Значения параметров активной зоны, включая параметры мощностной обратной связи, были взяты на конец 2021 г. Конструктивные особенности модулятора реактивности, влияющие на изменение β_n , не рассматривались, т. е. значение β_n считалось заданным.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕАКТОРЕ ИБР-2М

Импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия ИБР-2 является уникальным по принципу действия, по конструкции, по параметрам [4]. Реактор генерирует узкие импульсы мощности с периодом 0,2 с. Амплитуда импульса мощности P_m почти на три порядка больше средней мощности за период \bar{P} ($\bar{P} = 2$ МВт, $P_m = 1850$ МВт). В качестве топлива используется двуокись плутония, в качестве теплоносителя — жидкий натрий.

Активная зона имеет форму вертикальной шестигранной призмы. Все грани призмы, кроме одной, окружены стационарными отражателями. Мимо свободной грани проходит подвижный отражатель, который состоит из двух стальных лопастей (рис. 1). Лопастей в кожухе, заполненном гелием,

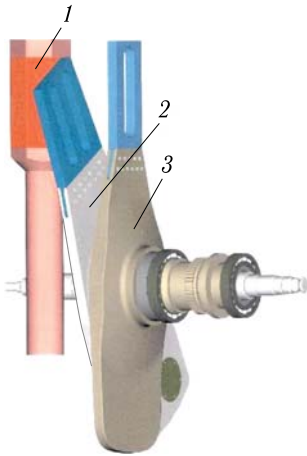


Рис. 1. Подвижный отражатель реактора ИБР-2: 1 — активная зона реактора; 2 и 3 — основной и дополнительный подвижный отражатель соответственно

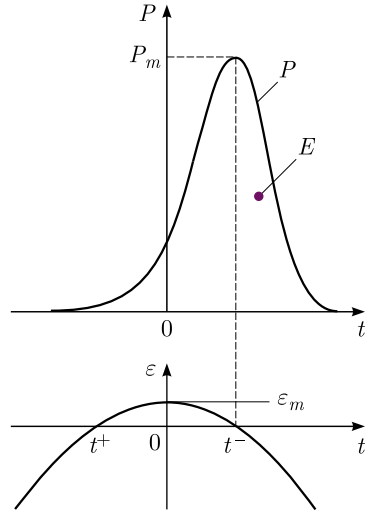


Рис. 2. Импульс мощности (P) и верхняя часть импульса реактивности на мгновенных нейтронах (ε): E — энергия импульса мощности; t — время; $t^+ - t^-$ — интервал надкритичности; ε_m — максимум реактивности на мгновенных нейтронах

вращаются в противоположные стороны с разными скоростями. Скорость основного подвижного отражателя — 600 об/мин, дополнительного — 300 об/мин.

Когда лопасти проходят мимо активной зоны одновременно, создается импульс реактивности. В штатном режиме положение органов управления такое, что реактор в течение ~ 450 мкс находится в надкритическом состоянии на мгновенных нейтронах. В течение этого времени происходит стремительный рост мощности. Когда лопасти отходят от активной зоны, реактивность резко уменьшается, реактор становится глубокоподкритическим, мощность реактора стремительно падает (рис. 2).

Эффективность подвижного отражателя большая: $\Delta k_{MP} = 0,03$, т. е. 3%. Поэтому между импульсами мощности состояние реактора глубокоподкритическое. При прохождении мимо активной зоны только основного подвижного отражателя создается побочный импульс реактивности малой амплитуды, не оказывающий существенного влияния на работу реактора (реактор остается глубокоподкритическим). В результате реактор генерирует узкие импульсы мощности. Ширина импульса на половине высоты равна ~ 200 мкс, период импульсов — 0,2 с. Мощность реактора между импульсами (мощность фона) на порядок меньше средней мощности [4].

Импульсный реактор подвержен существенным возмущениям реактивности и очень чувствителен к этим возмущениям. Для стационарного и импульсного реакторов изменения средней мощности или энергии импульса Q/Q_0 , следующего за мгновенным скачком реактивности, и периода разгона реактора на запаздывающих нейтронах T_S могут быть описаны одинаковыми уравнениями:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{1}{1 - P}, \quad P = \sum_{i=1}^6 \frac{(\beta_i/\beta_{эф})}{1 + \lambda_i T_S}.$$

При этом для стационарных реакторов $P = \Delta K/\beta_{эф}$, для импульсных $P = \Delta K/\beta_{и}$. Поскольку для ИБР-2М $\beta_{и}$ меньше $\beta_{эф}$ в 14 раз, то ИБР-2М, как видно, больше чем на порядок чувствительнее к изменению реактивности по сравнению со стационарным реактором. Поэтому флуктуации амплитуды импульсов в ИБР-2М велики — 45%. Аварийная защита срабатывает при отклонении средней мощности на $\pm 20\%$ и при отклонении амплитуды импульса на $+100$ и -50% от заданных значений. При срабатывании аварийной защиты реактивность уменьшается за $0,2$ с так, что следующий импульс мощности не возникает. Из вышесказанного видно, что величина $\beta_{и}$ имеет важное значение в кинетике и динамике и, соответственно, для устойчивости импульсного реактора периодического действия. Ниже кратко рассмотрена эволюция в понимании сути $\beta_{и}$.

КИНЕТИКА РЕАКТОРА ИБР-2М. ПОНЯТИЕ $\beta_{и}$

Первая статья по импульсному реактору периодического действия была опубликована в 1959 г. учеными И. И. Бондаренко и Ю. Я. Стависским [5]. В этой работе показано, что при малых возмущениях зависимость средней мощности импульсного реактора от времени аналогична зависимости для обычных быстрых реакторов:

$$W(t) = \frac{\sum_i \lambda_i C_i(t)}{\nu} \frac{1}{\beta^* - \varepsilon(t)}, \quad \frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + W(t) \nu \beta_i,$$

где W — мощность реактора; t — время; C_i — концентрация предшественников запаздывающих нейтронов i -й группы; λ_i — соответствующая постоянная распада; ν — число вторичных нейтронов; ε — избыточный коэффициент размножения на мгновенных нейтронах в реакторе; β_i — выход запаздывающих нейтронов i -й группы. При этом β^* — доля запаздывающих нейтронов — выражается через коэффициент усиления K , зависящий от максимального значения реактивности в импульсе ε_m :

$$\beta^* = \frac{K(\varepsilon_0)}{dK(\varepsilon_m)/d\varepsilon_m|_{\varepsilon_0}}, \quad K(\varepsilon_m) = \frac{1,25}{\nu \alpha^{1/2} \varepsilon_m^{1/2}} \exp\left(\frac{1,33 \varepsilon_m^{3/2}}{\nu \tau \alpha^{1/2}}\right),$$

где ε_0 — значение равновесной максимальной реактивности; α — величина, зависящая от параметров подвижной части реактора. Позднее параметр β^* был назван импульсной долей запаздывающих нейтронов.

После пуска первого ИБР [6] появился проект Евратома — реактор SORA. Результаты модельных исследований динамики реактора SORA опубликованы в 1970 г. [7–9]. Так же, как и в работе И. И. Бондаренко и Ю. Я. Стависского, здесь было использовано понятие коэффициента умножения в импульсе, представленного в виде

$$K = 0,229 + 0,80\varepsilon_m + 0,0176 \exp(4140\varepsilon_m).$$

В дальнейшем, в 1976 г., в книге Е. П. Шабалина [10] коэффициент $K(\varepsilon_m)$ был обозначен как M и определен в виде

$$M = \frac{\pi B \tau}{\varepsilon_m^2} \exp\left(\frac{4}{3}B\right), \quad B = \frac{\varepsilon_m^{3/2}}{\nu \tau \alpha^{1/2}}.$$

В следующем разделе дано краткое описание кинетики импульсного реактора как динамической системы.

КИНЕТИКА ИБР-2М КАК ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (А. К. Попов и др. [11–14])

Уравнения кинетики можно представить в виде системы с безразмерными переменными:

$$\frac{\tau}{\beta} \frac{dP}{dt} = \frac{\varepsilon}{\beta} P + S, \tag{1}$$

$$S = \sum_i S_i, \tag{2}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} \frac{dS_i}{dt} + S_i = \mu_i P. \tag{3}$$

Здесь $P = k_n n$ — мощность реактора (k_n — коэффициент пропорциональности между мощностью и плотностью нейтронов n); τ — эффективное время жизни мгновенных нейтронов; $\varepsilon = \rho - \beta$ — реактивность на мгновенных нейтронах; S_i , $S = \sum_i S_i$ — нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная соответственно; $\mu_i = \beta_i/\beta$ — относительная доля запаздывающих нейтронов группы i ; β_i , β — доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная соответственно; t — время.

Мощность в интервалах между импульсами мала и существенно не меняется:

$$P_b = \frac{\beta}{-\varepsilon_b} (S + S_c), \tag{4}$$

где ε_b — реактивность фона:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_m - \Delta k_{MP}, \tag{5}$$

где ε_m — максимум реактивности в импульсе; $\Delta k_{\text{МР}}$ — эффективность подвижного отражателя. Энергия фона равна

$$E_b = P_b T = \frac{\beta T}{\Delta k_{\text{МР}} - \varepsilon_m} (S + S_c), \quad (6)$$

где T — период импульсов мощности; $\Delta k_{\text{МР}}$ намного больше ε_m^0 , а ε_m^0 существенно больше, чем отклонения реактивности ε_m от базового значения ε_m^0 . Поэтому формулу (6) можно представить в виде

$$E_b = P_b T = \frac{\beta T}{\Delta k_{\text{МР}} - \varepsilon_m^0} (S + S_c). \quad (6a)$$

Энергия импульса выражается формулой [10]

$$E = M (S + S_c), \quad (7)$$

где M — импульсный коэффициент передачи; $S + S_c$ — суммарная нормированная интенсивность источников нейтронов перед импульсом реактивности. В уравнениях S_i , S и S_c выражаются в тех же единицах, что и мощность P . Поэтому M имеет размерность времени и выражается в секундах.

Расчет импульсного коэффициента передачи. Для оценки β_n важно правильно оценить функцию $M(\varepsilon_m)$. Эта задача может быть выполнена разными путями: например, прямым расчетом при известных параметрах, определяющих импульсный коэффициент передачи, или, что более корректно, путем решения системы уравнений кинетики с экспериментально определенным ходом модулирующей реактивности. Коэффициент M вычисляется по уравнениям (1)–(3) и (7) и представляет собой нелинейную функцию максимума реактивности в импульсе ε_m . В качестве суммарной реактивности на мгновенных нейтронах ε использовались ход реактивности подвижного отражателя $\varepsilon_{\text{МР}}$ и варьируемое значение максимальной реактивности ε_m ($\varepsilon = \varepsilon_{\text{МР}} + \varepsilon_m$). Расчетное значение максимальной реактивности на мгновенных нейтронах в равновесном надкритическом состоянии реактора ИБР-2М и амплитуда мощности реактора соответственно равны $\varepsilon_m^0 = 1,13 \cdot 10^{-3}$ и 1,85 ГВт. При этом средняя мощность реактора равна 2 МВт. Для расчета использовались базовые значения параметров, полученные ранее в отдельных экспериментах: $\Delta k_{\text{МР}}^0 = 0,03$, $\tau^0 = 65$ нс, $\beta^0 = 2,16 \cdot 10^{-3}$. Параметры запаздывающих нейтронов при делении ^{239}Pu быстрыми нейтронами взяты из работы Дж.Р. Кипина [15]. Базовое значение импульсного коэффициента передачи M^0 (импульсный равновесный режим) вычислено из тождества

$$M^0 = \frac{E^0}{(S^0 + S_c)} = \frac{E^0 + E_b^0}{S^0} \frac{S^0}{(S^0 + S_c)} - \frac{E_b^0}{(S^0 + S_c)} \quad (8)$$

и уравнений (2), (3), (6а)

$$M^0 = \frac{E^0}{(S^0 + S_c)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{S_c}{S^0}\right) \sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(\lambda_i T) - 1}} - \frac{\beta T}{\Delta k_{MP} - \varepsilon_m^0}. \quad (9)$$

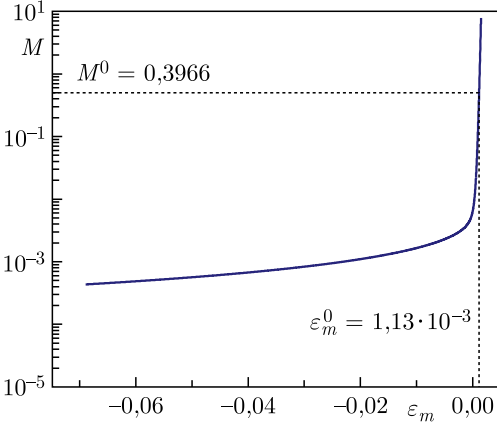


Рис. 3. Импульсный коэффициент передачи M как функция ε_m в широком диапазоне изменения реактивности: ε_m^0 и M^0 — базовое значение максимума реактивности и импульсного коэффициента передачи энергии импульсов соответственно

На рис. 3 представлен вычисленный импульсный коэффициент передачи M в зависимости от максимума реактивности ε_m . Там же указано его базовое значение при равновесной надкритичности.

Расчетная оценка импульсной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{и}$.

При моделировании режимов, характеризующихся широким диапазоном изменения реактивности, используется нелинейная зависимость M от ε_m . При исследовании обычных режимов возможны различные аппроксимации нелинейности в окрестности базовых значений M^0 и ε_m^0 . При достаточно широком диапазоне отклонений E от E^0 допустимо аппроксимировать функцию $M = f(\varepsilon_m)$ экспонентой:

$$\frac{M^0}{M} = \exp\left(\frac{\Delta\varepsilon_m}{\beta_{и}}\right), \quad (10)$$

где $\Delta\varepsilon_m = \varepsilon_m - \varepsilon_m^0$ — отклонение реактивности. Параметр $\beta_{и}$ определяется следующим образом:

$$\beta_{и} = \frac{1}{d \ln\left(\frac{M}{M^0}\right) / d\varepsilon_m \Big|_{\varepsilon_m^0}} = \frac{M^0}{dM/d\varepsilon_m \Big|_{\varepsilon_m^0}}. \quad (11)$$

Из уравнения (10) следует

$$\frac{\Delta E}{E^0} = \left(\frac{\Delta S}{S^0} + 1\right) \exp\left(\frac{\Delta\varepsilon_m}{\beta_{и}}\right) - 1. \quad (12)$$

Для режима стабилизации, когда отклонение энергии импульса от среднего уровня составляет единицы процентов, возможна линейная аппроксимация функции $M = f(\varepsilon_m)$. В результате получим

$$\frac{\Delta E}{E^0} = \frac{\Delta S}{S^0} + \frac{\Delta \varepsilon_m}{\beta_{и}}. \quad (13)$$

В формулах не учтен постоянный источник нейтронов, так как им можно пренебречь уже при мощности реактора на шесть порядков ниже номинальной. С помощью формул (12) и (13) показано, что реактивность в долях $\beta_{и}$ связана только с относительными отклонениями энергии импульса и источника. Для ИБР-2М $\beta_{и} = 1,54 \cdot 10^{-4}$.

Оценим влияние времени жизни нейтронов τ и эффективной доли запаздывающих нейтронов β на величину $\beta_{и}$. На рис. 4 показано изменение импульсного коэффициента передачи с надкритичностью при варьировании параметров τ и β . При этом, как видно из табл.1, меняется значение $\beta_{и}$. В табл.1 также приведены три варианта варьирования: 1) значение β постоянно ($\beta^0 = 2,16 \cdot 10^{-3}$), менялось только значение τ на 10% ($\tau = \tau^0 \pm 10\%$); 2) значение τ постоянно ($\tau^0 = 65$ нс), менялось только значение β на 10% ($\beta = \beta^0 \pm 10\%$); 3) значения обоих параметров (τ и β)

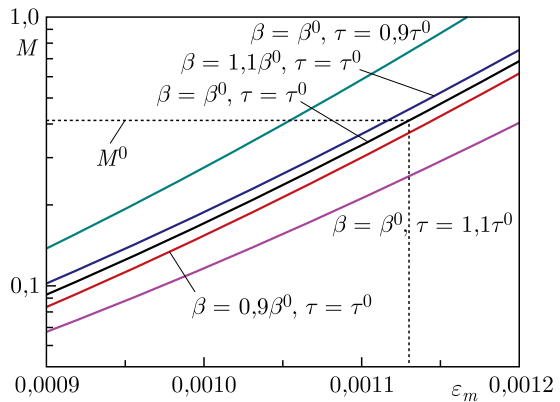


Рис. 4. Изменение импульсного коэффициента передачи при варьировании параметров τ и β

Таблица 1. Изменение импульсной доли запаздывающих нейтронов при варьировании параметров τ и β

Варьирование	Эффективные доли запаздывающих нейтронов	Время жизни мгновенных нейтронов	Импульсная доля запаздывающих нейтронов
Базовые значения	$\beta^0 = 2,16 \cdot 10^{-3}$	$\tau^0 = 65$ нс	$\beta_{и}^0 = 1,54 \cdot 10^{-4}$
Вариант 1	$\beta = \beta^0 = \text{const}$	$\tau = \tau^0 \pm 10\%$	$\beta_{и} = \beta_{и}^0 \pm 5,6\%$
Вариант 2	$\beta = \beta^0 \pm 10\%$	$\tau = \tau^0 = \text{const}$	$\beta_{и} = \beta_{и}^0 \pm 1\%$
Вариант 3	$\beta = \beta^0 \pm 10\%$	$\tau = \tau^0 \pm 10\%$	$\beta_{и} = \beta_{и}^0 \pm 6,2\%$

изменились на 10% ($\beta = \beta^0 \pm 10\%$ и $\tau = \tau^0 \pm 10\%$). Из табл. 1 видно, что наибольшее влияние на изменение $\beta_{\text{и}}$ оказывает третий вариант, при котором меняются значения обоих параметров — τ и β (на 10%). При этом изменение τ приводит к бóльшему отклонению M от M^0 и изменению $\beta_{\text{и}}$, чем β .

Эффективная доля запаздывающих нейтронов ИБР-2М. Выбор системы запаздывающих нейтронов в кинетике ИБР-2М имеет принципиальное значение, и вот почему. На рис. 5 показано изменение реактивности вблизи мгновенной критичности, измеренной на ИБР-2М в двух независимых экспериментах: 1) в подкритическом состоянии реактора в режиме непрерывной мощности (подвижные отражатели заторможены и могут только медленно передвигаться); 2) в импульсном режиме путем решения обратного уравнения кинетики для измеренного импульса мощности [16]. Как видно из рис. 5, при описании реального импульса работает другая система запаздывающих нейтронов, не та, которая используется при описании кинетики реакторов стационарного действия. Анализ показал, что к основной группе запаздывающих нейтронов необходимо добавить еще две группы так называемых комнатных нейтронов [17]. Это следует также из расчетов по методу Монте-Карло альбедных нейтронов с учетом реальной конструкции ближайшего окружения активной зоны ИБР-2М.

Какая тогда многогрупповая система запаздывающих нейтронов может быть использована на ИБР-2М? Здесь можно выделить две системы. Для того чтобы иметь точное представление о развитии быстрых процессов (в пределах десятых долей секунды), при описании самого импульса, развития аварийных ситуаций, сброса мощности и т. д. необходимо к основной группе добавить комнатные нейтроны. При описании процессов длительностью более десятой доли секунды комнатными нейтронами можно пренебречь. В качестве основной группы запаздывающих нейтронов достаточно использовать 6-групповое разбиение Кипина [15].

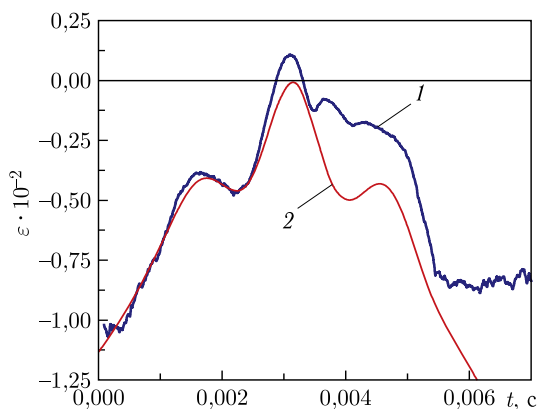


Рис. 5. Ход реактивности вблизи мгновенной критичности в реакторе ИБР-2М с модулятором ПО-3 (в абсолютных единицах) при динамических измерениях на этапе энергетического пуска (1) и при статических измерениях на этапе физического пуска (2)

КОЛЕБАНИЯ МОЩНОСТИ ИБР-2М. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ И БЫСТРАЯ МОЩНОСТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Неустойчивость мощности ИБР-2 и ИБР-2М ассоциируется с появлением достаточно сильных колебаний на низких частотах: 0,05–0,2 Гц. Эти колебания возникают и усиливаются с ростом средней мощности и энерговыработки. В реакторе со свежим (необлученным) топливом таких колебаний нет. Пример появления колебаний на реакторе ИБР-2М в начале снижения мощности приведен на рис. 6.

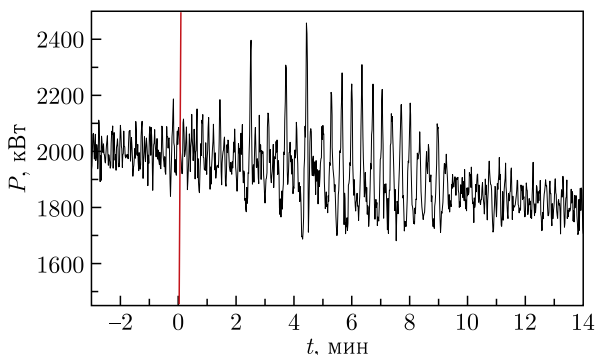


Рис. 6. Пример появления колебаний мощности ИБР-2М при снижении средней мощности реактора от 2 до 1,8 МВт в 2017 г. Вертикальной линией отмечено начало снижения мощности

Подробное исследование колебаний связано с созданием модели динамики импульсных реакторов периодического действия [1–2]. Модельные и экспериментальные исследования показали, что развитие колебаний мощности импульсных реакторов связано с изменением параметров быстрой мощностной обратной связи (МОС). Изменение параметров МОС зависит от многих факторов: средней мощности, энерговыработки, расхода теплоносителя, положения органов системы управления и защиты и т.д. МОС ИБР-2 и ИБР-2М может быть описана линейными уравнениями и представлена в виде суммы трех параллельных аperiodических звеньев [11, 12, 18]:

$$\Delta r_{Tn} = \sum_{j=1}^3 \Delta r_{Tjn}, \quad (14)$$

$$\Delta r_{Tjn} = \left(\Delta r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \exp \left(-\frac{T_n}{T_{Tj}} \right), \quad (15)$$

где Δr_{Tn} и Δr_{Tjn} — суммарная реактивность МОС и ее j -е составляющие, соответствующие n -му импульсу мощности в долях ($\beta_n = 1,54 \cdot 10^{-4}$); k_{Tj} , T_{Tj} — коэффициент передачи (в $\beta_n/\text{МВт}$) и постоянная времени (в секундах) j -й составляющей МОС ($j = 1, 2, 3$) соответственно; ΔE_n — отклонение полной энергии за период n -го импульса мощности от базового значения; T_n — период импульсов мощности ($T_n = 0,2$ с).

Импульсная характеристика МОС ИБР-2 и ИБР-2М, т.е. изменение реактивности МОС при воздействии единичного импульса мощности, может быть описана тремя слагаемыми следующим образом:

$$w_{rE} = \sum_{j=1}^3 \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \exp\left(-\frac{t}{T_{Tj}}\right) \left[\frac{\beta_{и}}{\text{МДж}} \right], \quad (16)$$

где t — время, с.

Сценарий действия отдельных компонентов МОС, на наш взгляд, следующий. При воздействии импульса мощности в топливе происходит мгновенный разогрев на 18°C с последующим снижением температуры между импульсами до равновесной. В этом случае действуют различные релаксационные процессы, приводящие реактор в некоторое квазистабильное равновесное состояние. Наиболее медленная составляющая МОС ($T_{T1} \approx 8-10$ с) обусловлена аксиальным расширением топлива при его разогреве за импульс. Два других звена с меньшими постоянными времени отражают изгиб топливных кассет: один изгиб — к центру активной зоны (а.з.) с положительным вводом реактивности, второй — отрицательный в сторону от а.з. с некоторым расширением опорной плиты, с которой связаны кассеты. Отметим, что вверху кассеты свободны. Первый изгиб к центру а.з. обусловлен градиентом температур по радиусу а.з. Отметим, что для энергонапряженной зоны, какой является а.з. ИБР-2М с малым объемом (~ 21 л), топливные кассеты при работающем реакторе за счет квазистационарного градиента температур уже изогнуты к центру а.з. Нагрев топлива за импульс дополнительно усиливает этот изгиб.

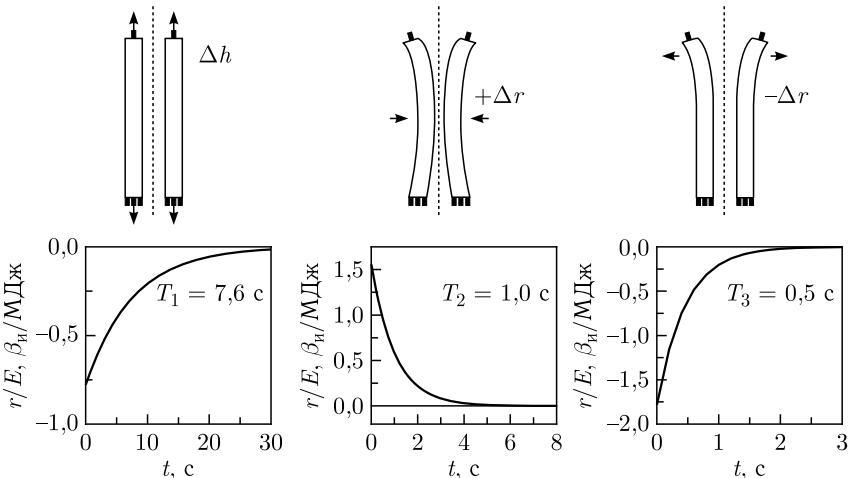


Рис. 7. Пример действия отдельных компонентов МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М: 1 — аксиальное расширение топлива; 2 — изгиб кассет к центру а.з.; 3 — изгиб кассет к периферии а.з. Внизу — соответствующие импульсные характеристики с указанием постоянных времени

Второй изгиб к периферии а.з. связан с нагревом натрия от мгновенных гамма-квантов и нейтронов импульса. Нагрев небольшой (на уровне $\sim 0,1^\circ\text{C}$), но вызывает заметный толчок кассет к периферии. Возможно, на формирование МОС влияют еще и другие физические процессы, но вышеперечисленные наиболее вероятны. На рис. 7 для пояснения показано поведение отдельных компонентов МОС.

Основной критерий эффективности той или иной меры снижения колебаний — рост абсолютного значения суммарного коэффициента передачи МОС $k_T = \sum_{j=1}^3 k_{Tj}$. Экспериментально показано, что изменение коэффициента МОС в процессе работы реактора ИБР-2М имеет сложную структуру [1, 2, 12, 18]. Основной частью этой структуры является накопительный компонент, который увеличивается с энерговыработкой и мощностью реактора [1, 2]. Динамика ИБР-2М при частоте повторения импульсов 10 Гц рассматривается в рамках действия этого накопительного компонента неустойчивости.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИБР-2М ПРИ ЧАСТОТЕ 5 И 10 Гц

Первое, что необходимо знать при переходе на другую частоту работы реактора, — это ответ на вопрос: что изменится в базовых (исходных) параметрах реактора? Во-первых, при равной средней мощности изменится величина энергии импульса, во-вторых, изменится значение критической частоты Найквиста (увеличится вдвое: с 2,5 до 5 Гц при переходе на частоту 10 Гц). В блоке кинетики изменится значение импульсной доли запаздывающих нейтронов. Эта величина определяет также значения коэффициентов МОС в блоках обратной связи и автоматического регулирования мощности [12, 19]. Коэффициенты передачи МОС выражаются через $\beta_n/\text{МВт}$. Кроме того, необходим соответствующий перерасчет коэффициентов МОС в зависимости от средней мощности и энерговыработки. Такого рода перерасчет выполняется непосредственно в рамках модели динамики реактора для каждой компоненты МОС в соответствии с принятой в данной работе физической концепцией МОС. Постоянные времени действия отдельных компонентов МОС при переходе на повышенную частоту сохраняются (сама а.з. не меняется). Все исходные экспериментальные данные по параметрам МОС для реактора ИБР-2М при энерговыработке до 1820 МВт \times сут, полученные в 2021 г., представлены на рис. 8 и в табл. 2. В табл. 3 приведены расчетные значения коэффициентов МОС для ИБР-2М при мощности 2 МВт и частоте 10 Гц для разных значений импульсной доли запаздывающих нейтронов. При этом использовались следующие значения постоянных времени трех компонентов МОС: $T_{T_1} = 7,6$ с, $T_{T_2} = 1,3$ с и $T_{T_3} = 0,3$ с.

Коэффициент обратной связи и ход импульсной характеристики ИБР-2М, как сказано выше, существенно зависят от энерговыработки

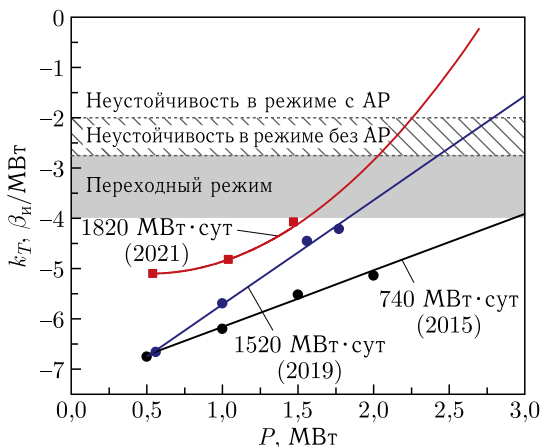


Рис. 8. Границы устойчивости ИБР-2М в зависимости полного коэффициента МОС от мощности реактора при некоторых значениях энерговыработки. АР — автоматическое регулирование

Таблица 2. Экспериментальные значения параметров быстрой МОС для ИБР-2М при энерговыработке 1820 МВт·сут и расходе теплоносителя через активную зону 100 м³/ч (2021 г.)

P^0 , МВт	Параметр	j			$k_T = \sum k_{Tj},$ $\beta_u/\text{МВт}$
		1	2	3	
0,54	$k_{Tj}, \beta_u/\text{МВт}$	-5,10	—	—	-5,10
	T_{Tj} , с	6,65	—	—	
1,04	$k_{Tj}, \beta_u/\text{МВт}$	-4,82	—	—	-4,82
	T_{Tj} , с	7,60	—	—	
1,47	$k_{Tj}, \beta_u/\text{МВт}$	-4,54	0,74	-0,28	-4,07
	T_{Tj} , с	9,44	1,31	0,29	

Таблица 3. Расчетные значения коэффициентов передачи МОС для ИБР-2М при энерговыработке 1820 МВт·сут и расходе теплоносителя через активную зону 100 м³/ч при частоте импульсов $f_u = 10$ Гц и средней мощности 2 МВт для разных значений β_u

$\beta_u, 10^{-4}$	$k_{T1},$ $\beta_u/\text{МВт}$	$k_{T2},$ $\beta_u/\text{МВт}$	$k_{T3},$ $\beta_u/\text{МВт}$	$k_T = \sum k_{Tj},$ $\beta_u/\text{МВт}$
1,00	-8,01	0,78	-0,31	-7,54
1,54	-5,10	0,50	-0,20	-4,80
2,00	-4,00	0,39	-0,16	-3,76
2,50	-3,20	0,31	-0,13	-3,01
3,00	-2,67	0,26	-0,10	-2,51
3,50	-2,29	0,22	-0,09	-2,15
4,00	-2,00	0,20	-0,08	-1,88

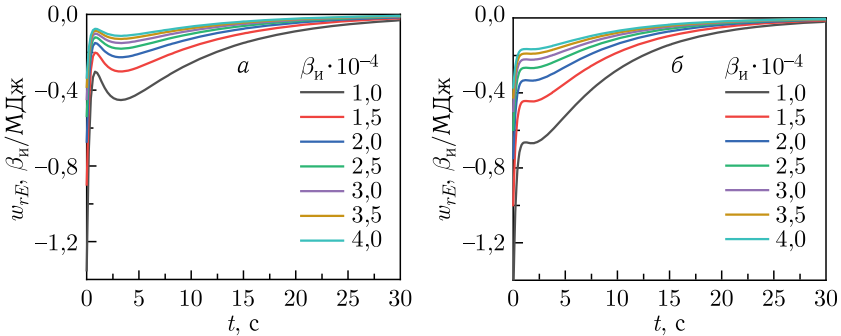


Рис. 9. Импульсные характеристики МОС ИБР-2М при энерговыработке 1820 МВт·сут и некоторых значениях β_{in} для частоты повторения импульсов 5 Гц и средней мощности 1,5 МВт (а), частоты 10 Гц и средней мощности 2 МВт (б). Красная линия соответствует значению $\beta_{in} = 1,54 \cdot 10^{-4}$, измеренному на ИБР-2М

и уровня средней мощности [1, 12, 18]. На рис. 9 приведены расчетные импульсные характеристики МОС ИБР-2М при некоторых значениях β_{in} для частоты 5 Гц и мощности 1,5 МВт (а) и частоты 10 Гц и мощности 2 МВт (б). Как видно из рис. 9, импульсные характеристики существенно зависят от частоты повторения импульсов. Также видно, что глубина обратной связи в режиме 10 Гц значительно больше, чем в режиме 5 Гц, т. е. реактор при 10 Гц имеет более отрицательную МОС и должен быть более устойчивым.

Другим, более наглядным показателем устойчивости или неустойчивости реактора может служить вид амплитудно-частотной характеристики реактора (АЧХ), а также величина ее резонансных пиков в зависимости от значения β_{in} . Так, на рис. 10 показаны АЧХ ИБР-2М при частоте импульсов $f_{in} = 10$ Гц и мощности 2 МВт в режиме автоматического регулирования

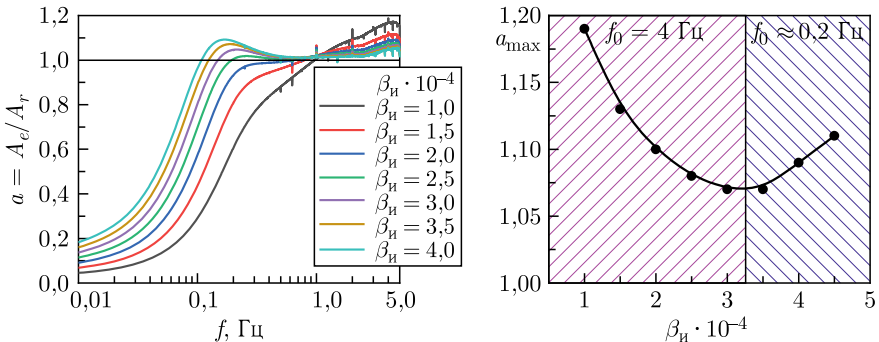


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики ИБР-2М при частоте импульсов $f_{in} = 10$ Гц и мощности 2 МВт в режиме автоматического регулирования мощности (а) и пик АЧХ (б) при разных значениях β_{in} . Энерговыработка 1820 МВт·сут (2021 г.). Красная линия соответствует значению $\beta_{in} = 1,54 \cdot 10^{-4}$, измеренному на ИБР-2М; f_0 — частота резонанса

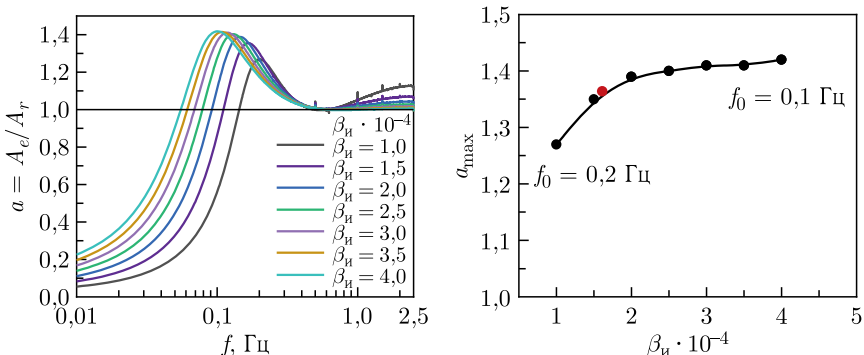


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики ИБР-2М при частоте импульсов $f_{и} = 5$ Гц и мощности 1,5 МВт в режиме автоматического регулирования (а) и пик АЧХ ИБР-2М (б) при разных значениях $\beta_{и}$. Энерговыработка 1820 МВт · сут (2021 г.). Красная точка соответствует значению $\beta_{и} = 1,54 \cdot 10^{-4}$, измеренному на ИБР-2М

мощности и пик АЧХ при разных значениях $\beta_{и}$. На рис. 10 по оси ординат приведены значения относительного изменения амплитуды колебаний энергии импульсов при воздействии колебаний реактивности единичной амплитуды на частотах вплоть до критической частоты Найквиста, равной 5 Гц. В таком представлении значения АЧХ выше единицы могут служить мерой колебательности или, другими словами, мерой величины резонансного пика.

При тех же условиях, но в режиме частоты 5 Гц и мощности 1,5 МВт (больше не имеет смысла по соображению устойчивости реактора) увеличение $\beta_{и}$, как видно из рис. 11, только усиливает колебательность, хотя и ненамного. Таким образом, увеличивать $\beta_{и}$ для повышения устойчивости реактора в режиме 5 Гц не имеет смысла.

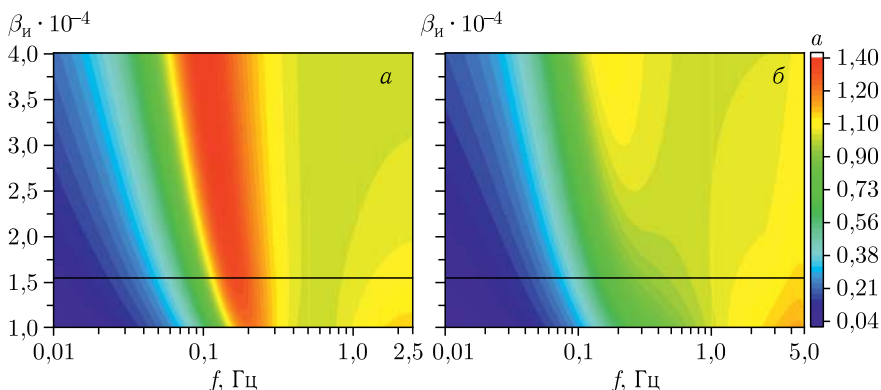


Рис. 12. Картограмма АЧХ ИБР-2М в режиме автоматического регулирования при частоте 5 Гц и средней мощности 1,5 МВт (а), частоте 10 Гц и мощности 2 МВт (б)

На рис. 12 приведены картограммы АЧХ в зависимости от частоты колебаний энергии импульсов и значения импульсной доли запаздывающих нейтронов при частоте повторения импульсов 5 и 10 Гц. Из рис. 12 видно, что в частотном интервале колебаний энергии импульсов 0,05–0,25 Гц пик АЧХ при частоте повторения импульсов 10 Гц намного ниже, чем при 5 Гц (более 30%). Также отметим, что при изменении β_n в колебаниях энергии импульсов появляется новый диапазон резонансных частот: для частоты повторения импульсов 5 Гц — в области 1,2–2,5 Гц, а для 10 Гц — в области 1,2–5,0 Гц.

ВЫВОДЫ

Получены результаты математического моделирования динамики реактора ИБР-2М при частоте повторения импульсов мощности 5 и 10 Гц. При моделировании исследовалось изменение АЧХ реактора с изменением импульсной доли запаздывающих нейтронов. Использовался набор параметров МОС, измеренных на реакторе ИБР-2М при энерговыработке 1820 МВт·сут в 2021 г. В результате показано, что частотные характеристики реактора и амплитуда колебаний (резонансов) энергии импульсов существенно зависят от величины импульсной доли запаздывающих нейтронов. При этом в зависимости от частоты повторения импульсов может быть реализован как рост, так и снижение колебаний мощности реактора в интервале частот 0,05–0,20 Гц и на частотах, близких к критической частоте Найквиста. При переходе реактора из режима 5 Гц в режим 10 Гц частотные характеристики реактора улучшаются, поэтому можно надеяться на ослабление в этом режиме колебаний.

Авторы выражают благодарность А. К. Попову за внимание к работе и полезные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Rogov A. D.* On the Limits of Oscillatory Instability of Pulsed Reactors of Periodic Operation // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84. P. 1445–1458.
2. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* О циклическом изменении динамики импульсного реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2021-11. Дубна, 2021.
3. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* Optimization of Automatic Power Control of Pulsed Reactor IBR-2M in the Presence of Instability // *Nucl. Eng. Technol.* 2022. V. 54. P. 2877–2882.
4. *Dragunov Yu. G., Tretiyakov I. T., Lopatkin A. V. et al.* Modernization of the IBR-2 Pulsed Research Reactor // *Energy.* 2012. V. 113. P. 29–38. <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9591-9>.
5. *Бондаренко И. И., Стависский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // *АЭ.* 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
6. *Блохин Г. Е., Блохинцев Д. И., Блохина Ю. А. и др.* Импульсный реактор на быстрых нейтронах // *АЭ.* 1961. Т. 10, вып. 5. С. 437–446.
7. *Raievski V.* The SORA Reactor. Report EUR-1643. 1964. P. 51–84.

8. *Larrimore J. A.* Physics of Periodically Pulsed Reactors and Boosters: Steady-State Conditions, Power Pulse Characteristics, and Kinetics // *Nucl. Sci. Eng.* V. 29, No. 1. P. 87–110; doi: 10.13182/NSE67-A17812.
9. *Arhan R.* SORA Dynamics and Control System Studies Using Mean-Value Neutron Kinetics Equations. EUR-4408. 1970.
10. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
11. *Попов А. К.* Основы управления ядерным реактором. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.
12. *Сумхуу Д.* Исследование мощностной обратной связи и ее влияния на устойчивость импульсного реактора ИБР-2: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна, 2019.
13. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // *Ann. Nucl. Energy.* 2015. V. 85. P. 488–493.
14. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Sangaa D.* Dynamics Model of the IBR-2M Pulsed Reactor for Analysis of Fast Transition Processes // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12. P. 435–438.
15. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов: Пер. с англ. / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Атомиздат, 1967.
16. *Пепельшиев Ю. Н., Попов А. К.* Исследование эффектов реактивности подвижных отражателей ИБР-2 в динамике // *АЭ.* 2006. Т. 101, вып. 2. С. 98–103.
17. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.* Influence of the Nearest Environment of the Core on the Power Pulse Dynamics in the IBR-2 Reactor // *Ann. Nucl. Energy.* 2006. V. 33, iss. 9. P. 813–819; <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.04.002>.
18. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* IBR-2M Reactor Power Feedback Parameters Evaluation Using Square Reactivity Oscillations // *At. Energy.* 2017. V. 122. P. 75–80.
19. *Marachev A. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Analysis of Dynamics of the IBR-2M Reactor with Statistically Optimal Automatic Regulator // *Ibid.* V. 123, iss. 3. P. 172–175.

Получено 2 декабря 2022 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 09.01.2023.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,94. Тираж 125 экз. Заказ № 60566.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/