

P13-2026-22

В. Н. Верхоглядова, А. Е. Верхоглядов,  
Е. П. Шабалин

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ  
МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ  
РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Направлено в журнал «Известия высших учебных заведений.  
Ядерная энергетика»

Верхоглядова В. Н., Верхоглядов А. Е., Шабалин Е. П.

P13-2026-22

Трехкомпонентная модель мощностной обратной связи реактора ИБР-2М

Предлагается модель мощностной обратной связи пульсирующего реактора ИБР-2М, построенная в терминах теории автоматического управления на основе трех известных физических эффектов обратной связи. Из дифференциальных уравнений теплопроводности получена импульсная переходная характеристика обратной связи. Расчеты динамики реактора ИБР-2М по предлагаемой модели согласуются с экспериментальными данными. Обсуждаются перспективы применения модели для анализа динамики пульсирующего реактора.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2026

Verhoglyadova V. N., Verhoglyadov A. E., Shabalin E. P.

P13-2026-22

Three-Component Model of the Power Feedback of the IBR-2M Reactor

The paper proposes a model of power feedback of the pulsed reactor IBR-2M, constructed in terms of automatic control theory based on three known physical feedback effects. From the differential equations of thermal conductivity, the impulse transition characteristic of feedback is obtained. The model calculations of IBR-2M dynamics correspond to experimental data. The prospects of application of the model for analysis of the dynamics of the pulsed reactor are discussed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2026

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ОИЯИ (Дубна, Россия) работает уникальный по принципу действия и по конструкции импульсный реактор периодического действия на быстрых нейтронах ИБР-2М, являющийся модернизированной версией реактора ИБР-2, который работал в Дубне с 1980-х гг. ИБР-2М, как и его предшественник, используется в качестве источника нейтронов для исследований на выведенных пучках в области физики твердого тела, ядерных исследований, облучения материалов.

Для безопасной и надежной эксплуатации существующего реактора, а также для проектирования нового источника нейтронов нужна достаточно развитая модель динамики реактора. Обратные связи, возникающие при изменении каких-либо параметров, играют важную роль в импульсном реакторе периодического действия (ИРПД), в котором эти изменения происходят каждый импульс. Метод описания мощностной обратной связи (МОС) в ИРПД требует тщательного исследования.

В настоящее время существуют разные подходы к построению модели МОС ИРПД. Существует модель динамики реактора, построенная в терминах теории автоматического управления (ТАУ) [1], в которой МОС представлена как феноменологическая зависимость. Параметры этой модели вычисляются из экспериментально полученных величин. Достоинством этой модели является ее опора на развитую теорию, в которой имеются готовые решения для исследования устойчивости реактора. Кроме того, некоторые органы управления реактором разработаны на основе ТАУ. Недостатком этой модели является отсутствие физических обоснований возникновения обратной связи, и, как следствие, область ее применения ограничена [2].

Описаны некоторые физические процессы, протекающие в активной зоне реактора и приводящие к возникновению обратной связи [3–5]. Эти процессы рассмотрены как независимые, и их вклад в реактивность обратной связи для реактора в полной геометрии активной зоны (а.з.) пока не определен.

Целью данной работы является построение модели быстрой (до 30 с) МОС ИРПД в терминах теории автоматического управления с использованием известных физических процессов, являющихся источником реактивности обратной связи.

Для достижения поставленной цели построена блок-схема МОС на основе трех описанных физических процессов: расширения топлива, изгиба тепловыделяющей сборки (ТВС), расширения верхней части а.з. Для каждого звена блок-схемы записаны уравнения, описывающие соответствующую

ший данному звену процесс. Получены передаточные функции для каждого звена и импульсная переходная характеристика для всей блок-схемы.

Результаты модельного расчета переходного процесса сравниваются с результатами соответствующего эксперимента на реакторе ИБР-2М. Делается вывод о перспективах дальнейшего развития модели и ее применимости в анализе динамики реактора.

## УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ИБР-2М

Активная зона реактора ИБР-2М, при полной загрузке содержащая 69 ТВС, охлаждается жидким теплоносителем — натрием, который прокачивается снизу вверх. Каждая ТВС содержит семь твэлов (рис. 1) [4].

Активная зона реактора имеет форму усеченной шестигранной призмы, окруженной стационарным отражателем со стороны пяти граней. Мимо шестой грани вращаются лопасти модулятора реактивности (рис. 2).

Во время небольшого промежутка времени ( $\sim 400$  мкс), когда мимо а. з. проходят обе лопасти подвижного отражателя, создается положительная реактивность и происходит стремительный рост мощности. Когда подвижные отражатели отходят от а. з., реактивность резко уменьшается, реактор

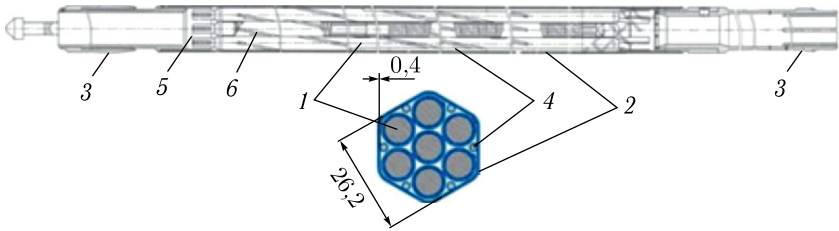


Рис. 1. Эскиз ТВС в продольном (сверху) и поперечном (снизу) разрезе: 1 — твэл; 2 — стенка ТВС; 3 — цанговые лепестки; 4 — вытеснитель; 5 — опорная решетка; 6 — дистанцирующая проволока

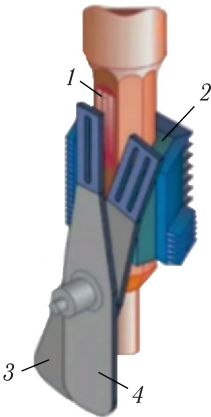


Рис. 2. Схема реактора ИБР-2М: 1 — активная зона; 2 — стационарный отражатель; 3 — основной подвижный отражатель; 4 — дополнительный подвижный отражатель

становится глубоко подкритичным, мощность реактора падает до минимального фонового значения. Данные процессы происходят каждые 0,2 с. Топливо за один импульс нагревается на 18 К. Такое изменение температуры вызывает обратные связи по реактивности вследствие аксиального расширения таблеток, изгибов ТВС при теплопередаче, а также временного расширения верхней части а. з.

Рассматриваемой в данной работе физической величиной, изменение которой приводит к появлению обратных связей, является температура. Так как температура а. з. не измеряется и экспериментально регистрируемой величиной является мощность реактора, принято изучаемую обратную связь называть МОС.

## БЛОК-СХЕМА МОДЕЛИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ МОС ИРПД

Обратные связи возникают во время изменения каких-либо физических параметров реактора. В реакторах типа ИРПД изменения происходят каждый импульс, поэтому обратные связи оказывают существенное влияние на их динамику.

Построенная модель отражает процессы, возникающие после одиночного импульса мощности. В реакторе ИБР-2М импульс мощности имеет вид узкого пика, амплитуда которого почти на четыре порядка больше мощности реактора между импульсами, поэтому импульс мощности можно представить в виде произведения  $\delta(t)$ -функции и коэффициента, учитывающего амплитуду.

Мощность реактора и температура всех элементов до начального момента времени считается нулевой, т. е. точкой отсчета. Таким образом, рассматриваются не абсолютные значения физических величин (температура, реактивность), а их изменения.

В начальный момент времени ( $t = 0$ ) возникает импульс мощности, и происходит мгновенный нагрев топливных таблеток. От повышения температуры таблетки деформируются, в результате чего изменяется реактивность а. з. [3]. Этот процесс на блок-схеме (рис. 3) обозначен звеном деформации топливных таблеток  $T_1$  и в первом приближении описывается уравнением

$$\frac{1}{C}P(t) = \frac{dT_1(t)}{dt} + \Lambda_1 T_1(t), \quad (1)$$

где  $T_1(t)$  — изменение температуры топлива (К);  $P(t)$  — мгновенная мощность энерговыделения топлива (Вт);  $\Lambda_1$  — эффективная температуропроводность системы топливо-натрий ( $\text{с}^{-1}$ );  $C$  — теплоемкость системы топливо-натрий (Дж/К). Считается, что деформация топлива прямо пропорциональна его температуре [3].

Уравнение (1) соответствует аperiodическому звену в терминах ТАУ, передаточная функция которого выглядит следующим образом:

$$W_{T_1}(s) = \frac{1}{C(s + \Lambda_1)}.$$

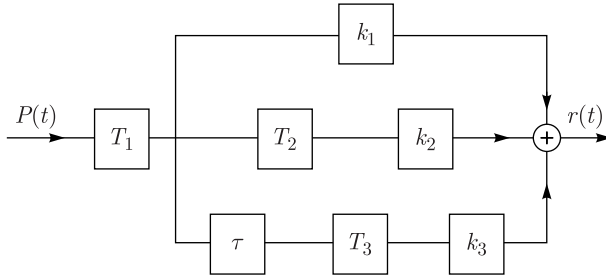


Рис. 3. Блок-схема модели МОС:  $P(t)$  — мгновенная мощность энерговыделения топлива;  $r(t)$  — изменение реактивности МОС;  $T_1$  — звено деформации таблетки;  $T_2$  — звено деформации стенки ТВС;  $T_3$  — звено расширения верхней части а.з.;  $\tau$  — звено запаздывания;  $k_1$ – $k_3$  — звенья перевода деформаций в реактивность соответственно

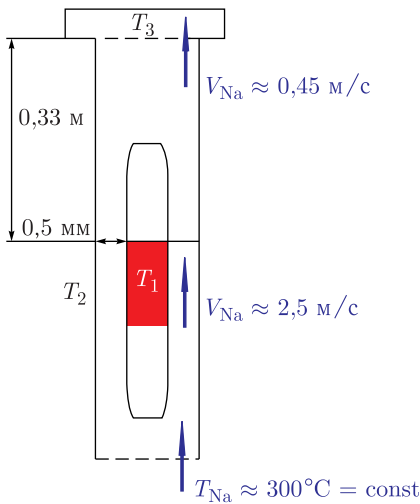


Рис. 4. Схема, описывающая процесс расширения верхней части а.з.

Считается, что натрий мгновенно передает тепло от стенок твэлов, в которых находятся таблетки с топливом, стенкам ТВС из-за узких зазоров между этими стенками (рис. 4). Нагреваясь, топливо неравномерно нагревает стенки ТВС, так как существует градиент температур в а.з. Стенка, находящаяся ближе к центру, нагревается сильнее, чем стенка, более удаленная от центра. Из-за разности температур ТВС изгибается, внося свой вклад в реактивность а.з. [5]. Этот процесс обозначен на блок-схеме звеном деформации ТВС  $T_2$ . На вход этого звена подается температура топлива  $T_1(t)$ . На выходе мы получаем температуру стенки ТВС, которая прямо пропорциональна деформации стенок:

$$T_1(t) = \frac{1}{B_2} \frac{dT_2(t)}{dt} + \frac{\Lambda_2}{B_2} T_2(t), \quad (2)$$

где  $T_2(t)$  — изменение температуры стенки ТВС (К);  $\Lambda_2$  — эффективная температуропроводность системы натрий–стенка ТВС ( $\text{с}^{-1}$ ),  $B_2$  — эффективный коэффициент теплопередачи системы натрий–стенка ТВС ( $\text{с}^{-1}$ ).

Уравнение (2) соответствует аperiodическому звену в терминах ТАУ, передаточная функция которого выглядит следующим образом:

$$W_{T_2}(s) = \frac{B_2}{s + \Lambda_2}.$$

Скорость потока натрия в а. з. такова, что его температура распределена неравномерно во времени и пространстве. Так, в момент импульса слой натрия в области топливных таблеток испытывает наибольший нагрев. Далее этот горячий слой движется вверх и через время  $\tau = 0,7$  с достигает верхней части корпуса и хвостовиков ТВС (см. рис. 4). Это вызывает деформацию верхней части а. з. и соответствующее изменение реактивности. Процесс происходит периодически. Как показывают расчеты [4], подогрев натрия за время импульса составляет до 2 К относительно температуры натрия, прошедшего через а. з. вне импульса. Другими словами, температура (и деформация) верхней части а. з. меняется с частотой пульсаций реактора и сдвинута по времени на  $\tau$  относительно времени начала импульса.

Процесс расширения а. з. на блок-схеме (см. рис. 3) обозначен  $T_3$ . Так как он происходит позже, чем первые два процесса, то, чтобы учесть этот сдвиг, введено звено запаздывания, обозначенное  $\tau$  на блок-схеме.

На вход звена запаздывания подается температура топлива  $T_1(t)$  в момент времени  $t$ , на выходе получается температура топлива, сдвинутая по времени  $T_1(t + \tau)$ . Передаточная функция звена запаздывания  $W_\tau(s) = e^{-s\tau}$ .

На вход звена, описывающего расширение зоны  $T_3$ , подается температура топлива  $T_1(t + \tau)$ , сдвинутая по времени. На выходе мы получаем температуру верхней части а. з.:

$$T_1(t + \tau) = \frac{1}{B_3} \frac{dT_3(t)}{dt} + \frac{\Lambda_3}{B_3} T_3(t), \quad (3)$$

где  $\Lambda_3$  — эффективная температуропроводность системы натрия — верхняя часть а. з. ( $c^{-1}$ );  $B_3$  — эффективный коэффициент теплопередачи системы натрия — верхняя часть а. з. ( $c^{-1}$ ).

Уравнение (3) соответствует аperiodическому звену в терминах ТАУ, и его передаточная функция имеет вид

$$W_{T_3}(s) = \frac{B_3}{(s + \tau) + \Lambda_3}.$$

Считается, что деформации линейно связаны с изменением реактивности. Это отражено на блок-схеме рис. 3 звеньями  $k_1$ – $k_3$ , которые связывают изменения реактивности с изменением температуры топлива, стенки ТВС, верхней части а. з. соответственно. Звенья  $k_1$ – $k_3$  являются пропорциональными звеньями. На вход каждого из них подается изменение температуры, на выходе — доля реактивности. Передаточные функции этих звеньев:  $W_{k_1}(s) = k_1$ ,  $W_{k_2}(s) = k_2$ ,  $W_{k_3}(s) = k_3$ .

Реактивность МОС ИРПД является суммой трех компонент: доли реактивности по деформации топлива, доли реактивности по изгибу ТВС, доли реактивности по расширению верхней части а. з. Передаточная функция всей модели

$$W(s) = \frac{k_1}{C(s + \Lambda_1)} + \frac{k_2 B_2}{(s + \Lambda_1)(s + \Lambda_2)} + \frac{k_3 B_3 e^{-s\tau}}{(s + \Lambda_1)(s + \Lambda_3)}.$$

Данную функцию можно использовать для исследования устойчивости реактора, а также для вычисления импульсной переходной характеристики модели МОС. Последнее, однако, удобнее делать путем решения уравнений (1)–(3) вследствие особенностей передаточной функции всей модели. Импульсная переходная характеристика  $r_{\text{imp}}(t)$ , т.е. изменение реактивности обратной связи после одиночного импульса мощности в виде дельта-функции, вычисляется ниже.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Уравнения (1)–(3) составляют систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Для вычисления импульсной переходной характеристики запишем ее в виде

$$\begin{cases} \frac{dT_1(t)}{dt} = -\Lambda_1 T_1(t), \\ \frac{dT_2(t)}{dt} = B_2 T_1(t) - \Lambda_2 T_2(t), \\ \frac{dT_3(t)}{dt} = B_3 T_1(t - \tau) - \Lambda_3 T_3(t). \end{cases}$$

Начальные условия, соответствующие одиночному  $\delta$ -импульсу:  $T_1(0) = 1$ ;  $T_2(0) = 0$ ;  $T_3(t \leq \tau) = 0$ ;  $P(t > 0) = 0$ .

Решение системы:

$$\begin{cases} T_1(t) = e^{-\Lambda_1 t}, & (4) \\ T_2(t) = -\frac{B_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_2 t} + \frac{B_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_1 t}, & (5) \\ T_3(t) = -\frac{B_3}{\Lambda_3 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_3(t-\tau)} + \frac{B_3}{\Lambda_3 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_1(t-\tau)}. & (6) \end{cases}$$

Соответственно, импульсная переходная характеристика выглядит следующим образом:

$$r_{\text{imp}}(t) = \left( k_1 + \frac{k_2 B_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} + \frac{k_3 B_3}{\Lambda_3 - \Lambda_1} e^{\Lambda_1 \tau} \right) e^{-\Lambda_1 t} - \frac{k_2 B_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_2 t} - \frac{k_3 B_3}{\Lambda_3 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_3(t-\tau)}.$$

Для определения параметров  $\Lambda_i$ ,  $B_i$  были использованы безразмерные температуры  $\theta_i(t)$  топлива, стенки ТВС и верхней части а. з., рассчитанные численно методом конечных элементов в полной геометрии ТВС ИБР-2М (рис. 5.) [4].

Сначала из вида решения  $T_1(t)$  (4) и кривой  $\theta_1(t)$  методом наименьших квадратов был найден коэффициент  $\Lambda_1$ . После этого путем сопоставления

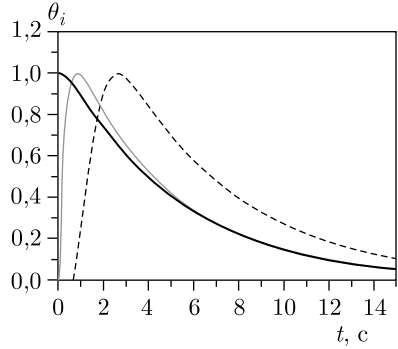


Рис. 5. Графики безразмерных температур топлива  $\theta_1(t)$  (толстая кривая), стенки ТВС  $\theta_2(t)$  (тонкая кривая) и верхней части а.з.  $\theta_3(t)$  (штриховая)

вида решения  $T_2(t)$  с  $\theta_2(t)$  и  $T_3(t)$  с  $\theta_3(t)$  соответственно найдены  $\Lambda_2, \Lambda_3, B_2, B_3$ . Значения коэффициентов:

$$\Lambda_1 = 0,2 \text{ с}^{-1}, \quad \Lambda_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}, \quad \Lambda_3 = 1,2 \text{ с}^{-1}, \quad B_2 = 4,2 \text{ с}^{-1}, \quad B_3 = 1,7 \text{ с}^{-1}.$$

Расчеты подтверждают значение  $\tau = 0,7 \text{ с}$ , ранее полученное из расстояния от верхней части столба таблеток до верхней части а.з. и скорости натрия в этой части а.з. (см. рис. 4).

Коэффициенты пропорциональности температуры и реактивности  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) получены в результате сопоставления результатов модельного расчета и физического эксперимента (рис. 6). Модельная кривая получена с использованием модели ИРПД [6], в которой блок МОС заменен рассмотренной в данной работе трехкомпонентной моделью МОС. Экспериментальная кривая получена в результате проведенного 13.10.2021 г. на реакторе ИБР-2М эксперимента, методика которого описана в работе [7]. Эксперимент длился два часа. Каждая точка получена усреднением 97 экспериментально зафиксированных значений с относительным среднеквадратичным отклонением среднего  $\sigma_{\overline{Q}_n} = 0,092$ .

Наилучшее совпадение результатов получено при следующих значениях  $k_i$ :

$$k_1 = -1,25 \frac{\beta_{и}}{\text{МДж}}; \quad k_2 = 0,9 \frac{\beta_{и}}{\text{МДж}}; \quad k_3 = -0,2 \frac{\beta_{и}}{\text{МДж}}.$$

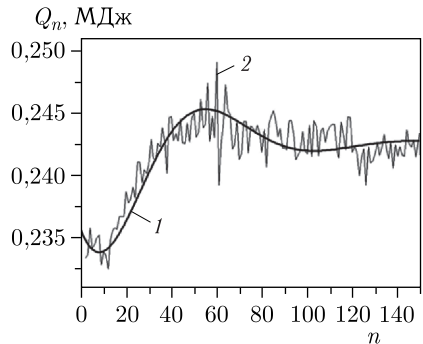


Рис. 6. Графики энергии импульса  $Q_n$ , полученные в результате модельного расчета (1) и эксперимента (2).  $n$  — порядковый номер импульса

## ВЫВОДЫ

Построенная в данной работе трехкомпонентная модель МОС достаточно точно описывает результаты измерений, несмотря на сильно упрощенный вид уравнений физических процессов, положенных в ее основу. Найденные коэффициенты  $k_i$  верно передают характер изменения реактивности: изгиб ТВС приводит к увеличению реактивности ( $k_2 > 0$ ), а два других эффекта — к ее уменьшению ( $k_1 < 0$ ;  $k_3 < 0$ ). Значения коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  соответствуют значениям, найденным ранее в нейтронно-физических расчетах процессов деформации топлива [3] и ТВС [5]. Впервые получена оценка эффекта расширения верхней части а.з., т.е. вычислен коэффициент  $k_3$ .

Показано, что формализм ТАУ может быть использован для описания термоупругих процессов в а.з. ИРПД. Предлагаемая модель МОС более предпочтительна по сравнению с используемой ранее [1, 2, 7] по нескольким причинам. Во-первых, все элементы модели (звенья блок-схемы) имеют физическую интерпретацию. Во-вторых, коэффициенты  $k_i$  могут быть найдены с помощью нейтронно-физических расчетов, после чего сопоставлены с результатами измерений. В-третьих, модель позволяет включить новые эффекты реактивности и повысить качество описания МОС.

Для дальнейшего развития модели требуются детальные расчеты эффектов реактивности методом Монте-Карло в полной геометрии реактора, а также дополнительные экспериментальные данные для верификации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов А. К. Основы управления ядерным реактором. М.: МГУ, 2012.
2. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д. Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М с учетом температурных и мощностных эффектов быстрой обратной связи // Физика ядерных реакторов. 2020. № 3. С. 28.
3. Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Вдовин Я. А., Кушницр И. В. Уточненный расчет температурного эффекта реактивности пульсирующего реактора // Инженерная и техническая физика. 2026. № 2. С. 3–9.
4. Верхоглядов А. Е., Кушницр И. В. Численные расчеты поперечного изгиба ТВС в реакторе ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2025-19. Дубна, 2025.
5. Подлесный М. М., Шабалин Е. П., Вдовин Я. А., Кушницр И. В., Верхоглядов А. Е. Изгиб тепловыделяющих сборок в реакторе ИБР-2М и их влияние на реактивность. Препринт ОИЯИ Р13-2025-54. Дубна, 2025.
6. Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Шабалин Е. П. Математическая модель импульсного реактора периодического действия // Атомная энергия. 2025. Т. 138, № 1–2. С. 10–17.
7. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д. Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // Атомная энергия. 2017. Т. 122, № 2. С. 63–67.

Получено 8 апреля 2026 г.

Редактор *А. И. Семенова*

Подписано в печать 24.04.2026.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 110 экз. Заказ № 61301.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)  
[publish.jinr.ru](http://publish.jinr.ru)