

P13-2009-43

Ю. Н. Пепельшев, Чжан Чан Мин

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАДИАЦИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ НА РЕАКТИВНОСТЬ **ИБР-2**

С использованием программы SCALE-4 проведен расчетный анализ влияния температуры радиационной защиты на реактивность мощностной обратной связи ИБР-2. Показано, что в процессе работы реактора ИБР-2 радиационный нагрев биологической защиты с постоянной времени  $\sim 92$  ч вызывает уменьшение влажности бетона. Этот процесс приводит к ужесточению спектра нейтронов в биологической защите и, соответственно, в токе обратного рассеяния нейтронов в активную зону, в результате чего эффективный коэффициент размножения нейтронов уменьшается. Указанный процесс определяет реакцию медленных компонентов мощностной обратной связи на изменение мощности.

Значение асимптотического уменьшения реактивности, вызванное нагревом радиационной защиты, линейно растет с мощностью и соответствует  $0,04\beta_{эф}$  на мощности 2 МВт.

Полное расчетное изменение реактивности составляет только 17% от наблюдаемого значения. Поэтому можно считать, что причина медленного изменения реактивности обратной связи не ограничивается только обезвоживанием радиационной защиты, но обусловлена и другими процессами в реакторе.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

The influence of temperature of the radiation shield on the power feedback effects of reactivity in the pulsed periodic fast reactor IBR-2 by the nuclear program SCALE-4 has been analysed. It has been shown that the radiation heating of the biological shield with a time constant of  $\sim 90$  hours brings about moisture reduction of concrete shield during the operation of the reactor. This leads to the spectral hardness of reflected neutrons, consequently, the effective multiplication factor is decreased. These processes describe behaviour of the slow negative component of the power feedback during power change.

The asymptotic reactivity decreases due to the radiation shield heating increase proportionally with the power of reactor and is  $0.04\beta_{eff}$  at power of 2 MW. Total calculated reactivity decrease is only 17% of the observed values. This implies that not only radiation heating of the biological shield brings about the reactivity decreases, but also other reasons of the slow negative component of the power feedback during the power change probably exist.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

После вывода реактора ИБР-2 на мощность наблюдается отрицательный компонент мощностной обратной связи с постоянной времени  $\sim 92$  ч. Анализ многочисленных данных, полученных в ходе эксплуатации реактора с 1984 по 2006 г., показал, что асимптотическое значение этого компонента реактивности довольно велико и увеличивается с ростом мощности. На номинальной мощности 2,0 МВт изменение реактивности составляет  $\sim 0,4\beta_{эф}$  ( $\sim 0,09\% \Delta K/K$ ), где  $K$  — эффективный коэффициент размножения.

Постоянная времени наблюдаемого эффекта близка к постоянной времени тепловой инерционности радиационной бетонной защиты реактора. Поэтому считается, что, вероятнее всего, это явление как-то связано с радиационным нагревом защиты. С другой стороны, природа этого эффекта не совсем понятна, и прямых доказательств влияния радиационной защиты на изменение реактивности нет [1, 2]. Поскольку наблюдаемый эффект довольно велик, он существенно влияет на управление реактором и, соответственно, на степень его надежной и безопасной эксплуатации.

Цель исследований состояла в получении расчетных оценок связи этого эффекта с радиационной защитой ИБР-2.

## 1. МЕТОД РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Один из возможных механизмов изменения реактивности со стороны радиационной защиты реактора можно представить следующим образом: внутренняя часть бетонной защиты (ближе к реактору) в процессе радиационного разогрева после вывода реактора на мощность теряет часть химически связанной и несвязанной воды. При этом защитные свойства бетона ухудшаются. С точки зрения нейтронно-физических свойств защиты, изменение концентрации воды приводит к изменению спектра нейтронов в защите и,

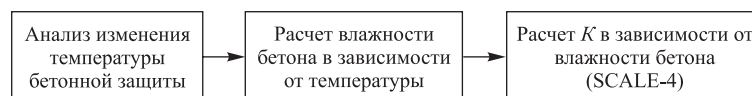


Рис. 1. Схема расчета изменения реактивности при нагреве бетонной радиационной защиты

соответственно, к изменению нейтронов альbedo из защиты в активную зону. В итоге изменение температуры бетона вызывает изменение реактивности, которое можно оценить в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.

**Изменение температуры радиационной защиты в процессе работы реактора.** После вывода реактора на мощность температура бетонной защиты с некоторой инерционностью приближается к ее асимптотическому значению. Ход изменения температуры, зарегистрированный в некоторых точках радиационной защиты в 2006 г. после вывода реактора на мощность 1,5 МВт, показан на рис. 2.

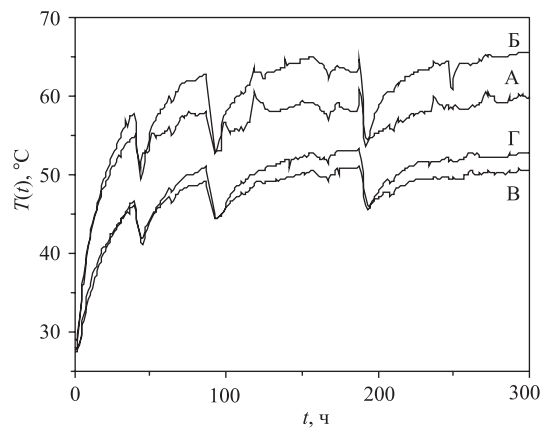


Рис. 2. Изменение температуры радиационной защиты ( $T$ ) от времени ( $t$ ) после выхода на мощность 1,5 МВт в некоторых точках А, Б, В, Г защиты. Провалы температуры связаны со снижением мощности

Из обработки данных следует, что после штатного подъема мощности температура защиты на расстоянии  $x$  от ее внутреннего радиуса изменяется следующим образом:

$$T(x) = T_0(x) + K(x) \cdot P[1 - \exp(-t/t_0)], \quad (1)$$

где  $T_0(x)$  — начальная температура бетона (при  $t = 0$ );  $K(x) \cdot P = T_\infty(x) - T_0(x)$ ;  $K(x)$  — коэффициент пропорциональности [ $^{\circ}\text{C}/\text{МВт}$ ];  $T_\infty(x)$  — асимптотическое значение температуры при мощности  $P$  [МВт] (при  $t = \infty$ );  $t_0 = 38$  ч — постоянная времени.

По установившимся значениям температуры, измеренной в различных точках радиационной защиты, можно получить стационарное распределение температуры по толщине защиты (рис. 3).

По функции, аппроксимирующей изменение температуры от толщины защиты, была получена средняя температура бетона в каждом участке расположения датчика. Асимптотические средние температуры в четырех слоях

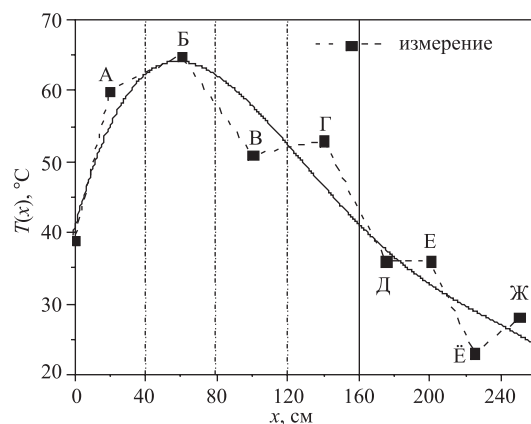


Рис. 3. Установившееся распределение температуры  $T(x)$  по толщине радиационной защиты  $x$  на мощности 1,5 МВт. Ось ординат отсчитывается от внутреннего радиуса защиты

**Таблица 1. Изменение температур в первых слоях радиационной защиты со стороны активной зоны**

Номер слоя	1	2	3	4
Наименование датчика температуры	А	Б	В	Г
Асимптотическая средняя температура $T_{\infty}(x)$ , °С	56	63	58	46
Коэффициент пропорциональности $K(x)$ , °С / МВт	19,3	24,7	20,7	12,7

первого блока радиационной защиты показаны в табл. 1. Используя коэффициенты пропорциональности для каждого слоя защиты, из соотношения (1) можно получить изменение температуры во времени при любой мощности реактора.

**Изменение влажности бетона в зависимости от температуры.** При нагревании бетона содержание в нем химически связанной и несвязанной воды уменьшается. Для различных видов цемента и наполнителей бетона характер изменения концентрации воды при изменении температуры бетона различен. Результаты измерения влажности различных бетонов в зависимости от температуры взяты из работы [3]. В расчетах использовались данные для серпентинитового бетона, состав которого наиболее близок к составу радиационной защиты ИБР-2. Влажность этого состава меняется от 0,30 г/см<sup>3</sup> при 24 °С до 0,12 г/см<sup>3</sup> при 100 °С. В этом температурном диапазоне изменение влажности бетона можно представить в виде

$$W(T) = W_0 + A_1 \exp(-T/T_1), \quad (2)$$

где  $W_0 = 0,102 \text{ г/см}^3$ ,  $A_1 = 0,417 \text{ г/см}^3$ ,  $T_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ . Из соотношения (2) можно определить отношение влажности бетона при температуре  $T$  к влажности при начальной температуре  $T_0$ , т. е. относительную влажность:

$$w(T) = W(T)/W(T_0). \quad (3)$$

В качестве начальной температуры взята температура радиационной защиты реактора нулевой мощности  $T_0 = 27^\circ\text{C}$ .

**Программа расчета реактивности и ядерные константы.** Для расчета реактивности использовался комплекс программ SCALE-4 с системой 27-групповых ядерных констант [4]. В комплексе программ SCALE-4 сначала были подготовлены ядерные константы для гомогенизированных тепло выделяющих элементов. На следующем этапе для коаксиальной геометрии реактора проводили одномерный транспортный расчет в Sn-приближении с модулем XSDRNPM. Основные 27-групповые константы использовались без группового усреднения, поскольку энергетические спектры нейтронов в каждой геометрической области реактора сильно различаются.

Поскольку область применения Sn-приближения в SCALE-4 ограничена только одномерной геометрией, активная зона реактора и ее окружение были приведены в эквивалентной цилиндрической форме по принципу сохранения эквивалентного объема. Характеристические данные областей ИБР-2, используемые в расчете реактивности, показаны в табл. 2 [5].

**Таблица 2. Основные характеристические данные для каждой из физических областей реактора ИБР-2, используемые в расчетах по программе SCALE-4**

Область	Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура, °C	Внешний радиус, см
Центральный канал	Na	0,87	320	3,6
Активная зона	TBC + Na	1,96	320	13,2
Корпус реактора	Нержав. сталь	7,9	300	13,9
Кожух корпуса	Нержав. сталь	7,9	300	14,5
Органы защиты и отражатели	W + нержав. сталь	12,2	150	22,5
Слой карбида бора	B <sub>4</sub> C	2,0	100	23,0
Замедлители	вода	1,0	80	30,1
Воздушный промежуток	воздух	0,0012	40	45,0
Тепловая защита	Fe + B <sub>4</sub> C	7,5	40	60,0
Радиационная защита 1	бетон	3,6	30~70	220,0
Радиационная защита 2	бетон	3,6	30	320,0

Для проверки правильности применения программы SCALE-4 к расчету ИБР-2 был проведен расчет тестового объекта, в качестве которого была выбрана плутониевая критическая сборка BR-1-3 [7]. Указанная сборка наи-

более близка к ИБР-2 по химическому составу топлива, геометрическим размерам твэлов и размерам активной зоны.

Дополнительно к программе SCALE-4 расчет тестового объекта проводился также по методу Монте-Карло по программе KENO. Расчетный эффективный коэффициент размножения сборки BR-1-3 по программе SCALE-4 (27-групповых ядерных констант)  $K = 1,0587$  оказался несколько выше значения, полученного по программе KENO (16-групповых ядерных констант)  $K = 1,0368 \pm 0,0009$ . Причина этого отличия могла быть связана с применением одномерной геометрии в программе KENO.

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

**Изменение реактивности в зависимости от температуры бетона.** Результаты расчета по изменению реактивности в зависимости от средней температуры бетона показаны на рис. 4. Основные расчетные и экспериментальные данные для установившихся состояний бетона (при асимптотических значениях температуры и влажности бетона) представлены в табл. 3.

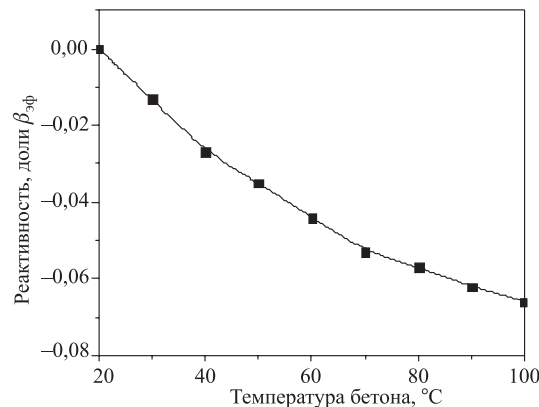


Рис. 4. Изменение реактивности в зависимости от температуры бетона радиационной защиты

Результаты расчета показали следующее. Изменение реактивности при изменении температуры радиационной защиты мало и составляет  $\sim 10\%$  от наблюдаемых экспериментальных значений. При этом расчет подтвердил экспериментально наблюдаемый факт, что скорость изменения реактивности уменьшается с ростом температуры бетона, а асимптотическое значение реактивности зависит от мощности реактора.

**Таблица 3. Расчетное и экспериментальное изменение реактивности для установившейся температуры и влажности радиационной бетонной защиты ИБР-2 на некоторых уровнях средней мощности**

Уровень мощности	1,0 МВт	1,5 МВт	2,0 МВт	$\infty$
Асимптотические средние температуры бетона $T$ , °С:				
слой-1	46,3	55,9	65,6	—
слой-2	51,7	64,1	76,4	—
слой-3	47,7	58,1	68,4	—
слой-4	39,7	46,1	52,4	—
Асимптотические значения относительной влажности бетона:				
слой-1	0,710	0,619	0,552	0,0
слой-2	0,656	0,562	0,498	0,0
слой-3	0,695	0,603	0,536	0,0
слой-4	0,790	0,712	0,649	0,0
Расчетное асимптотическое уменьшение реактивности:				
доли $\beta_{эф}$	0,022	0,031	0,040	0,19
% $\Delta K/K$	0,0048	0,0067	0,0086	0,040
Среднее асимптотическое уменьшение реактивности по кривой баланса в отдельных реакторных циклах:				
доли $\beta_{эф}$	0,23	0,32	0,41	—
% $\Delta K/K$	0,05	0,07	0,09	—

**Изменение реактивности в зависимости от времени работы реактора.**

В предыдущем разделе рассмотрено установившееся асимптотическое изменение реактивности при работе реактора на постоянной мощности. Теперь рассмотрим медленный переходный процесс изменения реактивности, вызванный прогревом радиационной защиты после подъема мощности. Предполагаем, что влажность бетона, соответствующая текущей температуре, достигается сразу после изменения температуры. Это предположение взято лишь по причине полного отсутствия литературных данных о скорости изменения влажности бетона при резком изменении его температуры. Реактивность вычислялась в соответствии с процедурой, представленной на рис. 1. По зависимости изменения мощности от времени определялось изменение температуры в каждом слое бетонной защиты. Отсюда получали зависимости изменения влажности бетона в слоях и далее — реактивности.



На рис. 5 приведены соответствующие расчетные данные по изменению реактивности, обусловленной прогревом защиты, в зависимости от времени работы реактора на мощности 1,0 и 2,0 МВт.

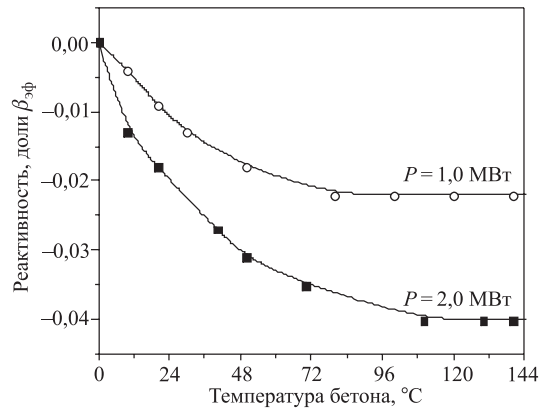


Рис. 5. Расчетное изменение реактивности, вызванное изменением влажности радиационной защиты, в зависимости от времени работы реактора

Как видно из рис. 5, расчетное изменение реактивности достигает насыщения через  $\sim 90\text{--}120$  ч работы реактора после его выхода на мощность. Поскольку инерционность миграции воды в бетоне ( $\tau_{H_2O}$ ) в расчетах не учитывалась, постоянная времени изменения реактивности равна тепловой инерционности бетонной защиты ( $\tau_T = 38$  ч). Отметим, что экспериментальное значение постоянной времени изменения реактивности  $\tau_{\rho\beta}$  равно 92 ч. На основании приведенных данных можно оценить инерционность миграции воды в бетоне  $\tau_{H_2O}$  из выражения  $\tau_{\rho\beta}^2 = \tau_{H_2O}^2 + \tau_T^2$ . Величина  $\tau_{H_2O}$  равна 83 ч. Здесь принималось, что тепловая инерционность радиационной защиты и скорость миграции воды в защите независимы.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты показали, что уменьшение реактивности из-за нагрева радиационной защиты составляет всего  $\sim 10\%$  от наблюдаемого значения (табл. 3), при этом характер изменения реактивности совпадает с результатами эксперимента. Из расчетов также видно, что основное влияние на реактивность со стороны радиационной защиты оказывает изменение температуры первого внутреннего (ближнего к активной зоне) слоя бетона (0–40 см). Изменение

реактивности при повышении температуры первого слоя на  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $0,009\% \Delta K/K$ , для второго слоя (40–80 см) — не превышает  $10^{-4}\% \Delta K/K$ . Можно считать, что последующие после первого от активной зоны слои защиты практически не влияют на реактивность.

Причиной уменьшения реактивности при прогреве защиты может быть ужесточение энергетического спектра нейтронов в защите и, соответственно, в токе нейтронов альbedo из защиты в активную зону. Об этом можно судить по характеру изменения спектрального состава нейтронов в бетоне при его нагреве и, соответственно, обезвоживании (см. рис. 6).

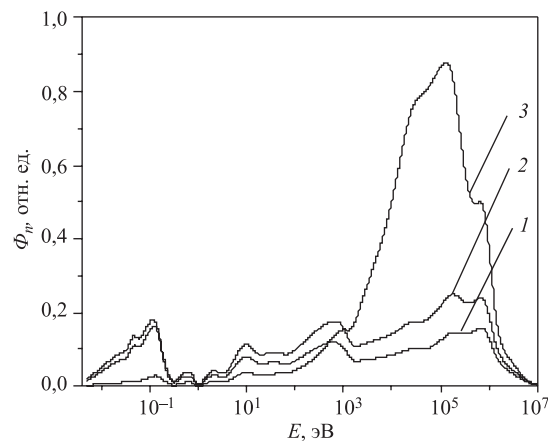


Рис. 6. Расчетный спектр нейтронов в радиационной защите при некоторых значениях относительной влажности бетона  $w$  (мощности реактора ИБР-2): 1 —  $w(T) = 100\%$  ( $P = 0$  МВт), 2 —  $w(T) = 50\%$  ( $P = 2$  МВт), 3 —  $w(T) = 0\%$  (предельный вариант полного обезвоживания бетона)

Отметим второй возможный источник изменения реактивности со стороны радиационной защиты. Замечено, что в процессе работы реактора средняя мощность уменьшается на  $\sim 80$  кВт за цикл (при начальной номинальной мощности 2 МВт). Такое уменьшение мощности может быть связано с изменением чувствительности детекторов нейтронов (ионизационных камер), используемых в системе стабилизации средней мощности. Детекторы установлены в вертикальных каналах, проходящих через радиационную защиту, поэтому при изменении спектра нейтронов в защите чувствительность детекторов меняется. Соответственно меняется и ток камер, хотя мощность реактора при этом остается неизменной. Система стабилизации воспринимает такое изменение тока камеры как следствие реального изменения мощности

с последующей ее коррекцией. Оценка реактивности, соответствующая указанному выше изменению мощности, составляет  $0,03\beta_{эф}$  (для коэффициента мощностной обратной связи  $k_p = -5\beta_{и}/\text{МВт}$ ,  $\beta_{и} = 0,016 \% \Delta K/K$  [8]), т. е. меньше наблюдаемого значения.

Даже с учетом рассмотренных выше двух компонентов изменения реактивности, вызванных изменением состояния радиационной защиты, расчет дает существенно меньшую оценку изменения реактивности  $\Delta\rho = 0,04 + 0,03 = 0,07\beta_{эф}$  по сравнению с наблюдаемым значением  $0,41\beta_{эф}$  (табл. 3), что составляет лишь 17 %.

Отсюда ясно, что причина медленного изменения реактивности обратной связи не ограничивается только обезвоживанием бетона радиационной защиты при ее прогреве, но связана и с другими явлениями.

## ВЫВОДЫ

Расчетный анализ медленного уменьшения реактивности, вызванного радиационным нагревом бетонной защиты, показал следующее.

Нагрев защиты приводит к уменьшению влажности бетона и к ужесточению спектра нейтронов в защите. Соответственно, меняется и спектр нейтронов альbedo в активную зону. Расчетные оценки асимптотического изменения реактивности при изменении температуры защиты при ее прогреве на номинальной мощности малы и составляют  $\sim 10\%$  от экспериментальных значений. При этом расчет подтвердил наблюдаемый факт уменьшения скорости изменения реактивности с ростом температуры бетона и линейную связь асимптотического значения реактивности с мощностью реактора. Например, на мощности 2,0 МВт расчетное уменьшение реактивности составляет  $0,04\beta_{эф}$  ( $0,0086 \% \Delta K/K$ ). При полном обезвоживании защиты реактивность уменьшается на  $0,19\beta_{эф}$  ( $0,04 \% \Delta K/K$ ).

Отмечено, что вторым возможным источником изменения реактивности при обезвоживании бетонной защиты может являться изменение чувствительности детекторов в системе стабилизации мощности.

Полное расчетное изменение реактивности  $0,07\beta_{эф}$  составляет только  $\sim 17\%$  от наблюдаемого значения. Поэтому можно считать, что причина медленного изменения реактивности обратной связи не ограничивается обезвоживанием радиационной защиты, но обусловлена и другими процессами в реакторе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В. Д. и др.* Изучение эффектов реактивности в реакторе ИБР-2 методом баланса. Препринт ОИЯИ Р13-85-339. Дубна, 1985.

2. *Ананьев В. Д. и др.* Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые физические исследования на его пучках // АЭ. 1984. Т. 57(4). С. 227–234.
3. *Комаровский А. Н.* Пути экономии стали в реакторостроении // АЭ. 1959. Т. 7(3). С. 205–214.
4. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, V. I-III, NUREG/CR-0200, Rev. 6 (ORNL/NUREG/CSD-2/R6), 2000.
5. Отчет по обоснованию безопасности исследовательского импульсного реактора ИБР-2, ЛНФ ОИЯИ, 2000.
6. Reactor Physics Constants, ANL-5800 (Second Edition), USAEC, 1963.
7. DICE: Database for the International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC/(95)03/I, 2002.
8. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.

Получено 20 марта 2009 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 06.05.2009.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 1,01. Тираж 305 экз. Заказ № 56588.

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

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

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)