

P13-2009-166

Чжан Чан Мин

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РЕАКТОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА РЕАКТИВНОСТЬ **ИБР-2М**

Чжан Чан Мин

P13-2009-166

Влияние термомеханических перемещений реакторных конструкций на реактивность ИБР-2М

С использованием программ SCALE и DORT проведен расчетный анализ влияния термомеханических перемещений и деформаций реакторных конструкций на реактивность ИБР-2М. В процессе работы реактора температура реакторных конструкций из ближайшего окружения активной зоны меняется в широких пределах, что приводит к их деформации и перемещению и в итоге к изменению реактивности.

При прогреве корпуса реактора активная зона смещается вниз на ~ 18 мм относительно того положения, которое она занимала при комнатной температуре. При этом уменьшение реактивности составляет $-0,027\% \Delta k$ ($0,12 \beta_{\text{эф}}$). В процессе работы реактора эффект реактивности, вызванный удлинением корпуса реактора при изменении мощности от нуля до номинальной 2 МВт, мал: $-0,006\% \Delta k$ ($0,03 \beta_{\text{эф}}$).

Изменение реактивности за счет терморасширения стационарного отражателя при изменении мощности от 0 до 2,0 МВт в целом также мало: $-0,052\% \Delta k$ и линейно растет с ростом температуры отражателя.

Суммарный расчетный эффект реактивности, обусловленный термомеханическими изменениями корпуса реактора и конструктивных элементов из ближайшего окружения активной зоны ($\sim 0,08\% \Delta k$), существенно не влияет на эксплуатацию реактора, но служит важной оценкой при анализе аварий, связанных с потерей натрия.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Jang Chang Min

P13-2009-166

The Influence of Thermomechanical Changes of Reactor Structures on Reactivity in the Reactor IBR-2M

The influence of thermomechanical changes of reactor structures on reactivity in the reactor IBR-2M has been analysed by the nuclear codes SCALE and DORT. During the operation of reactor, temperatures of reactor structures around core are varied within wide ranges, which causes their deformations and displacements, consequently changes in reactivity.

During heating of the reactor housing, the reactor core is displaced down ~ 18 mm from its position at room temperature and that brings about reactivity reduction of $-0.027\% \Delta k$ ($0.12 \beta_{\text{eff}}$). When the power of reactor is increased from 0 to 2.0 MW during the operation of reactor, change in reactivity due to additional elongation of reactor housing is $-0,006\% \Delta k$ ($0.03 \beta_{\text{eff}}$). Change in reactivity due to thermal expansion of the stationary reflector during shifts in the power of reactor from 0 to 2.0 MW is $-0.052\% \Delta k$ and is increased linearly with the increase in temperature of the stationary reflector.

Total reactivity effect calculated due to thermomechanical changes of the reactor housing and stationary reflector is $\sim 0.08\% \Delta k$ and it has no essential influence on the operation of reactor, but the calculated data are important for analysis of the accidents, such as in relation to the loss of sodium from reactor.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы реактора температура реакторных конструкций из ближайшего окружения активной зоны меняется в широких пределах, что приводит к их деформации и перемещению. С физической точки зрения термодформации отдельных конструктивных элементов вызывают изменение нейтронно-физических свойств реактора, что приводит к изменению реактивности. Особенно этот эффект проявляется в реакторах на быстрых нейтронах, где влияние геометрии врезанных конструкций на реактивность велико (объем активной зоны мал, а вероятность утечки быстрых нейтронов, на которых в основном происходит деление, значительна) [1].

Предварительный анализ показал, что наиболее значительные эффекты от термодформаций конструктивных элементов ИБР-2М (кроме активной зоны) можно ожидать от изменения геометрии стационарных отражателей, непосредственно окружающих активную зону, и удлинения корпуса реактора после вывода реактора на мощность.

Температурные эффекты, связанные с изменением температуры самой активной зоны, здесь не рассматриваются.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Чтобы проанализировать влияние термомеханических изменений реакторных конструкций на реактивность, необходимо рассмотреть двухмерную систему координат в радиальном направлении и по высоте активной зоны. Кроме того, в отличие, например, от самой активной зоны, окружающие ее конструкции имеют значительные гетерогенности, обусловленные наличием технологических зазоров. Это приводит к сложным неоднородностям в энергетическом спектре нейтронов в конструкциях. Для снижения погрешности, обусловленной указанными выше особенностями расчетов, использовались двухмерные многогрупповые программы переноса нейтронов. Для расчета реактивности использовался комплекс программ DORT — двухмерный многогрупповой комплекс программ переноса нейтронов на базе S_n -

приближений [2] с комплексом программ SCALE-4 [3] с системой многогрупповых ядерных констант. Использование указанных выше программ вызвано тем, что комплекс программ DORT не имеет своей системы групповых ядерных констант, а комплекс программ SCALE-4 имеет, но только применительно к одномерной геометрии. Была создана 27-групповая система ядерных констант (из SCALE-4) для двухмерных многогрупповых нейтронно-транспортных расчетов по программам DORT. Это позволило вычислять изменения реактивности из-за термомеханических деформаций корпуса и окружающих его конструктивных элементов.

Основные 27-групповые константы использовались без группового усреднения, поскольку энергетические спектры нейтронов в каждой физической области реактора сильно различаются. Для учета анизотропии рассеяния нейтронов использовалось P_3 -приближение.

Схема расчета реактивности при термомеханических деформациях корпуса реактора и конструктивных элементов из ближайшего его окружения представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчета изменения реактивности при термомеханических деформациях реакторных конструкций

Для проверки «правильности» применения комплекса SCALE-4 + DORT к расчету ИБР-2М был проведен тестовый расчет. В качестве тестового объекта расчета выбран плутониевый критический комплекс BR-1-3, близкий по химическому составу топлива, геометрическим размерам твэлов и активной зоны к реактору ИБР-2М [4]. Результат расчета коэффициента размножения $K_{эф} = 1,0422$ по программам SCALE-4 + DORT на 0,5 % больше, чем полученный по расчету Монте-Карло по программе KENO (Hansen-Roach 16-групповых ядерных констант) $K_{эф} = 1,0368 \pm 0,0009$. Причина этого отличия может быть связана с использованием S_n -приближения в программе DORT.

2. ИЗМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ УДЛИНЕНИЯ КОРПУСА РЕАКТОРА И СМЕЩЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Одной из проблем при изучении термомеханических изменений в реакторных конструкциях и их влияния на реактивность ИБР-2М является удлинение корпуса реактора после вывода его на мощность. Корпус реактора,

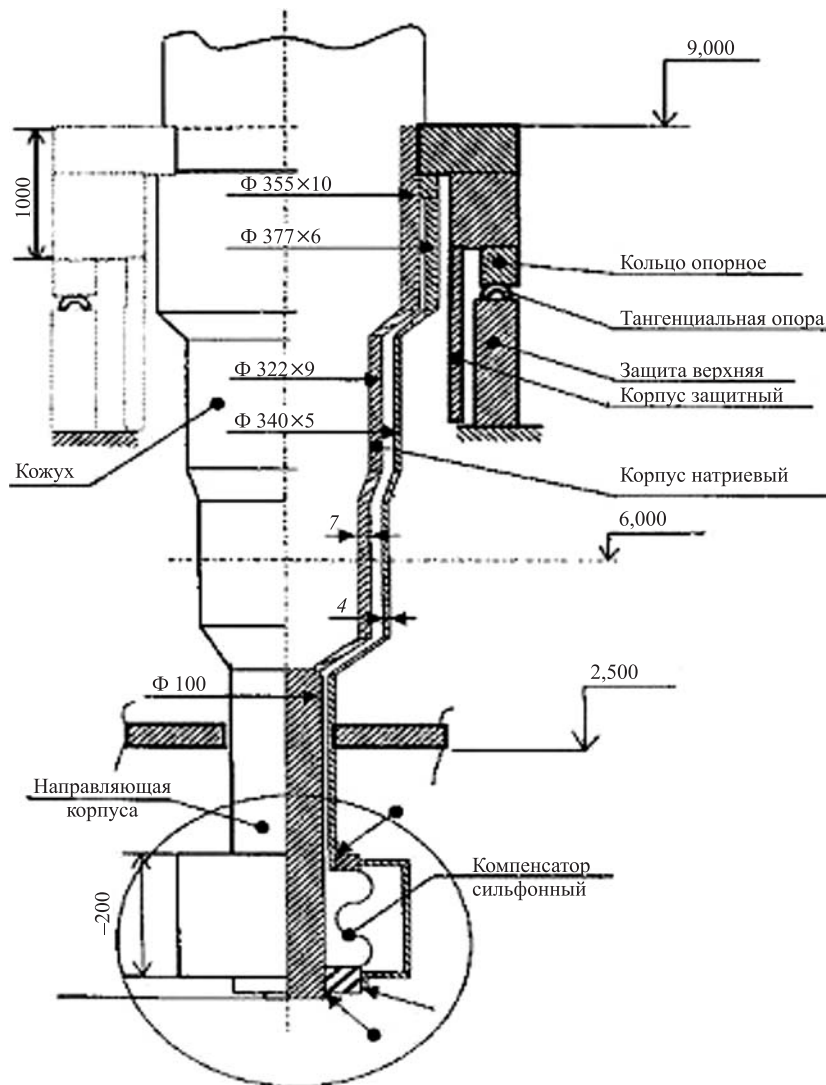


Рис. 2. Принципиальная схема размещения корпуса ИБР-2М (все размеры в мм)

непосредственно соприкасаясь с жидким натриевым теплоносителем, нагревается до температуры, близкой к температуре теплоносителя. С ростом мощности температура натрия возрастает, а корпус, нагреваясь, расширяется вниз по длине (конструктивно корпус держится сверху на кольцевой опоре, см. рис. 2). При этом положение активной зоны реактора относительно стационарного отражателя, связанного внизу с жесткой опорой, и блоков системы управления и защиты меняется. В этой ситуации реактивность уменьшается.

На рис. 3 представлено распределение температур по высоте корпуса и страховочного кожуха реактора при номинальной мощности [6]. Из рис. 2 видно, что центр активной зоны ИБР-2М находится на 3000 мм ниже места

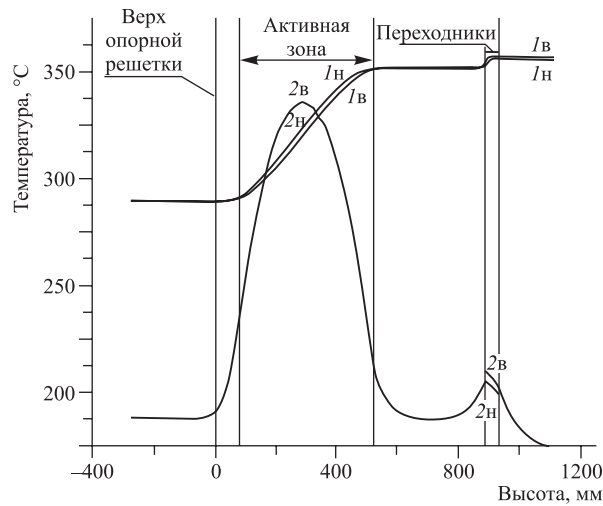


Рис. 3. Распределение температур по высоте корпуса ИБР-2М и страховочного кожуха (1 — корпус реактора, 2 — страховочный кожух, в — внутренняя поверхность, н — наружная поверхность)

кольцевой опоры корпуса. После вывода ИБР-2М на мощность корпус реактора нагревается до 360 °C [5, 6]. При этом длина корпуса увеличивается. Изменение длины корпуса dL при нагреве можно оценить из выражения

$$dL = L_0 \alpha (t_1 - t_0), \quad (1)$$

где L_0 — начальная длина корпуса, t_0, t_1 — средние по высоте начальная и конечная температуры корпуса, α — коэффициент терморасширения корпуса.

Был проведен расчет изменения реактивности для следующих трех вариантов (см. рис. 4, а–в):

- а) холодный режим (0 МВт, $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$); $dL = 0\text{ мм}$, без натрия в зоне;
 б) дежурный режим (0 МВт, $t_1 = 270\text{ }^\circ\text{C}$); $dL = 13\text{ мм}$; жидкий натрий в зоне;
 в) номинальный рабочий режим (2 МВт, $t_1 = 360\text{ }^\circ\text{C}$); $dL = 18\text{ мм}$.
- Использовались следующие данные: $L_0 = 3000\text{ мм}$, $\alpha = 17,3 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
 В качестве иллюстрации смещение активной зоны при нагреве схематично показано на рис. 4.

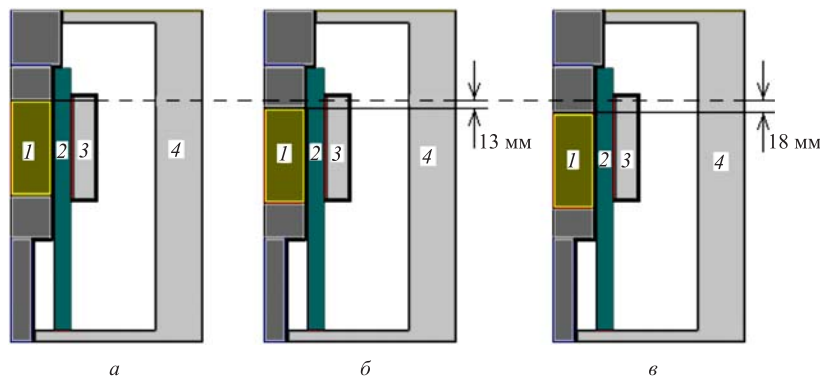


Рис. 4. Схема перемещения активной зоны вследствие терморасширения корпуса ИБР-2. 1 — активная зона, 2 — стационарный отражатель, 3 — замедлитель, 4 — тепловая защита

После заливки натрия в активную зону (мощность нулевая, $t_1 = 270\text{ }^\circ\text{C}$) активная зона реактора опускается на 13 мм относительно положения, которое она занимала при $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$. После вывода реактора на номинальную мощность 2 МВт ($t_1 = 360\text{ }^\circ\text{C}$) активная зона опустится еще на 5 мм, т. е. общее смещение активной зоны относительно холодного состояния (без натрия) составляет $\sim 18\text{ мм}$.

Отметим, что на эту же величину смещается вниз и активная зона. Смещение активной зоны происходит относительно стационарного отражателя и находящихся в нем блоков управления и защиты. При этом эффективность стационарного отражателя и защиты падает. В целом реактивность системы уменьшается. Полное уменьшение реактивности при смещении активной зоны вниз на 18 мм составляет по расчету $\Delta\rho = -0,027\% \Delta k$ ($0,12 \beta_{эф}$) (см. табл. 1).

После вывода реактора на мощность 2,0 МВт (рабочий режим) изменение реактивности относительно состояния реактора нулевой мощности с натрием (дежурный режим) мало: $\Delta\rho = -0,006\% \Delta k$ ($0,03 \beta_{эф}$).

Для управления реактором имеет смысл учитывать только дежурный и рабочий режимы, т. е. с точки зрения эксплуатации реактора активная зона

Таблица 1. Результаты расчета изменения реактивности вследствие терморасширения корпуса ИБР-2М

Вариант	Режим	Мощность, МВт	Температура, °С	Перемещение активной зоны, мм	Изменение реактивности	
					$\% \Delta k$	$\beta_{эф}$
а	Холодный	0,0	20	0,0	–	–
б	Дежурный	0,0	270	13,0	–0,021	–0,09
в	Рабочий	2,0	360	18,0	–0,027	–0,12

рассматривается только с натрием. Вариант отсутствия натрия в зоне рассматривается как аварийный режим. Данные по дополнительному изменению реактивности важны при анализе аварий с потерей натрия. Для нормальной эксплуатации реальное изменение реактивности $0,006\% \Delta k$ ($0,03 \beta_{эф}$) мало и легко обрабатывается системой автоматического регулирования мощности.

3. ИЗМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕРМОРАСШИРЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Другим эффектом реактивности, связанным с изменением температуры реактора, является изменение геометрических размеров стационарных отражателей. После вывода реактора на мощность нагрев стационарных отражателей вызывает их расширение и деформации. Термодеформации, ведущие к перемещению стационарных отражателей как целого, имеют значительный компонент случайности и здесь не рассматриваются.

С точки зрения изменения нейтронно-физических свойств при нагреве отражателей происходит следующее. При расширении отражателей снижается ядерная плотность материала отражателя. Уменьшение ядерной плотности увеличивает диффузионную длину нейтронов. В свою очередь, увеличиваются потери нейтронов через внешнюю поверхность; ток нейтронов, отраженных в активную зону, уменьшается. Меняется и спектр нейтронов в отражателе. В итоге меняется реактивность. Стационарный отражатель ИБР-2М при комнатной температуре имеет форму шестигранника высотой ~ 500 мм [6]. Толщина отражателя с учетом находящихся в нем, как в матрице, компенсирующих блоков регулирования составляет ~ 100 мм. Компенсирующий блок состоит из двух вольфрамовых блоков толщиной 55 и 30 мм соответственно.

Поскольку область применения S_n -приближения в программе DORT ограничена двухмерной геометрией в координатах ($R-Z$), стационарные отражатели в расчетах были приведены в эквивалентную цилиндрическую форму толщиной 100 мм.

После вывода реактора на мощность стационарный отражатель расширяется в направлении радиуса и высоты с коэффициентом линейного расширения $\alpha = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$:

$$\begin{aligned} dR &= R\alpha(t_1 - t_0), \\ dZ &= Z\alpha(t_1 - t_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где R, Z — толщина и высота стационарного отражателя, t_0, t_1 — начальная (при $P = 0$ МВт) и рабочая температуры соответственно. Изменение объема стационарного отражателя равно

$$\begin{aligned} V_0 &= \pi[(R_0 + R)^2 - R_0^2]Z, \\ V_1 &= \pi[(R_0 + R + dR)^2 - R_0^2](Z + dZ), \end{aligned} \quad (3)$$

где V_0 — начальный объем отражателя, V_1 — объем отражателя после терморасширения, R_0 — внутренний радиус отражателя. Ядерная плотность при изменении объема от V_0 (комнатная температура) до V_1 (рабочая температура) уменьшается на V_1/V_0 , т. е. $N_1/N_0 = V_0/V_1$.

В процессе работы ИБР-2 стационарный отражатель в зависимости от уровня мощности нагревается на 100–200 °С (стационарные отражатели ИБР-2 аналогичны ИБР-2М). Максимальная температура отражателя составляет 235 °С [6].

Нейтронно-физические расчеты были проведены в интервале температуры отражателя 20–240 °С. На рис. 5 представлены результаты расчета изменения реактивности в зависимости от температуры отражателя. Как видно из представленных на рис. 5 данных, реактивность с ростом температуры отражателя уменьшается линейно.

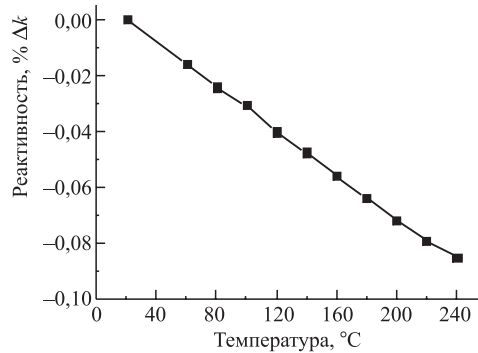


Рис. 5. Изменение реактивности в зависимости от температуры стационарного отражателя

По измеренным данным на мощностях 1,5 и 2,0 МВт температура матрицы стационарного отражателя равна 100–150 и 120–180 °С соответственно

(разброс в данном случае определялся местом измерения температуры на поверхности отражателя) [6]. Средние температуры стационарного отражателя равны 125 и 150 °С.

По расчету изменение средней температуры отражателя от комнатной до 125 °С и далее до 150 °С приводит к изменению реактивности на $-0,042\% \Delta k$ и $-0,052\% \Delta k$ соответственно. Наблюдаемые изменения реактивности равны $-0,07\% \Delta k$ и $-0,09\% \Delta k$ [7]. Таким образом, расчет дает $\sim 60\%$ от наблюдаемых значений.

Для сравнения в табл.2 приведены расчетные и измеренные значения изменения реактивности.

Из таблицы видно, что полное изменение реактивности, связанное с терморасширением стационарного отражателя (СО) (относительно состояния при 20 °С), довольно велико. Для практических целей при нормальной работе реактора суммарный расчетный эффект реактивности, обусловленный удлинением корпуса реактора и расширением стационарных отражателей при подъеме мощности от нуля до номинальной, равен $\sim 0,08\% \Delta k$, что существенно не влияет на эксплуатацию реактора.

Таблица 2. Сравнение расчетных и измеренных значений реактивности

Характеристика	Уровень мощности	
	1,5 МВт	2,0 МВт
Температура СО, °С	100–150	120–180
Средняя температура СО, °С	125	150
Расчетное изменение реактивности из-за нагревания СО, % Δk	-0,042	-0,052
Экспериментальное изменение реактивности, % Δk	-0,07	-0,09
Расчет/Эксперимент	0,60	0,58

ВЫВОДЫ

Расчеты по оценке эффектов реактивности, обусловленных термомеханическими изменениями корпуса реактора и стационарных отражателей ИБР-2, показали следующее.

При прогреве корпуса реактора активная зона смещается вниз на ~ 18 мм относительно того положения, которое она занимала при комнатной температуре. При этом коэффициент размножения нейтронов уменьшается, а эффективность стационарного отражателя и органов регулирования в системе управления и защиты падает. Уменьшение реактивности составляет $-0,027\% \Delta k$ ($0,12 \beta_{эф}$).

В процессе работы реактора эффект реактивности, вызванный удлинением корпуса реактора при изменении мощности от нуля до номинальной 2 МВт, мал: $-0,006\% \Delta k$ ($0,03 \beta_{эф}$) и легко обрабатывается системой автоматического регулирования мощности.

Изменение реактивности за счет терморасширения стационарного отражателя при изменении мощности от 0 до 2,0 МВт в целом мало: $-0,052\% \Delta k$ и линейно растет (по модулю) с ростом температуры стационарного отражателя.

Суммарный расчетный эффект реактивности, обусловленный термомеханическими изменениями корпуса реактора и конструктивных элементов из ближайшего окружения активной зоны ($\sim 0,08\% \Delta k$), существенно не влияет на эксплуатацию реактора, но служит важной оценкой при анализе аварий, связанных с потерей натрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tsvetkova G. V.* An Autonomous Long-Term Fast Reactor System and the Principal Design Limitations of the Concept. Texas: A&M University, 2003.
2. *Johnson J. O.* DORT: A Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code, ORNL/TM-11778, ORNL, 1992.
3. 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.
4. DICE: Database for the International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC/(95)03/I, 2002.
5. Комплекс оборудования реактора ИБР-2М, ИРМ.2М.02.000 ПЗ, ЛНФ. ОИЯИ, 2002.
6. Отчет по обоснованию безопасности исследовательского импульсного реактора ИБР-2, ЛНФ. ОИЯИ, 2000.
7. *Пепельшев Ю. Н., Чжан Чан Мин.* Влияние температуры радиационной защиты на реактивность ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-43. Дубна, 2009.

Получено 2 ноября 2009 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 11.03.2010.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 305 экз. Заказ № 56921.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/