

85-187



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P3-85-187

В.Д.Ананьев, Ж.А.Козлов, В.И.Лушиков,
Ю.М.Останевич, Е.П.Шабалин, И.М.Франк

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР ИБР-2 В 90-е ГОДЫ

1985

Хотя содержание этой статьи нацелено в будущее, нелишне заметить, что оно корнями уходит в прошлое. В этой связи мы хотели бы напомнить, что первый реакторный источник, создававший повторяющиеся несколько раз в секунду импульсы мощности и использованный для исследований с помощью рассеяния нейтронов, был создан в ЛНФ ОИЯИ еще в 1960 году. Этот источник - реактор ИБР/импульсный быстрый реактор/ тогда имел среднюю тепловую мощность 1 кВт при импульсной мощности 5 МВт. Уже первый опыт работы с ним показал, что импульсный реактор - эффективный и удобный инструмент для научных исследований как в области ядерной физики, так и в области физики конденсированных сред. С тех пор в нашем Институте ведется постоянная работа по совершенствованию импульсных реакторов. Вместе с тем идея применения импульсных источников нейтронов довольно скоро стала популярной во всем мире. К настоящему времени среди действующих высокоинтенсивных источников нейтронов импульсные источники составляют примерно половину от общего числа, а с учетом вновь сооружаемых - это соотношение составит примерно 2:1 в пользу импульсных источников^{1,2/}.

Самым крупным достижением в этой области является реактор ИБР-2^{3,4/} /рис.1/, который в 1984 году достиг следующих параметров^{5/}:

Средняя тепловая мощность	- 2 МВт;
пиковая мощность	- 1500 МВт;
уровень мощности между импульсами	- 100 кВт;
длительность импульса мощности	
/на половине высоты/	- 215 мкс;
частота повторения импульсов	- 5 с ⁻¹ .

Пиковая плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя составляет $1 \cdot 10^{16}$ нейтр/см²·с·2π. Видимая с выведенного пучка площадь замедлителя может достигать 400÷800 см². В этих условиях типичная средняя по времени плотность потока тепловых нейтронов на образце при пролетной базе 15±20 м имеет значение ~ $5 \cdot 10^7$ /см²с⁻¹ и монохроматичность 0,05 Å. Отсюда видно, что эти параметры являются превосходными для обширного круга исследований по физике конденсированных сред, химии, биологии и в других областях наук.

Однако реактор ИБР-2 имеет и ряд других достоинств. В экономическом плане это сравнительно недорогая установка, как на этапе создания, так и на этапе эксплуатации. Срок службы ядерного горючего, при средней мощности 2 МВт и годовой программе 2500 ч, составляет более 10 лет, потребление электроэнергии находится на уровне 0,5 МВт.

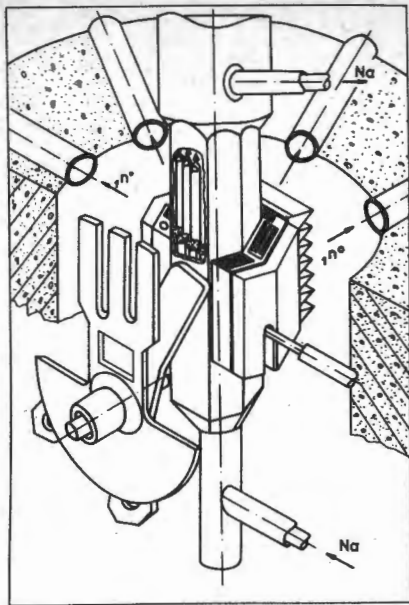


Рис.1. Схема активной зоны реактора ИБР-2. На переднем плане слева - используемый в настоящее время подвижной отражатель.

Как импульсный источник, реактор ИБР-2 отличается низкой частотой повторения - 5 импульсов в секунду, что позволяет эффективно работать по методу времени пролета с очень медленными нейтронами, вплоть до скоростей 50 м/с. Наконец, спектр быстрых нейтронов, рождаемых в реакторе, заканчивается на энергии 10 МэВ, что делает проблему создания биологической защиты сравнительно простой и дешево решаемой.

К числу факторов, ограничивающих возможности исследований на ИБР-2, относятся ограниченный срок службы сложного механического устройства - подвижного отражателя /гарантированный срок службы 10.000 ч/ и сравнительно большая длительность импульса мощности.

Достигнутые в 1984 году параметры реактора ИБР-2 не являются предельными, и их улучшению будет посвящено следующее десятилетие. Имеющийся опыт эксплуатации реактора позволяет рассчитывать на дальнейшее повышение его средней мощности до $3 \div 4$ МВт с пропорциональным увеличением потока нейтронов. Другим направлением улучшения реактора должно стать сокращение длительности импульса мощности. Мы намерены в дальнейшем применить новую

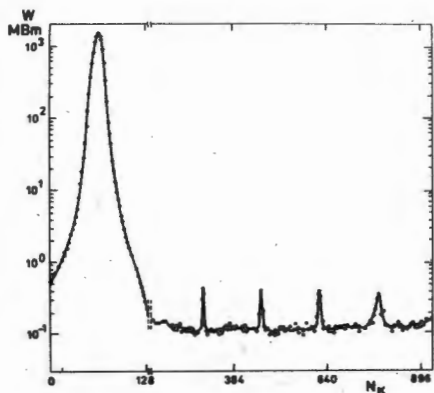


Рис.2. Зависимость мощности реактора ИБР-2 от времени. Масштабы по оси абсцисс: на участке $0 \div 128$ - 32 мкс/деление, далее - 256 мкс/деление. Узкие пики на фоне остаточной мощности соответствуют т.н. спутникам. Измерения выполнены при помощи ториевой камеры деления.

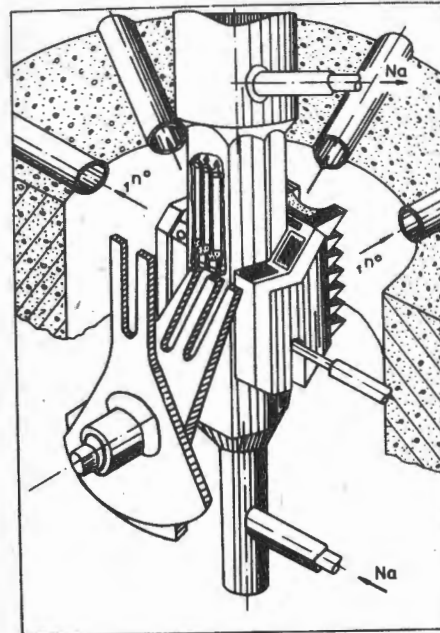


Рис.3. Активная зона реактора ИБР-2 с перспективным отражателем гетерогенного типа.

конструкцию подвижного отражателя /т.н. гетерогенного типа/ [6], рис.3. От применяемого в настоящее время он отличается наличием двух лопастей, имеющих форму "вилки" и вращающихся в противоположных направлениях. Расчеты и статические эксперименты доказывают, что такая конфигурация существенно повышает скорость изменения реактивности. Разработка механической конструкции, воплощающей эту идею, является достаточно сложной инженерной задачей. После ее решения длительность импульса мощности

должна сократиться до 120 мкс. Этот путь даст чистый выигрыш качества реактора и не сопряжен с понижением средней мощности или повышением частоты повторения импульсов. Более значительное сокращение длительности импульса может быть достигнуто при использовании активной зоны в режиме бустера в сочетании с инжектором - ускорителем электронов. Возможный режим работы при этом характеризуется следующими параметрами:

Длительность импульса мощности	10 мкс;
средняя тепловая мощность	0,5 МВт;
частота повторения	50 с^{-1} ;
Пиковая тепловая мощность	1000 МВт.
Пиковый ток надтепловых нейтронов /0,1 ÷ 1 эВ/ при этом составит	$1 \cdot 10^{17}$ нейтр/стер·с·эВ.

Наконец, третье направление развития реактора ИБР-2 связывается с разработкой жидководородного замедлителя. Объем водорода в замедлителе ожидается в пределах $1,5 \div 2$ л, тепловыделение за счет радиационного нагрева - на уровне 200 Вт. Применение такого замедлителя должно повысить поток холодных нейтронов /с длиной волны более 6 Å/ примерно в 20 раз. Ток холодных нейтронов с поверхности этого замедлителя ожидается порядка 10^{14} нейтр /с·2π /⁻¹.

Реактор ИБР-2 используется для физических исследований в 4 основных областях: в физике конденсированных сред, ядерной физике, фундаментальной физике и для прикладных исследований. Первое из перечисленных направлений является преобладающим как по активности пользователей, так и по числу занимаемых для

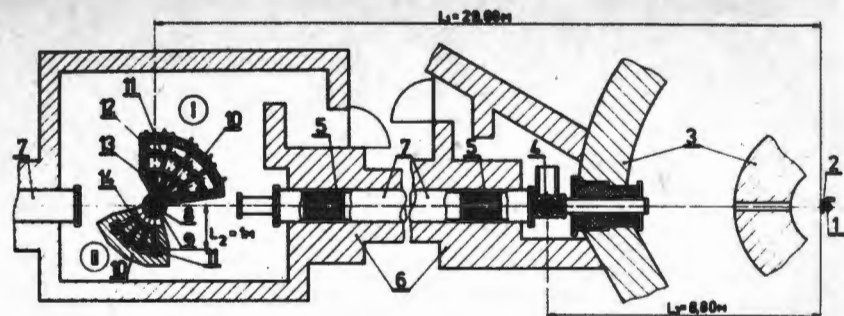


Рис. 4. Схема спектрометра неупругого рассеяния КДСОГ-М на 10 канале реактора ИБР-2. I - установка для исследования неупругого рассеяния; II - установка исследования упругого рассеяния. 1 - активная зона ИБР-2, 2 - замедлитель, 3 - биологическая защита реактора, 4 - вращающийся коллиматор, 5 - стационарный коллиматор, 6 - биологическая защита 10-го канала, 7 - вакуумный нейтронный канал, 8 - образец, 9 - криостат, 10 - защита детекторов, 11 - детектор, 12 - монокристаллы анализаторов энергии, 13 - бериллиевые фильтры, 14 - целевые коллиматоры.

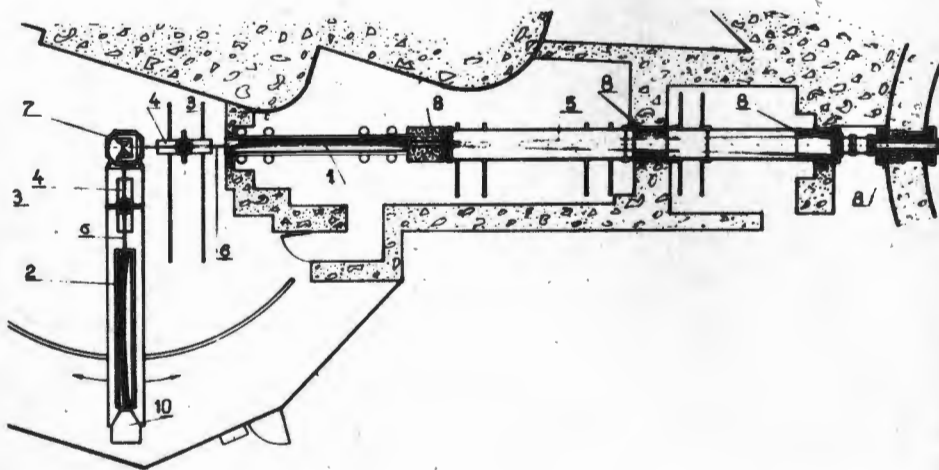


Рис. 5. Схема спектрометра поляризованных нейтронов. Поляризатором /1/ и анализатором /2/ служат изогнутые нейтронные каналы.

Дифрактометр ДН-2

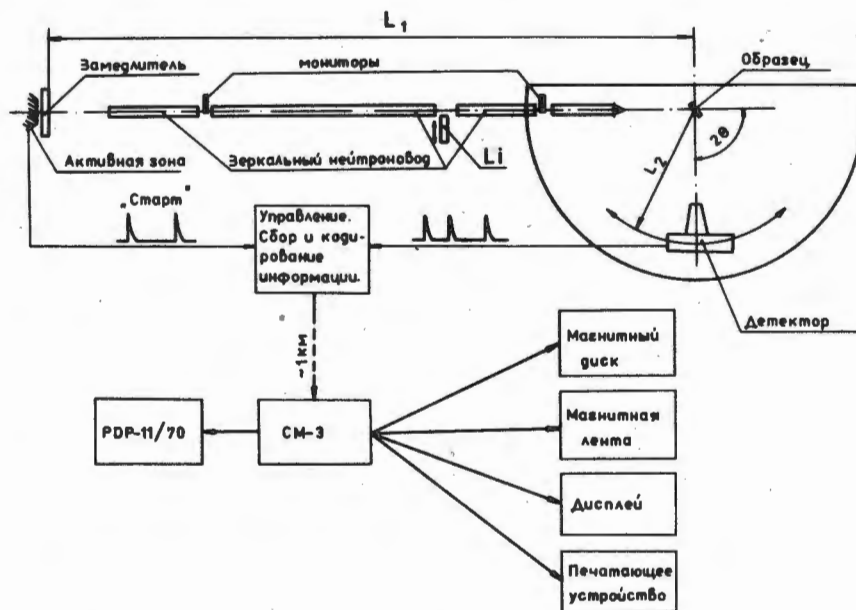


Рис. 6. Схема дифрактометра для исследований структуры монокристаллов.

этих исследований пучков. Характеристики некоторых установок, используемых в этой области в настоящее время, приведены в таблице /на рис. 4-8 показаны схемы этих спектрометров/. Тематика исследований отличается большим разнообразием, затрагивающим интересы довольно обширного круга наук. Традиционные методы исследования структуры и динамики сейчас применяются для исследований систем все более возрастающей сложности. Так, среди структурных задач в последний год на реакторе ИБР-2 были изучены фазовые диаграммы суперионного проводника CsHSO_4 , жидких кристаллов в аморфном состоянии, процессов гидратации полиэлектролитов и биологических мембран. Исследования динамики, в основном, были связаны с некогерентным неупругим рассеянием на водороде в сложных и комплексных соединениях /нафталин + тетрацианобензол, $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6] \cdot (\text{BF}_4)_2$, диметилнафталин и др./, а также в гидридах интерметаллических соединений. Другим некогерентным процессом, с успехом изучаемым на ИБР-2, является неупругое парамагнитное рассеяние в редкоземельных интерметаллидах $/\text{TbNi}_2, \text{LaNi}_2, \text{HoNi}_2, \text{ErNi}_2, \text{LaCu}_5, \text{NdNi}_5/$.

Не имея возможности останавливаться на содержании этих исследований, мы хотели бы отметить, что в целом в этой области

Таблица

Тип спектрометра	Основные характеристики	Области применения
Малоуглового рассеяния	$\Phi \leq 3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $\{k\} = 8 \cdot 10^{-8} \div 2,0 \text{ \AA}^{-1}$ $\Delta k/k = 0,1$	Структурные исследования низкого разрешения в физике, химии, биологии
Четырехкружный дифрактометр	$\Phi = 7,4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $\{\lambda\} = 1,2 \div 2,5 \text{ \AA}$	Структура монокристаллов и поликристаллов с $d \leq 120 \text{ \AA}$
Текстурный дифрактометр	$\Phi = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $\{\lambda\} = 0,5 \div 4 \text{ \AA}$	Фазовый и текстурный анализ поликристаллических материалов низкой симметрии
Поляризованных нейтронов	$\Phi = 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $\{\lambda\} = 0,7 \div 7,5 \text{ \AA}$	Упругое и неупругое рассеяние поляризованных нейтронов. Структура и динамика магнетиков.
Спектрометр обратной геометрии	$\Phi = 1,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $\Delta\omega/\omega = 4 \div 15\%$ $\{\lambda\} = 0,4 \div 4,5 \text{ \AA}$	Некогерентное неупругое рассеяние. Динамика водорода. Структура электронных уровней в редкоземельных магнетиках.

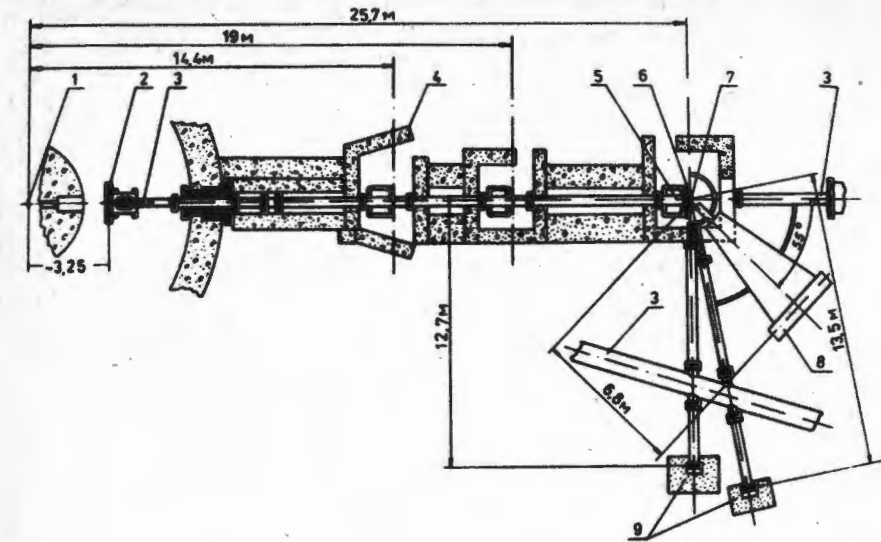


Рис.7. Схема корреляционного спектрометра. Псевдостатический прерыватель пучка /6/ располагается непосредственно перед образцом /7/.

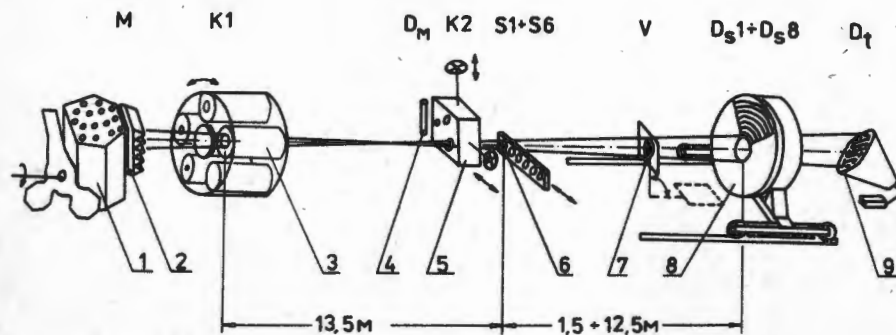


Рис.8. Схема установки малоуглового рассеяния. /7/ - ванадиевая фольга, используемая для абсолютной калибровки кольцевого детектора рассеянных нейтронов /8/.

они характеризуются все большим усложнением изучаемых структур и динамических явлений. При этом центральной по-прежнему остается проблема взаимосвязи динамических и структурных свойств. В случае относительно простых систем наиболее ярким проявлением этой связи являются фазовые переходы. Для биологических макро-

молекул каждому объекту обычно свойственна определенная функция в живой клетке, поэтому указанная проблема взаимосвязи приобретает новый оттенок и превращается в проблему соответствия между структурой и функцией макромолекулы.

Импульсный реактор как инструмент для исследований обладает специфическими качествами, определяющими области наибольшей исследовательской активности. Основные методы исследования структуры /дифракция по времени пролета/ и динамики /метод обратной геометрии/ допускают простое совмещение их в одной экспериментальной установке, что позволяет одновременно и на одном и том же образце вести как исследования структуры, так и динамики. Такое совмещение уже осуществлено в спектрометре КДСОГ-М^{/7/} и оказалось очень эффективным при исследовании структур, испытывающих плохо обратимые фазовые переходы, как это, например, оказалось в случае суперионного проводника CsHSO₄.

Другим интересным свойством импульсного реактора является исключительно высокий импульсный /пиковый/ поток нейтронов на образце. Действительно, на образце, расположенном в 15 м от замедлителя, при среднем потоке тепловых нейтронов $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, мгновенный поток в области теплового максимума достигает $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Эта особенность позволяет в дальнейшем заниматься исследованиями кинетики фазовых переходов и других переходных процессов, свойств короткоживущих неравновесных состояний и свойств вещества в экстремальных условиях, создаваемых в импульсном режиме. Так, например, в настоящее время завершается создание импульсной магнитной установки со следующими параметрами:

- а/ форма импульса - половина периода синусоиды,
 - длительность - $0,7 \div 1,5 \text{ мс}$;
 - частота повторения - $2 \div 5 \text{ с}^{-1}$
- амплитуда магнитного поля - до 500 кЭ.
- б/ форма импульса - прямоугольная
 - длительность - до 400 мкс.
 - фронт нарастания - 2 мкс.
 - величина поля - до 50 кЭ.

Разумеется, возможности импульсных воздействий не исчерпываются созданием магнитных полей. Неменьший интерес представляют процессы быстрой перестройки, например, в мышцах при электростимуляции мышечного сокращения, в сегнетоэлектриках при перестройке доменной структуры под действием электрического поля, и т.д. На первом этапе мы намерены заниматься чисто структурными исследованиями в этой области, однако в более отдаленной перспективе не исключены и исследования неупругого рассеяния.

Среди перспективных задач ядерной физики следует выделить исследования ядерных реакций с очень малыми сечениями или на ультрамалых количествах исследуемых материалов, например, на ми-

шенях из радиоактивных ядер. При этом высокие мгновенные потоки нейтронов создают благоприятные условия для улучшения отношения эффект/фон.

Ранее уже упоминалось о низкой частоте повторения импульсов мощности как о достоинстве импульсного источника. Простые оценки показывают, что при пролетной базе 10 м и периоде повторения 0,2 с из реактора можно вывести нейтроны с $\lambda \leq 80 \text{ \AA}$ без наложений быстрых нейтронов от следующей вспышки. Если для вывода пучка применить изогнутый зеркальный нейтронотвод, то даже без применения холодного замедлителя в области $\lambda = 30 \text{ \AA}$ в интервал $\Delta\lambda = 0,1 \text{ \AA}$ /что соответствует разрешению по времени пролета/ средний по времени поток составляет $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В сочетании с корреляционным анализом^{/8,9/} в этой области можно развить весьма светосильную спектроскопию квазиупругого рассеяния с разрешением порядка 1 мкэВ.

Трудно прогнозируемой областью является физика элементарных частиц, в которой новые эксперименты возникают достаточно редко. Тем не менее, реактор ИБР-2 в этой области уже был успешно использован для поиска гипотетической частицы - аксиона^{/10/}. Этот эксперимент эффективно использовал импульсный характер работы реактора для улучшения отношения эффект/фон, что позволило существенно /на 2 порядка/ снизить оценку сечения рождения аксиона и практически закрыть модельные предсказания.

Наконец, ИБР-2 успешно используется и для прикладных исследований. Традиционные направления - активационный элементный анализ и радиобиология^{/11/} здесь приобретают новые возможности, благодаря использованию высокоэнергетической части нейтронного спектра. Это позволяет расширить спектр многоэлементного анализа на редкоземельные элементы, активируемые преимущественно надтепловыми нейтронами. Высокие мощности доз в выведенном пучке /до 1000 бэр/мин/ позволяют эффективно проводить радиобиологические исследования.

Большой самостоятельный интерес имеет текстурная нейтронография по методу времени пролета, развивающаяся на импульсном реакторе. В последние годы было показано^{/12/}, что при исследовании текстуры материалов с низкой симметрией метод времени пролета дает ощутимый выигрыш времени, благодаря одновременной съемке всех рефлексов от поликристаллического материала. Это обстоятельство позволило внедрить текстурную нейтронографию, напр., в область исследования истории образования горных пород /рис.9/. Суммируя тенденции в области прикладных исследований, можно сказать, что в дальнейшем эти исследования будут применяться во все новых и новых областях.

У нас нет сомнений в том, что 90-е годы будут характеризоваться дальнейшим совершенствованием существующих импульсных источников нейтронов, созданием ряда новых источников на базе сильноточных ускорителей, а также годами дальнейшего плодотворного внедрения нейтронных методов исследования в самые различные области науки.

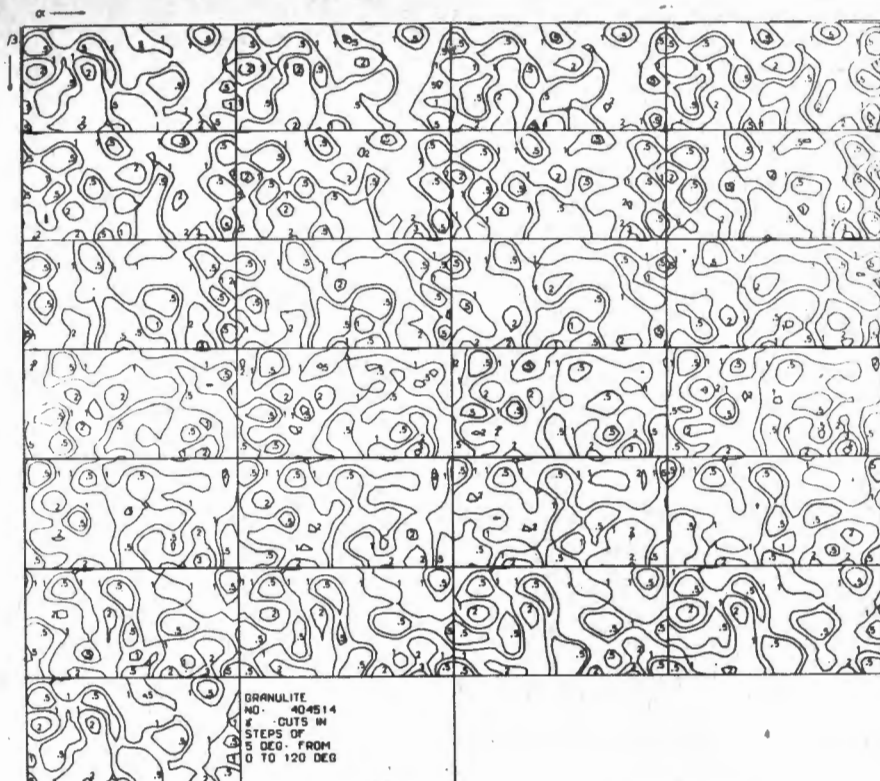


Рис.9. Трехмерная функция распределения ориентаций образца горной породы /гранулита/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proceed. of the 4th Meeting of Internat. Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-IV), KEK, Tsukuba, Oct. 20-24, 1980, Japan, KENS Report 11, March, 1981.
2. Шабалин Е.П. Атомная энергия, 1982, т.52, вып.2, с. 92.
3. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с. 17.
4. Ananiev V.D. et al. In: "Neutron and its Applications" Proceed. of Internat.Conf., 13-17 Sept. 1982, Cambridge The Inst. of Physics, Bristole and London, Conf. Series No 64, 1983, p. 497.
5. Ананьев В.Д. и др. Атомная энергия, 1984, т. 57, с. 227.
6. Ananiev V.D. et al. Atomkernenergie-Kerntechnik, 1983, vol.43, p. 253.
7. Балука Г. и др. ОИЯИ, P13-84-242, Дубна, 1984.
8. Kroo N. et al. Proc.Symp.Inel.Scatt.Grenoble, IAEA, Vienna, 1972, p. 763.

9. Gladkikh I.A. et al. JINR, 14-9485, Dubna, 1976.
10. Ананьев В.Д., и др. ОИЯИ, P1-83-709, Дубна, 1983.
11. Назаров В.М., Останевич Ю.М. ОИЯИ, P18-12147, Дубна, 1979.
12. Bankwitz P. et al. In Proc. Icotom 7 (7th Int. Conf. of Textures of Materials) Noordwijkerhoút, 1984, p. 473; Betzl M. et al., ibid, p. 753.

СООБЩЕНИЯ, КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ, ПРЕПРИНТЫ И СБОРНИКИ ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИЙ, ИЗДАВАЕМЫЕ ОБЪЕДИНЕННЫМ ИНСТИТУТОМ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЯВЛЯЮТСЯ ОФИЦИАЛЬНЫМИ ПУБЛИКАЦИЯМИ.

Ссылки на СООБЩЕНИЯ и ПРЕПРИНТЫ ОИЯИ должны содержать следующие элементы:

- фамилии и инициалы авторов,
- сокращенное название Института /ОИЯИ/ и индекс публикации,
- место издания /Дубна/,
- год издания,
- номер страницы /при необходимости/.

Пример:

1. Первушин В.Н. и др. ОИЯИ, P2-84-649, Дубна, 1984.

Ссылки на конкретную СТАТЬЮ, помещенную в сборнике, должны содержать:

- фамилии и инициалы авторов,
- заглавие сборника, перед которым приводятся сокращенные слова: "В кн."
- сокращенное название Института /ОИЯИ/ и индекс издания,
- место издания /Дубна/,
- год издания,
- номер страницы.

Пример:

Колпаков И.Ф. В кн. XI Международный симпозиум по ядерной электронике, ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.26.

Савин И.А., Смирнов Г.И. В сб. "Краткие сообщения ОИЯИ", № 2-84, Дубна, 1984, с.3.

Ананьев В.Д. и др.
Импульсный реактор ИБР-2 в 90-е годы

P3-85-187

Кратко рассмотрены итоги 25-летнего развития импульсных реакторов периодического действия типа ИБР в ОИЯИ, их основные преимущества и перспективы совершенствования реактора ИБР-2 в 90-е годы. Обсуждаются также некоторые перспективные направления физических исследований, эффективно использующие особенности импульсного реактора для решений задач в областях физики конденсированных сред, ядерной физики и физики элементарных частиц.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод Т.Ф.Дроздовой

Ananiev V.D. et al.
The Reactor IBR-2 in the 90's

P3-85-187

A short review of the 25 year experience of development and operation of fast periodically pulsed reactors in JINR, their advantages as well as the trends of further improvement of the reactor IBR-2 in the 90's are presented. The most interesting applications of pulsed reactors in condensed matter research, nuclear physics and elementary particle physics are out-lined in brief.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985