

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Учреждение Российской академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН



С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов

## Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

Импульсный источник нейтронов: идеология,  
история создания, возможности развития

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1280/2011  
АПРЕЛЬ 2011

МОСКВА 2011 MOSCOW

INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH  
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

Учреждение Российской академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН



С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов

## Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

Импульсный источник нейтронов: идеология,  
история создания, возможности развития

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1280/2011

АПРЕЛЬ 2011

МОСКВА

2011

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences  
60-th October Anniversary prospect 7a,  
Moscow 117312, Russia

Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерных исследований РАН  
проспект 60-летия Октября, 7а  
Москва, 117312

С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов  
Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

Импульсный источник нейтронов:  
идеология, история создания,  
возможности развития

Дано описание импульсного источника нейтронов Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, его особенностей, предыстории развития, логики принятия решений и путей его возможной модернизации. Использование высокоэнергетических протонных пучков для производства нейтронов из ( $p, xn$ ) – реакций ('spallation' источники) в мишени из вольфрама дает возможность исследовать образцы конденсированных сред, конструкционных материалов, биологических объектов различными методами нейтронного рассеяния, включая изучение динамики и кинетики процессов структурных и фазовых изменений.

С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов  
Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

Импульсный источник нейтронов:  
идеология, история создания,  
возможности развития

We present below a description of the pulsed neutron source at the Neutron Complex of the INR RAS, its special features, the prehistory of development, logic of making decisions and methods of its possible modernization. Use of high current proton beams for the production of neutrons from ( $p, xn$ ) - reactions ("spallation" sources) in the target made of the tungsten gives the possibility to investigate samples of the condensed media, the structural materials, the biological subjects by different methods of neutron scattering, including the study of dynamics and kinetics of the processes of structural and phase changes.

С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов  
Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

Импульсный источник нейтронов:  
идеология, история создания,  
возможности развития

Препринт ИЯИ – 1280/2011

АПРЕЛЬ 2010

Подписано в печать 01.03.2011

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 2,4. Зак. № 22146

Тираж 230 экз. Бесплатно

Печать цифровая  
Издательский отдел

Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерных исследований РАН

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-154-9

© Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерных исследований РАН, 2011  
Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences, 2011

**Для чего нужны нейтроны, и чем их больше — тем лучше?**

**Почему некоторые сплавы обладают эффектом памяти?**

**Какие материалы могут использоваться для хранения водорода – топлива будущего?**

**В чем секрет свойств магнитных материалов?**

**Почему материалы могут стать сверхпроводящими?**

**Как можно снизить стоимость конструкций из бетона одновременно с улучшением его свойств?**

*Для ответа на эти и другие вопросы в качестве зонда используются нейтроны.*

Все дело в фундаментальных свойствах нейтронов и, прежде всего в отсутствии электрического заряда, наличии собственного магнитного момента (спина) и в большом среднем времени жизни в свободном состоянии. Немалое значение имеют также возможности получения пучков нейтронов в широком диапазоне энергий. Последнее обстоятельство позволяет «прощупать» среду на наличие и свойства неоднородностей с размерами от субатомных до десятков нанометров.

Вот почему в настоящее время, в постиндустриальную эпоху, когда перспективы экономического прогресса в значительной мере связаны с развитием и освоением наукоемких технологий, в мире широким фронтом ведется освоение и развитие нейтронных методов исследования конденсированных сред, включая конструкционные материалы и материалы нанотехнологий.

Значительные вложения сделаны в развитие установок по применению методов нейтронного рассеяния. В ближайшие несколько лет США, Япония, Австралия завершат создание нейтронных установок, стоимость сооружения каждой из которых составляет не менее одного миллиарда долларов США. Это отражает значимость развития нейтронных методов исследования вещества для совершенствования существующих технологий и поиска новых возможностей создания материалов с заданными

свойствами. Наряду с созданием крупномасштабных установок для нейтронных исследований, МАГАТЭ ведется проработка вопросов развития нейтронных исследований в развивающихся странах [1].

Создание нейтронных центров нового поколения требует значительных затрат. Надо иметь современный ускоритель заряженных частиц. Этот ускоритель, как правило — протонный, должен обеспечить высокую интенсивность первичного пучка с тем, чтобы выбивать из мишени как можно больше нейтронов. Но нейтроны не должны быть слишком быстрыми, чтобы могли в процессе рассеяния в исследуемом веществе «чувствовать» как расположение атомов и молекул среды, так и их движение. Нет другого такого экспериментального метода, который дал бы нам столь подробную информацию о строении и движении комплексов атомов в мире вокруг нас. Диапазон применения нейтронных методов исследований становится все более широким и простирается, например, от изучения белков или биологических процессов в клеточных мембранах, включает изучение катализаторов, батарей и магнитных веществ, а также определение срока службы турбинных лопаток и газовых турбин при выработке энергии. Можно упомянуть также значимость нейтронных методов исследований и для решения фундаментальных и еще нерешенных проблем физики конденсированных сред: системы тяжелых фермионов, изоляторы Кондо, системы с флуктуацией валентности, высокотемпературные сверхпроводники.

#### Нейтронные исследования на основе ускорительно-управляемых нейтронных источников

Импульсные источники нейтронов нового поколения на основе высокоинтенсивных ускорителей протонов средних энергий (0.45–1.3 ГэВ) становятся одними из важнейших инструментов исследования вещества, конденсированных сред (~ 95% времени работы ускорителей), ядерной физики (~ 2 — 3%) и работ прикладного характера (~ 2%). Основное преимущество нейтронных источников такого типа состоит в следующем:

- Ядерная безопасность.
- Широкий спектр энергий нейтронов от холодных до нескольких сотен мегаэлектронвольт.

- Возможность использования в экспериментах времяпролетной методики для сепарации нейтронов по энергиям и изменения временных и частотных характеристик пучков нейтронов в широких пределах.
- Использование ускорителя для решения широкого круга задач и реализации нескольких разноплановых научных программ одновременно (например, проведение исследований в области физики конденсированного состояния, ядерной и нейтронной физики, исследования в области физики промежуточных энергий – мезонных и нейтринных исследований, исследований в области ядерной энергетики – разработки электроядерных источников энергии и трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики, исследований в области медицинской физики и производства нейтронно–дефицитных радиоактивных изотопов, и.т.д.).
- Достаточно длительный срок работы мишеней источника в интенсивных потоках ускоряемых частиц и их дешевизна в сравнении с активной зоной реактора.
- Низкое энерговыделение в расчете на один произведенный нейтрон в реакциях взаимодействия протонов средних и высоких энергий с материалом мишени (spallation процесс) по сравнению с реакцией деления. *Это обстоятельство позволяет получать в источниках нейтронов на основе высокоинтенсивных ускорителей существенно более высокие локальные плотности потоков нейтронов, чем в ядерных реакторах при сопоставимых плотностях тепловыделения.*

Недостатком современных нейтронных источников на основе ускорителей является большая толщина биологической защиты (~8–10 м), связанная с наличием в спектре доли каскадных нейтронов вплоть до энергии исходного протонного пучка.

*Потребность в новых высокоинтенсивных источниках обусловлена, прежде всего, задачами физики твердого тела, молекулярной физики и химии, переходом к изучению процессов в динамике, а, следовательно, получением больших объемов физической информации о процессах, развивающихся за короткий промежуток времени как в микро-, так и в мезоскопических объемах. Иными словами, речь идет об исследованиях процессов на наномасштабах – процессов, которые могут послужить основой нанотехнологий.*

С точки зрения перечисленных позиций, **импульсный** источник на основе протонных ускорителей имеет гораздо больше степеней свободы и, что немаловажно для эксплуатации мишеней, значительно более низкую мощность и, соответственно, среднюю по времени плотность потока нейтронов, чем высокопоточный реактор непрерывного действия.

Это обусловлено тем, что, при использовании наиболее универсальной времяпролетной методики для сепарации нейтронов по энергиям, высокий импульсный поток тепловых нейтронов  $\sim 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>с и выше поддерживается только в течение короткого промежутка времени. В промежутках между импульсами поток нужно снижать практически до нуля (т.е. средняя мощность источника и, соответственно, средний поток нейтронов остаются низкими  $\sim 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с). В реакторных экспериментах импульсы нейтронов создаются с помощью прерывателей, расположенных в нейтронноводах на пучках нейтронов. С точки зрения пучковых экспериментов, в промежутках между импульсами исследовательский реактор практически бесполезно расходует свою мощность. Эти обстоятельства предопределили широкое распространение в наиболее наукоемких странах мира импульсных источников нейтронов на основе протонных ускорителей и создание на их основе национальных исследовательских центров (США, Япония, Великобритания, Швейцария, Канада, проект Европейского источника, проект Китайского нейтронного источника и др.). *Эти же обстоятельства предопределили закрытие проекта высокопоточного реактора (с мощностью  $\sim 100$  МВт) в Ок-Ридже (США) в пользу создания мощного импульсного источника нейтронов SNS на основе протонного ускорителя (Spallation Neutron Source с мощностью  $\sim 5$  МВт), работы по которому находятся в завершающей стадии.*

### **Почему используются импульсы нейтронов?**

Практически любой источник производит не моноэнергетические нейтроны, а спектр нейтронов, обогащенный холодными, тепловыми или резонансными нейтронами в зависимости от системы замедлителей и решаемых задач. *Наибольшую информацию об изучаемой среде несут нейтроны, длина волны которых (или, по крайней мере, величина обратная*

*передаваемому импульсу при малоугловом рассеянии) соизмерима с характерными размерами объектов, будь то ядро атома, биологическая молекула или нановключение в материале. Поэтому необходимо иметь нейтроны с определенной энергией, соответствующей задаче исследования. Для выделения моноэнергетических нейтронов в каждом диапазоне спектра существуют свои методы монохроматизации. Наиболее универсальный способ это время — пролетная методика, суть которой состоит в том, что в каждый момент времени  $t$  после импульса нейтронов, на детектор, удаленный от источника на расстояние  $L$ , приходят нейтроны с определенной энергией, определяемой соотношением*

$$E = \frac{mV^2}{2} = \left( \frac{72.3L}{t} \right)^2,$$

где энергия выражена в электронвольтах, расстояние — в метрах, время — в микросекундах. То есть при известных значениях расстояния от источника до детектора и времени, затраченного нейтроном для преодоления этого расстояния, однозначно определяется энергия нейтрона.

В случае изначально непрерывного потока нейтронов, например от ядерного реактора, для получения *импульсов нейтронов* прибегают к специальным устройствам – внешним прерывателям потока нейтронов, создающим импульсы нужной продолжительности. В этом случае с точки зрения времяпролетного эксперимента в промежутках между импульсами реактор бесполезно расходует свою мощность. Поэтому гораздо экономичнее сделать изначально импульсный источник нейтронов, обеспечивая максимально возможный поток нейтронов в импульсе и нулевой между ними. Наиболее просто это сделать с помощью ускорителя, работающего в импульсном режиме. В зависимости от **длительности импульса**, частоты их следования и типа мишеней и замедлителей, в которых изначально короткий импульс заряженных частиц трансформируется в импульсы нейтронов, можно решать различные задачи нейтронной физики.

Данные по существующим и создаваемым нейтронным источникам приведены на рисунке 1. Видно, что параметры УУНИ начинают конкурировать с высокопоточными реакторами, например с RHF института Лауэ-Ланжевена в Гренобле, где поток тепловых нейтронов составляет

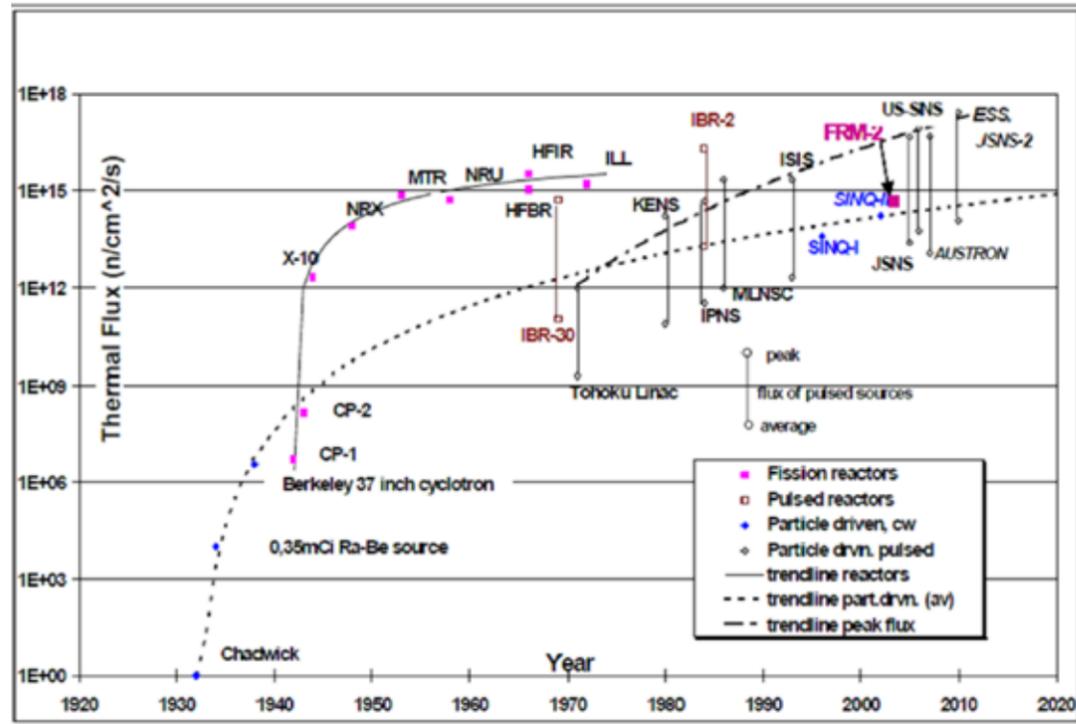


Рис. 1. Развитие нейтронных источников по данным МАГАТЭ. Общая тенденция: преимущественное развитие нейтронных центров на основе высокоэнергетических ускорителей протонов начиная с начала 70-х годов 20 века [1]

величину порядка  $1,3 \times 10^{15} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Реализация проектов крупных УУНИ осуществляется в тесной кооперации национальных центров.

В Японии создание нейтронного источника JSNS и установки для исследования трансмутации ведется в рамках проекта на высокие энергии J-PARC благодаря объединению опыта JAERI в инженерии ядерной энергетики и опыта KEK в ускорительной технике и эксплуатации нейтронного источника KENS.

В США степень кооперации при создании SNS еще выше. В создании центра принимают участие четыре национальные лаборатории: Lawrence Berkley (инжектор), Los Alamos (традиционный линейник), Jefferson (сверхпроводимая часть), Brookhaven (накопительное кольцо). Oak Ridge и Argonne работают над созданием мишенного комплекса и измерительных нейтронных установок первой очереди.

В 2009 году было принято решение о подготовке к реализации проекта Европейского источника ESS в Швеции (Лунд).

Нейтронный источник нового поколения CSNS создается и в Китае.

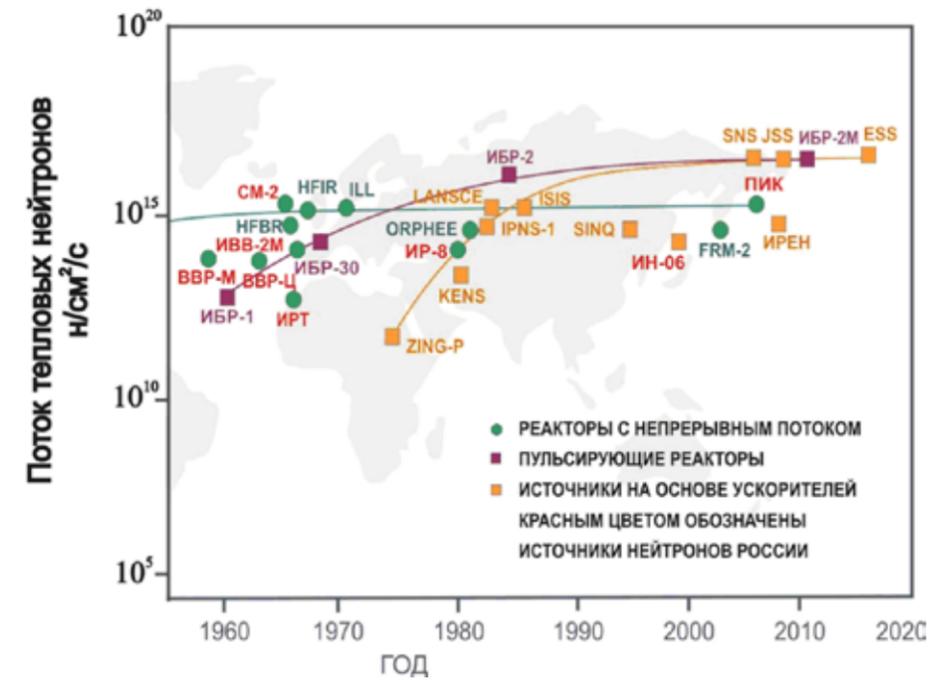


Рис. 2. Место российских источников нейтронов в общей картине развития нейтронных центров в мире [3]

Первый действующий источник был создан в Аргонской национальной лаборатории США в 1982 г.

На рисунке 2 приведены сравнительные данные нейтронных источников России и зарубежных нейтронных центров.

В Институте ядерных исследований РАН на основе высокоэнергетического линейного ускорителя протонов Московской мезонной фабрики (ММФ) сооружен комплекс экспериментальных установок для нейтронных исследований, включающий в себя импульсный источник тепловых нейтронов ИН-06, установку для радиационного материаловедения РАДЭКС и высокоинтенсивный нейтронный спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ. В СССР инициатором и основоположником создания импульсного источника на основе протонного пучка мезонной фабрики был Ю.Я.Стависский[2].

Физический пуск ИН-06 и установки РАДЭКС был проведен в конце 1998 г. при энергии протонного пучка 209 МэВ, среднем токе не более 0,1 мкА, длительности протонного импульса 60 мкс и частоте 1 Гц. В декабре 2000 года успешно запущен 100-тонный высокоинтенсивный СВЗ.

## Назначение импульсного источника тепловых нейтронов ИЯИ РАН

Импульсный источник нейтронов создавался как центр коллективного пользования для исследований конденсированных сред, химических, биологических и других объектов.

Движущиеся в среде нейтроны, будучи нейтральными частицами, относительно свободно проникают как в межатомные области изучаемой структуры, так и взаимодействуют с атомными ядрами. По рассеянию нейтронов можно судить о пространственном и изотопном строении вещества. Более тонкое магнитное взаимодействие, из-за наличия собственного магнитного момента нейтронов, позволяет получать информацию о внутренней намагниченности исследуемого образца. Большая (макроскопическая) глубина проникновения нейтронов в вещество позволяет использовать рассеяние нейтронов в сочетании другими методами контроля физических свойств исследуемых образцов, обеспечивающими, например, необходимую температуру, давление или скорость химической реакции. Эта задача решается созданием специализированных нейтронографических установок на нейтронных импульсных источниках.<sup>[4,5]</sup>

Создаваемые в содружестве с другими нейтронными центрами страны нейтронные спектрометры, о которых речь идет в <sup>[4,5]</sup>, позволяют изучать как атомные и надатомные структуры конденсированных сред, так и тепловые колебания атомов и молекул, а также протекание кинетических процессов при различных внешних воздействиях и изотопном составе вещества.

Исторически сложились две стадии развития импульсного нейтронного источника. Первая очередь включала в себя создание мишенного комплекса, получившего название ИН-06. Вторая стадия предполагает развитие возможностей импульсного нейтронного источника, его экспериментальной базы, и модифицированный комплекс ИН-06 получил условное название ИН-10. Ниже дано описание существующей и проектируемой инфраструктуры импульсного источника нейтронов ИЯИ РАН.

### Как получают интенсивные пучки нейтронов?

Нейтроны входят в состав атомных ядер и для их высвобождения надо их оттуда выбить или инициировать ядерную реакцию с развалом ядра.

Деление ядер используется в ядерных реакторах. Интенсивность получаемых потоков нейтронов при этом определяется, прежде всего, мощностью реактора, и здесь возникают конструктивные ограничения на достижимые потоки нейтронов (см. рис.1). Представляющие интерес для развития термоядерной энергетики источники нейтронов с энергиями  $\sim 14$  МэВ пока уступают ядерным реакторам, как источникам нейтронов, по доступным потокам нейтронов.

Возможности получения интенсивных потоков нейтронов появились по мере развития техники ускорения заряженных частиц. Физическая суть процесса состоит в множественном рождении нейтронов и других частиц в различных материалах протяженных мишеней (состоящих преимущественно из тяжелых ядер Pb, W, Hg, U...) под действием нуклонов (в первую очередь протонов) высоких энергий ( $\sim 1$  GeV) — в реакциях  $(p, xn)$  или  $(d, xn)$ .

Влетающая в ядро высокоэнергичная частица взаимодействует с отдельными нуклонами ядра, выбивает из ядра быстрые (каскадные)  $n, p, \pi, d, T, \alpha$  и другие частицы, оставляя ядро — остаток в сильно возбужденном состоянии. Снятие возбуждения ядра-остатка происходит за счет эмиссии (испарения)  $n, p, d$ , и более сложных частиц и излучению  $\gamma$ -квантов. Средняя энергия испарительных нейтронов составляет  $\sim 2$  МэВ, они имеют изотропное угловое распределение. Выбитые из ядра каскадные частицы повторяют аналогичный процесс при более низких энергиях. Заряженные частицы быстро теряют свою энергию на ионизацию. Основной размножающей компонентой оказываются нейтроны. В делящихся средах такая цепь ядерных реакций включает также и деление ядер вещества мишени, как нуклонами высоких энергий, так и нейтронами спектра испарения. За счет деления выделяется значительно больше энергии в мишенях по сравнению с мишенями из неделящихся ядер, а также появляются запаздывающие нейтроны. Для импульсных источников нейтронов это нежелательные явления, т.к. увеличивается фон между импульсами.

Схема каскадно-испарительного процесса (spallation process) представлена на рисунке 3. Зависимость выхода нейтронов от энергии первичных протонов в результате spallation процесса в свинце иллюстрируется рисунками 4а и 4б. С ростом энергии протонов происходит увеличение числа вторичных нейтронов. Интенсивность источника нейтронов про-

**Генерация нейтронов в процессе «скалывания» (spallation neutrons)**

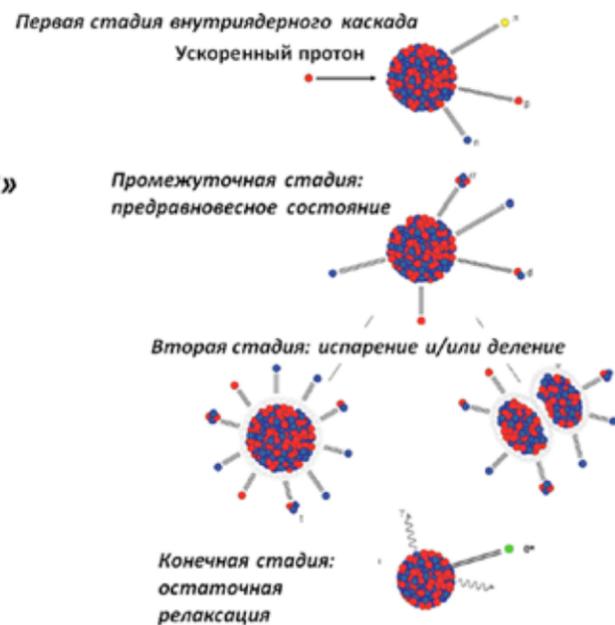


Рис. 3. Результат взаимодействия ускоренных протонов с тяжелыми ядрами: неделящимися (процесс скалывания — слева) и делящимися (процесс деления — справа). Среди вторичных частиц преобладают нейтроны [6].

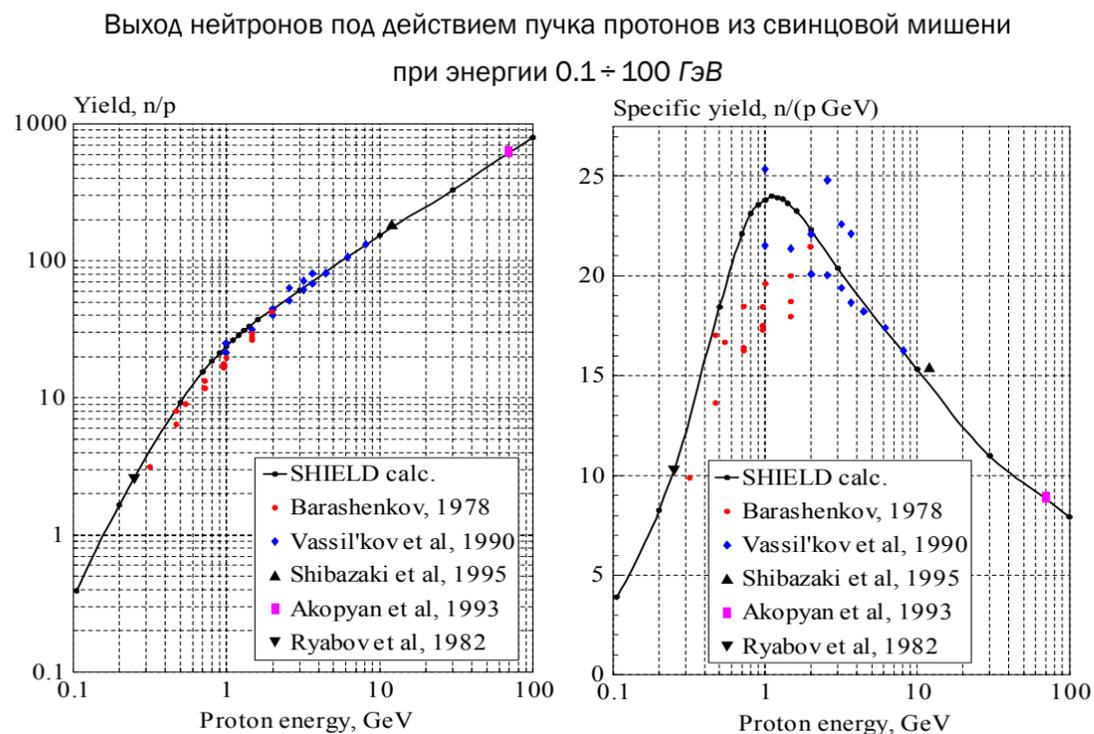


Рис. 4. Генерация нейтронов в процессе «скалывания» [7]: расчетные и экспериментальные данные числа нейтронов на один первичный протон (слева, 4а) и соответствующий удельный выход нейтронов в заданном интервале энергий (справа, 4б).

порциональна току ускорителя и энергии ускоренных протонов. При этом предусматривается необходимость охлаждения мишени для обеспечения работоспособности мишени в течение разумного срока эксплуатации.

Быстрые (испарительные) нейтроны, вылетающие из мишени, попадают во внешние замедлители. В зависимости от конструкции и предназначения замедлителей в них можно получить спектры обогащенные холодными, тепловыми, или эпитепловыми нейтронами.

С точки зрения эффективности получения нейтронов в расчете на один первичный протон в пучке ускорителя наибольший интерес представляют энергии протонов  $\sim 1,2$  ГэВ. Дальнейшее повышение энергии неэффективно из-за возрастания роли конкурирующих процессов. По этой причине ультрасовременные проекты нейтронных источников spallation-типа (Spallation Neutron Sources) создаются на базе сильноточных ускорителей протонов на энергии  $\sim 1,2$  ГэВ. Наряду с этой тенденцией, в мире модернизируются и расширяются возможности существующих нейтронных источников.

Следует также отметить, что в источниках на основе протонных пучков производство одного нейтрона, покидающего мишень, сопровождается существенно меньшим тепловыделением. Так например, протон с начальной энергией 1 ГэВ производит в толстой вольфрамовой мишени  $\sim 18$  н/р, при этом  $\sim 60\%$  энергии протона выделяется в качестве тепла в мишени, т.е. производство одного нейтрона, покидающего мишень, сопровождается  $\sim 33$  МэВ [6]. В реакции деления на производство одного нейтрона, покидающего активную зону реактора, затрачивается  $\sim 133$  МэВ тепловой энергии. Следовательно, при сопоставимых плотностях тепловыделения в мишени протонного ускорителя и активной зоне реактора, локальная плотность потока нейтронов в источниках нейтронов может превосходить таковую в ядерных реакторах в 3-4 раза.

**Комплекс линейный ускоритель ИЯИ РАН — нейтронные источники**

Работу Нейтронного комплекса ИЯИ РАН обеспечивают сильноточный линейный ускоритель и технологические системы экспериментального комплекса [8, 9].

### Линейный ускоритель

Основу ускорительного комплекса составляет линейный ускоритель со следующими проектными параметрами:

- ускоряемые частицы – протоны и ионы  $H^-$ ,
- энергия – 600 МэВ,
- средний ток – 500 мкА,
- импульсный ток – 50 мА,
- длительность импульса – 100 нс (реально до 200 нс),
- частота повторения импульсов – 100 Гц.

Ускоритель включает в себя два инжектора (ионы  $H^+$  и  $H^-$ ) на энергию 750 кэВ, инжекционный тракт, начальную часть ускорителя до энергии 100 МэВ и основную часть до энергии 600 МэВ.

Начальная часть включает пять ускоряющих резонаторов с трубками дрейфа, работающих на частоте 198,2 МГц, основная – 27 четырехсекционных резонаторов с шайбами и диафрагмами на частоте 991 МГц. Предусмотрен промежуточный вывод пучка с энергией 160 МэВ.

В ближайшее время будет обеспечена возможность одновременной работы различных нейтронных мишеней с использованием пучка ионов  $H^-$  одновременно с пучком протонов.

Первый ускоренный пучок до энергии 20 МэВ в одном резонаторе с трубками дрейфа был получен в конце 1988 года. Энергия 100 МэВ была получена в 1990 году, 160 МэВ — в 1991 году, 250 МэВ — в 1992 году. Далее шло постепенное увеличение энергии по мере поступления клистронов КИУ-40 для системы ВЧ питания основной части ускорителя. Максимальная энергия 502 МэВ была достигнута в 1996 году и определялась количеством имеющихся в наличии работающих клистронов. Далее выпуск клистронов был приостановлен. По мере выхода клистронов из строя максимально достижимая энергия уменьшалась и к концу 2001 года снизилась до 209 МэВ. Следует отметить, что в стране возобновляется производство клистронов и ожидается возможность ежегодного выпуска нескольких приборов.

Регулярная работа ускорителя на физические и прикладные задачи началась в 1993 году. В настоящее время ускоритель реально обеспечивает следующие параметры ускоренного пучка:

- Энергия – до 209 МэВ.
- Импульсный ток – до 16 мА.

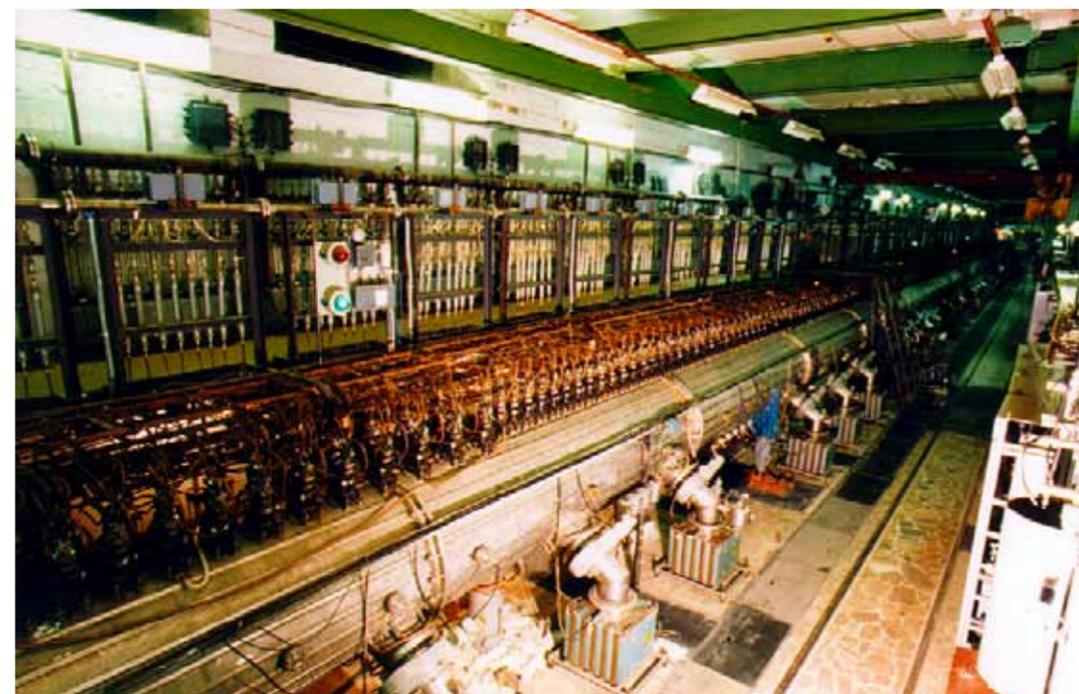


Рис. 5. Начальная часть ускорителя ионов водорода, обеспечивающего работу нейтронного комплекса

- Частота повторения импульсов – до 50 Гц.
- Длительность импульса – до 200 нс.
- Средняя интенсивность ускоренного пучка – до 150 мкА при энергии 160 МэВ и до 50 мкА при энергии 209 МэВ.

Относительно средней интенсивности следует отметить, что все импульсные системы ускорителя, включая инжектор и систему ВЧ-питания, работают с частотой повторения 50 Гц. Величина среднего тока, которая реально получается при максимально возможном импульсном токе, частоте повторения и длительности

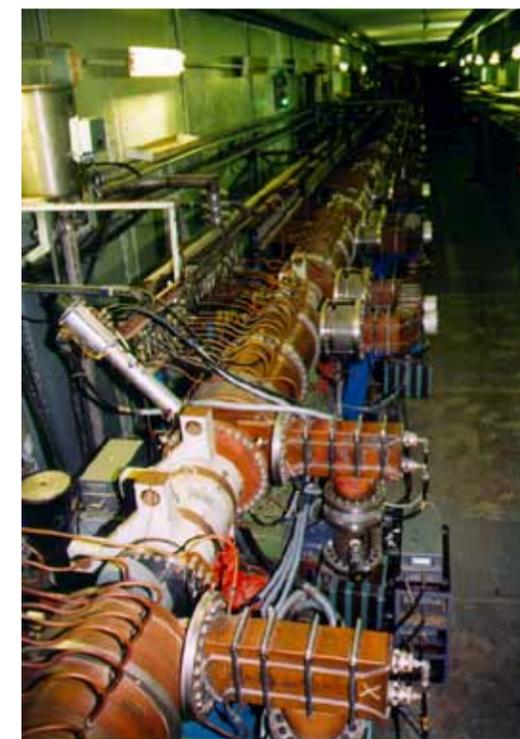


Рис. 6. Основная часть ускорителя на энергию до 600 МэВ



Рис. 7. Пульта управления сильноточным ускорителем

импульса составляет 150 мкА. В процессе работы с сильноточным пучком непрерывно контролируются параметры основных систем ускорителя, а также характеристики пучка, такие как ток, потери, стабильность энергии и при необходимости ее абсолютное значение.

В настоящее время существуют несколько задач, направленных на поддержание и развитие ускорителя:

- увеличение частоты повторения импульсов тока пучка до проектной величины 100 Гц, что позволит удвоить интенсивность ускоряемого пучка;
- увеличение энергии протонов по мере поступления клистронов до 500 МэВ.

#### Экспериментальный комплекс

В состав экспериментального комплекса входят следующие установки [10, 11]:

- Каналы транспортировки протонных пучков.
- Комплекс источников нейтронов (ИН-06, второй свободный бокс, РАДЭКС, СВЗ-100).
- Каналы вторичных пучков и нейтронные спектрометры.
- Источники питания и системы, обеспечивающие работу экспериментального комплекса (специальная вентиляция, водоснабжение, временные хранилища источников и отработанных радиоактивных элементов конструкций и т.д.)

Экспериментальный зал (рис. 9) имеет размеры 60×130 м<sup>2</sup>. В основу здания заложена монолитная плита толщиной 2,5 м, обеспечивающая геодезическую стабильность оборудования и защиту грунта и грунтовых вод от активации. Защита каналов и установок в основном состоит из бетонных блоков с плотностью 3,5 т/м<sup>3</sup>. Объем защиты позволяет транспортировать в зале пучки с высокой интенсивностью.



Рис. 8. Здание экспериментального комплекса ИЯИ РАН, где размещены нейтронные установки



Рис. 9. Расположение объектов экспериментального комплекса (систем проводки пучков, биологической защиты, нейтронных мишеней и нейтронографических установок на нейтроноводах [12, 13]).

В настоящее время из запланированных пяти функционируют три линии протонного канала:

- на ловушку пучка, которая переоборудована в нейтронный источник для времяпролетных экспериментов;
- одна из двух линий на импульсный источник нейтронов ИН-06;
- ветка канала протонов на спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце.

При наличии пучка ионов  $H^+$  возможна одновременная работа всех веток протонного канала.

При создании инфраструктуры экспериментального комплекса предполагалось создание накопителя-группирователя — растяжителя для изменения длительности протонных импульсов в широком диапазоне в соответствии с требованиями экспериментов.

#### **Конструкция и место расположения импульсного нейтронного источника**

Первые описания комплекса нейтронного источника содержатся в публикациях [14, 15]. В работе [16] впервые дано описание комплекса с двумя источниками (боксами). Детальное описание импульсного источника нейтронов и мишеней содержится в работах [17, 18, 19].

Комплекс источников нейтронов ИН-06 состоит из двух независимых источников, каждый из которых расположен в своем боксе общей радиационной защиты, и способных работать одновременно. Диаметр боксов в нижней части равен ~1600 мм, высота ~ 4 м (рис.10).

Комплекс источников нейтронов имеет готовые к эксплуатации тепловую и биологическую защиты общей толщиной ~ 10 м, системы водяного охлаждения первого и второго контуров и два бокса для размещения нейтронных мишеней. Большая толщина защиты обусловлена присутствием в спектре нейтронов с энергией до 600 МэВ (начальной энергии протонов).

Внутри массива биологической защиты имеются 19 хранилищ, оборудованных специальной вентиляцией. Они предназначены для промежуточного хранения отработанных радиоактивных корпусов нейтронных источников и ловушек пучка, диаметр которых в нижней части составляет 363 мм, в верхней ~ 432 мм, (глубина шахт ~ 4 м). Имеются также два хранилища диаметром более 1730 мм, предназначенные для хране-

ния корпусов установок. Кроме того, имеются ~ 30 хранилищ диаметром ~ 300 мм и высотой более 2 м, предназначенных для промежуточного хранения отработанных фильтров, которые также могут быть использованы для промежуточного хранения модулей нейтронного источника.

Тепловая защита (прилегающая к боксам охлаждаемая часть биологической защиты) состоит из системы трубок. Межтрубные промежутки засыпаны стальной дробью и пролиты цементом. Минимальное расстояние между трубками составляет 10 см. Через тепловую защиту прокачивается вода первого контура (~ 10% от общего расхода). Слои биологической защиты, непосредственно прилегающие к тепловой защите, сделаны на основе высокотемпературного бетона. Для ограничения возможной активации грунтовых вод непосредственно под тепловой защитой в бетонном основании размещены стальные листы общей толщиной ~ 1 м. К тепловой защите примыкают слои радиационной защиты, изготовленных из чугунных блоков, общей толщиной ~ 2 м. Каньон ионопроводов в пределах радиационной защиты также имеет слой стальной защиты ~ 1 м. Внешние слои радиационной защиты выполнены из тяжелого бетона плотностью ~ 3.5 г/см<sup>3</sup>. Высокая плотность радиационной защиты и ее большая толщина обусловлены присутствием во вторичном излучении мишеней нейтронов высокой энергии, вплоть до энергии исходного протонного пучка.

В массиве радиационной защиты проложены 11 нейтронопроводов, каждый из которых оборудован двумя стальными шиберами гильотинного типа длиной 2 м каждый. Кроме того, второй бокс, в котором предполагалось создать квазистационарный источник нейтронов для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций и прямого изучения n-n рассеяния, просматривается широкоапертурным сквозным каналом.

Асимметрия в размещении мишеней относительно центров боксов обусловлена как предысторией развития всего нейтронного комплекса, так и тем, что в квазистационарном источнике нейтронов в центре тяжеловодного бака должен быть размещен жидкодейтериевый холодный замедлитель [15, 16]. Соответственно, мишень сдвигалась в сторону.

В состав первого контура охлаждения входят: теплообменник, три циркуляционных насоса (два рабочих и один резервный), каждый из которых способен обеспечить расход воды до 90 м<sup>3</sup>/час и система очистки и под-

держания химического состава теплоносителя, состоящая из механических и ионообменных фильтров.

Второй промежуточный контур охлаждения по своим характеристикам во многом идентичен первому. Третий контур охлаждения замыкается непосредственно на градирню.

Трехконтурная система охлаждения комплекса импульсных источников нейтронов и ловушки пучка во многом обусловлена высокой собственной активностью теплоносителя ( $\sim 0.5-1$  Кюри/л) из-за фрагментации ядер кислорода в адронном каскаде.

Для сбора протечек, локализации случайных разливов и смены теплоносителя имеется хранилище жидких радиоактивных отходов, в котором установлены пять емкостей по  $6 \text{ м}^3$  каждая. Хранилище соединено коммуникациями со зданием очистки жидких радиоактивных отходов и битумирования твердых остатков. Верхняя часть радиационной защиты сделана разборной для обеспечения монтажа и демонтажа основного оборудования. Охлаждение мишеней организовано по схеме Фильда, ввод и вывод теплоносителя — сверху.

Инфраструктура нейтронного комплекса имеет довольно большие запасы по тепловой мощности, которая может быть рассеяна системой охлаждения мишеней и радиационной защиты. Остальные системы были созданы также в расчете на перспективу — повышение тока ускорителя до  $1 \text{ МА}$ , возможное использование урановых мишеней с высокими локальными плотностями тепловыделения.

На рис. 10–12 показаны схемы и фотографии радиационной защиты, некоторых элементов инфраструктуры и бокса.

**В первом боксе располагается интенсивный импульсный источник нейтронов**, предназначенный для изучения физики конденсированных сред на внешних пучках нейтронов. Его схема представлена на рис.12 [18, 19].

Источник состоит из следующих основных элементов:

- водоохлаждаемой ампулы высотой  $\sim 4 \text{ м}$ , в нижней части которой расположены мишень, замедлители, отражатель, выше — защитная пробка с каналами для прохода теплоносителя;
- газового бака с вакуумным коленом, обеспечивающего снижение фона отраженных нейтронов на нижнем замедлителе и сопряжение мишени с вакуумной системой ионопровода (в последующих моди-

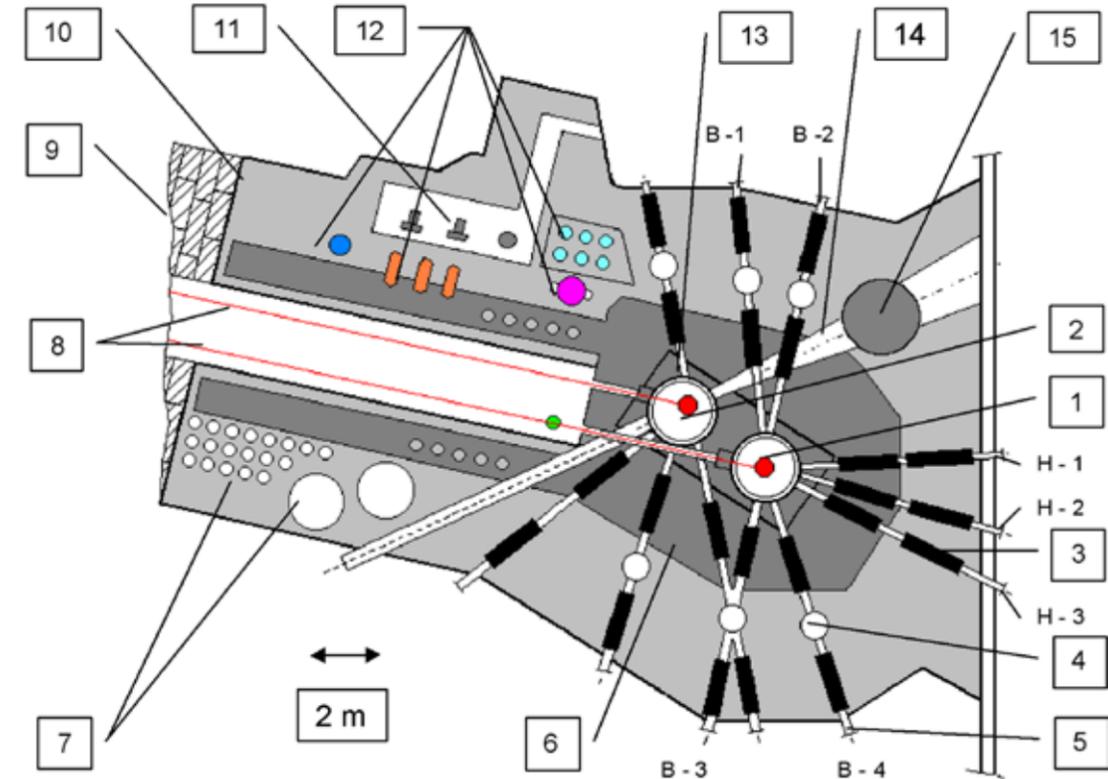


Рис.10. Комплекс источников нейтронов:

1 — бокс импульсного источника нейтронов, 2 — второй бокс, 3 — шиберы, 4 — вертикальные проходки на нейтронотодах диаметром  $0.9 \text{ м}$  для установки дополнительного экспериментального оборудования, 5 — нейтронотводы диаметром  $0.2 \text{ м}$ , 6 — железная защита, 7 — промежуточные хранилища газовых баков и ампул (модулей) нейтронного источника и ловушки пучка, 8 — протонные пучки, 9 — разборная защита, 10 — бетонная защита, 11 — помещение и оборудование специальной вентиляции, 12 — оборудование первого контура охлаждения (насосы, фильтры, теплообменник), 13 — тепловая защита, 14 — широкоапертурный канал, 15 — шибер широкоапертурного канала

фикациях бак предполагается заполнить отражателями с целью увеличения плотности потока нейтронов в расчете на один протон, т.е. повышения качества источника нейтронов);

- дистанционно-разъемного уплотнения, обеспечивающего разборку всего оборудования центральной части нейтронного источника;
- измерительной системы параметров протонного пучка.

Такая схема нейтронного источника является достаточно гибкой, позволяет использовать ампулы с разными мишенями (на основе вольфрама или природного металлического урана и др.) и модифицированными замедлителями, осуществлять полную замену всего оборудования центральной части и проводить модернизацию источника.



Рис.11. Фотография центральной верхней части комплекса источников нейтронов: 1 — бокс импульсного источника нейтронов, 2 — верхняя часть мишенного модуля, 3 — второй бокс, 4 — вертикальные проходки для установки дополнительного экспериментального оборудования, 5 — нейтроноводы - 6 — стальная защита протонных пучков

Для выведения пучков нейтронов из замедлителя к экспериментальным устройствам источник имеет семь каналов диаметром 204 мм. При этом четыре канала направлены в экспериментальный зал, а три — за пределы экспериментального корпуса. Малое количество каналов накладывает специфические требования к установкам и условиям выведения нейтронов: многофункциональность установок и, по возможности, раздвоение пучков нейтронов для увеличения количества используемых установок.

В настоящее время используется мишенный модуль, без бериллиевых отражателей. Принципиальная схема непосредственно мишенного модуля и вольфрамовой мишени для генерации тепловых и резонансных нейтронов приведена на рисунке 13.

Конструкция и геометрия модуля обусловлены следующими обстоятельствами:

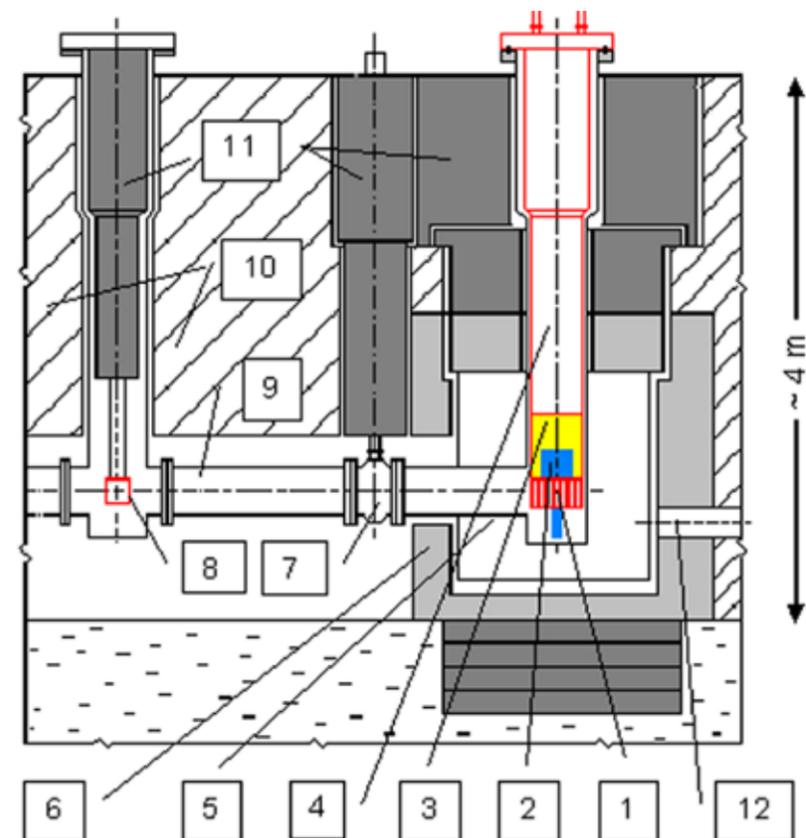


Рис.12. Принципиальная схема импульсного источника нейтронов в защитном боксе. 1 — мишень, 2 — замедлители; 3 — бериллиевый отражатель; 4 — мишенный модуль, в состав которого входят вольфрамовая мишень, замедлители и защитные стальные пробки; 5 — газовый бак (диаметр ~ 1500 мм); 6 — тепловая защита, 7 — дистанционно-разъемное уплотнение, 8 — датчик положения пучка, 9 — ионопровод, 10 — железная защита, 11 — съемные стальные защитные пробки, 12 — нейтроновод

- Крыльевая геометрия расположения замедлителей, позволяет снизить фон от каскадных нуклонов и гамма – излучения мишени.
- Необходимостью получения на верхнем замедлителе импульсов тепловых нейтронов (длительностью ~ 60 мкс при использовании накопителя-группирователя) для исследований в области физики конденсированного состояния.
- Получением на нижнем замедлителе коротких импульсов эпитепловых, резонансных и быстрых нейтронов (длительностью ~ 1 мкс при использовании накопителя-группирователя) для измерения сечений ядерных процессов.

Длительность импульса на верхнем замедлителе значительно выше чем на нижнем. Для исключения влияния верхнего замедлителя на ниж-

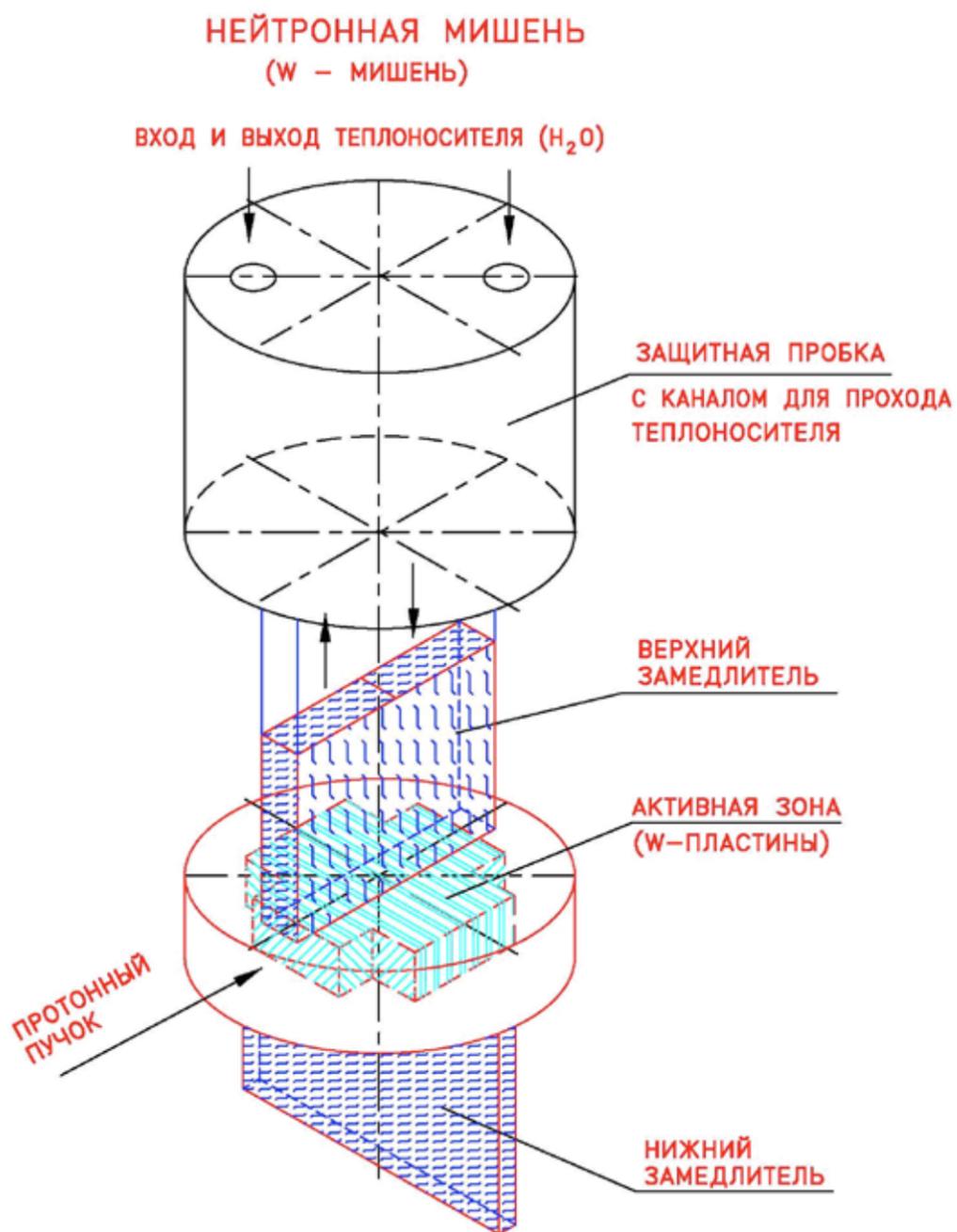


Рис. 13. Схема мишенного модуля с вольфрамовой мишенью и водяными замедлителями

ний замедлитель, мишень сделана в виде плоского параллелепипеда  $\sim 6$  см, через который не проникают тепловые нейтроны. Мишень состоит из 25 вольфрамовых пластин, разделенных каналами для охлаждения. Для предотвращения затягивания импульса на нижнем замедлителе за счет отраженных нейтронов от стенок защиты, нижний замедлитель раз-

мещен внутри газового бака. Предусматривались также другие меры для исключения затягивания длительности импульса. Плотность потока тепловых нейтронов на поверхности верхнего замедлителя для пучка протонов с энергией 600 МэВ представлена в таблице:

Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя для тока 100 мкА, $n/(cm^2 \cdot c)$	Площадь замедлителя
$0.9 \cdot 10^{12}$	$20 \times 20$ (400) $cm^2$ (без отражателей)

Этот мишенный модуль готов, проводка пучка протонов на эту мишень осуществлена в 1998 году. На рис.14 показан соответствующий аппаратный спектр нейтронов верхнего замедлителя [19].

Спектр нейтронов источника на поверхности замедлителей представ-

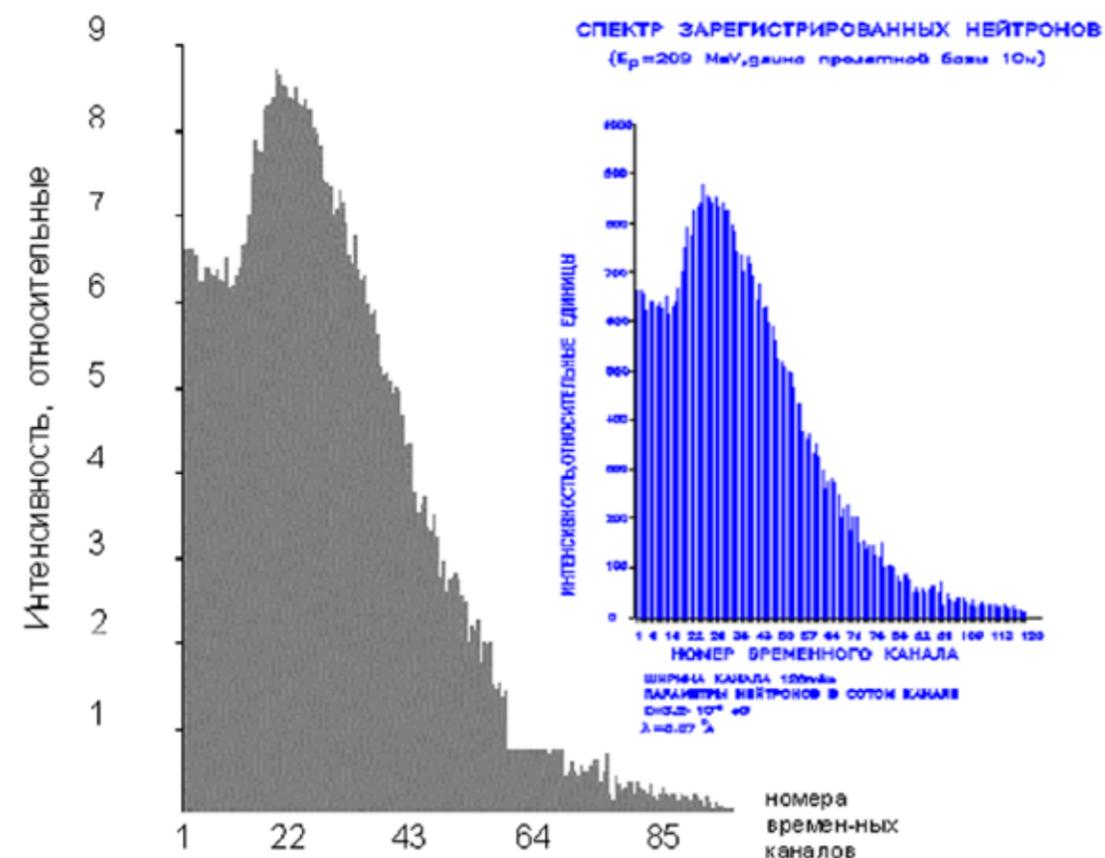


Рис.14. Аппаратурный спектр зарегистрированных нейтронов. Энергия протонов  $E_p = 209$  МэВ, длина пролетной базы между детектором и замедлителем — 10 м, ширина временного канала 128 мкс, параметры нейтронов в сотон канале —  $E_n = 3.2 \cdot 10^{-3}$  эВ,  $\lambda = 5.07$  Å

ляет собой линейную комбинацию теплового спектра и спектра замедления. В зависимости от задач эксперимента и толщины замедлителя возможно перераспределение составляющих его компонент в ту или иную сторону.

**Нейтронный источник второго бокса.** В настоящее время второй бокс свободен. В нем возможно создание второго источника холодных и тепловых нейтронов.

В качестве альтернативы прорабатываются вопросы создания демонстрационного стенда – прототипа электроядерной установки для решения проблем замыкания ядерного энергетического цикла [20, 21, 22, 23]. Наличие нейтронпроводов в массиве радиационной защиты позволило бы одновременно использовать стенд в качестве источника нейтронов.

Создание второго источника позволит увеличить число действующих нейтронных каналов и, соответственно, спектрометров более чем в два раза, что позволило бы создать полновесный центр коллективного пользования для научных организаций Москвы и Московского региона.

#### Некоторые отличительные особенности ускорительно-накопительной системы ИЯИ РАН

Следует отметить, что только сочетание линейного ускорителя протонов, накопителя-группирователя, нейтронопроизводящей мишени с тонким или отравленным водородосодержащим замедлителем и длиннопролетными нейтронводами ( $\sim 300 \div 500$  м), способно составить конкуренцию электронным ускорителям при получении экспериментальных данных по ядерным сечениям в области резонансных и быстрых нейтронов. Патент на изобретение этой структуры принадлежит советским ученым [24, 25]. Без подобной структуры работы в области ядерной физики с использованием протонных ускорителей носили бы существенно более узкий (фрагментарный) характер, сосредоточенные преимущественно в около тепловой области энергии нейтронов (холодные, тепловые и эпитепловые нейтроны).

Отметим, что с помощью электронных ускорителей с короткой длительностью импульса  $\sim 20$  нс и высокой частотой повторения  $1440$  Гц, интенсивностью  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  н/с (типа ORELA [26]) был получен основной объем ядерных данных в области энергии нейтронов  $\sim 10$  кэВ  $\div$   $10$  МэВ,

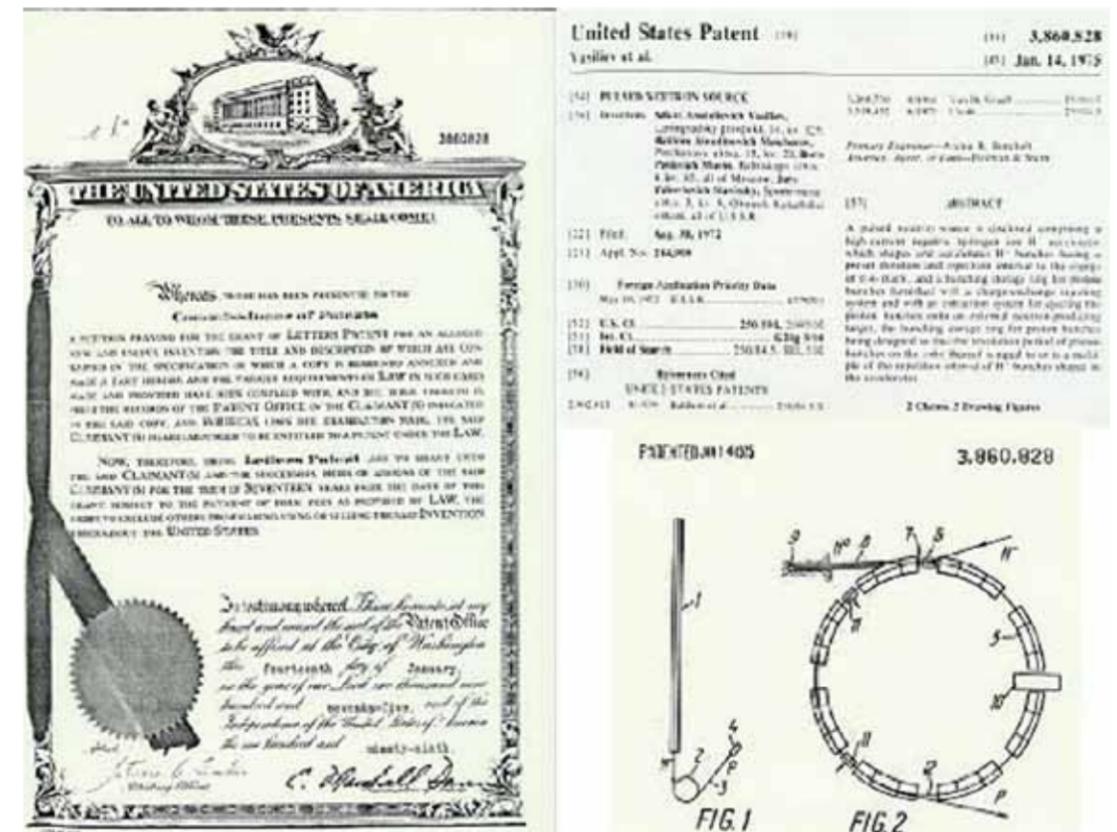


Рис.15. А. А. Васильев, Р. А. Мещеров, Б. П. Мурин, Ю. Я. Стависский. Патент США №3860828. 1975, выданный советским ученым, с описанием линейного ускорителя ионов водорода H<sup>+</sup> на энергию 1 ГэВ (1), накопительного кольца (2) с двухшаговой перезарядкой и бомбардируемой протонами нейтронообразующей мишенью (4).

необходимых для развития ядерной энергетики. В данном случае большой выход нейтронов ( $\sim 20$  n/p против  $0.01 \div 0.1$  в процессе  $e-\gamma-n$  конверсии на мишени электронного ускорителя) и, соответственно, высокая интенсивность источника нейтронов ( $\sim 3 \cdot 10^{16}$  н/с) на основе протонного ускорителя компенсировали сравнительно низкую частоту протонных пучков  $\sim 400$  Гц (в режиме равномерной выдачи импульсов) против  $\sim 1500$  Гц электронного ускорителя.

На основе подобных ускорительно-накопительных структур созданы импульсные источники нейтронов в Лос-Аламосской и Ок-Риджской лабораториях США, причем в Лос-Аламосской лаборатории США созданы и успешно функционируют два независимых источника нейтронов: импульсный источник резонансных и быстрых нейтронов WNR [27] и импульсный источник тепловых и эпитепловых нейтронов (LANSCE [28]) для

исследований в области конденсированного состояния. В остальных нейтронных центрах, созданных на основе сильноточных ускорителей на средние энергии, преимущественно ведутся работы с использованием тепловых и эпитепловых нейтронов в области физики конденсированного состояния.

Другой отличительной особенностью линейного ускорителя на средние энергии в сочетании с накопителем-группирователем является возможность получения гигантских пиковых потоков быстрых нейтронов. В работах [29, 30] было показано, что с при накоплении  $\sim 5$  макроимпульсов ускорителя в накопителе-группирователе и их однооборотном сбросе на размножающую мишень в виде полого цилиндра длиной  $\sim 1 - 1.5$  м, содержащего 90% металлического  $^{235}\text{U}$  или изготовленного из уран — молибденового сплава с коэффициентом умножения на мгновенных нейтронах деления  $\sim 100$ , с внутренним диаметром центральной осевой полости 3 – 10 см, возможно получение редких ( $\sim 1$  импульса в час) гигантских импульсов быстрых нейтронов с пиковым потоком, превышающим  $10^{21} \text{ н/см}^2 \text{ с}$ . При этом аксиальный коэффициент неравномерности нейтронного потока составляет  $\sim 1.2$ , **при этом пиковый поток быстрых нейтронов на оси** порядка  $\sim 10^{21} \text{ н/см}^2 \times \text{с}$ , а на внешней поверхности  $\sim 10^{20} \text{ н/см}^2 \times \text{с}$ , со спектром, подобным спектру импульсных реакторов типа БАРС или Годива (спектры близкие к спектру деления). **Флюенс нейтронов составит  $\sim 1.5 - 2.0 \times 10^{14} \text{ н/см}^2$ .**

Ограничивающим фактором, как и в случае импульсных реакторов, является стойкость активной зоны к динамическим нагрузкам и температуре.

Однако, в отличие от импульсного реактора типа Годива, обладающего наиболее короткой длительностью импульса быстрых нейтронов  $\sim 30 \text{ мкс}$ , подобная размножающая мишень будет превосходить его по пиковому потоку  $\sim 10^2$  раз из-за значительно более короткой длительности импульса ( $\sim 0.3 \div 0.5 \text{ мкс}$ ). Следует отметить, что близкий к однородному на длине  $\sim 1$  м пиковый поток  $\sim 10^{21} \text{ н/см}^2 \text{ с}$  невозможно получить другими способами за исключением ядерного взрыва. Так при использовании для аналогичных целей сильноточного электронного пучка, из-за низкого коэффициента  $e-g-n$  конверсии  $\sim 0.01 - 0.1 \text{ н/е}$  (против  $20 \text{ н/р}$ , генерируемых протонами средних и высоких энергий в протяженной мишени) потребовались бы импульсные токи  $10^5 - 10^6 \text{ А}$  с энергией электронов 30–60 МэВ и специальное мишенное устройство, способное воспри-

нять такие токи, что неизбежно снижает физические характеристики бустера.

Возможные области использования:

- Стенд для изучения ядерной накачки лазеров.
- Стенд для изучения поведения ТВЭЛ в экстремальных ситуациях (наподобие Чернобыльской аварии).
- Радиационные исследования, в импульсных нейтронных и  $\gamma$ -полях.
- Фундаментальная и ядерная физика — изучение двойного захвата нейтронов на стабильных и радиоактивных ядрах в области энергии от тепловых до границы спектра деления. Имеются в виду реакции типа  $(n\gamma, n\gamma)$ ,  $(n\gamma, n\gamma)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n\gamma, \beta, n\gamma)$  и т.д., с образованием промежуточного ядра в возбужденном состоянии и их различные сочетания. Аналогичные ядерные процессы, идущие с участием нейтронов при температурах от нескольких кэВ до нескольких МэВ, встречаются при взрывах сверхновых звезд. Данные в этой области интересны не только с точки зрения изучения радиоактивных ядер, но также необходимы для лучшего понимания процессов, имеющих место в ядерной астрофизике.

Кроме того, возможно изучение следующих процессов: деления и распада уникальных ядер, задержанной протонной активности, задержанного деления, изомерии формы ядер, поиск  $\beta$ -распада с малым временем жизни, оценка вероятности стимулированного  $g$ -излучения, оценка вероятности формирования ядер с аномальной энергией связи (сверхплотные ядра) и наоборот, ядер со слабосвязанными нуклонами типа  $^{11}\text{Li}$  и  $^8\text{He}$  и т.д..

- Исследования «шокового» состояния вещества.
- Прикладные исследования.

#### Пути модернизации нейтронного источника. Проект ИН-10

**Основные пути модернизации и повышения плотности потока нейтронов можно условно разбить на три этапа.**

**1. Параметры нейтронных пучков** могут быть улучшены за счет:

- Увеличения среднего тока ускорителя и энергии протонов в пучке.
- Улучшения структуры пучка (увеличения отношения пикового потока нейтронов к длительности импульса) посредством реализации проекта накопителя-группирователя, ранее заложенного в концеп-

цию экспериментального комплекса. Реализация предусмотренной возможности использования накопителя — группирователя протонов позволило бы генерировать импульсы протонов и, соответственно, быстрых нейтронов длительностью 320 нс и резонансных нейтронов с длительностью  $\leq 1$  мкс со средней интенсивностью в телесном угле  $4\pi \sim 10^{16}$  н/с, что существенно расширило бы возможности источника для проведения фундаментальных исследований в области ядерной физики (ядерные реакции в изолированных резонансах, а также прецизионные измерения нейтронных эффективных сечений материалов, используемых в ядерной энергетике), и значительно улучшило бы параметры источника (за счет сокращения длительности импульса тепловых нейтронов до  $\sim 30\text{--}50$  мкс при использовании полной интенсивности ускорителя) в экспериментах в области физики конденсированного состояния, биологии, химии и т.д.

## 2. Повышение эффективности отражателей мишенного модуля с целью увеличения плотности потока нейтронов в расчете на один протон.

- Развитие нейтронного источника с целью повышения нейтронного потока в расчете на один протон первичного пучка предполагает создание мишенного модуля с бериллиевыми отражателями [31, 32]. В состав модуля введены предзамедлители. Предусмотрена также возможность установки и удаления в верхнем замедлителе специальной гафниевой вставки, выполняющей роль декоплера и поглотителя тепловых нейтронов для сокращения длительности импульса тепловых нейтронов. Т.е. верхняя система замедлитель – отражатель могут использоваться как в связанном так и отравленном состоянии в зависимости от потребностей экспериментов. В этом мишенном модуле существенно пересмотрена концепция замедлителей, что позволяет в дальнейшем позволяет отказаться от газового бака.
- Модернизированный мишенный модуль с бериллиевыми отражателями позволит увеличить плотность потока тепловых нейтронов на верхнем замедлителе **более чем в два раза по сравнению с действующим модулем**, а на нижнем замедлителе  $\sim 6\text{--}8$  раз

**с переориентацией его на работу преимущественно с тепловыми нейтронами.** Одновременно, в несколько раз увеличивается поток эпитепловых нейтронов. Модернизированный модуль может эффективно использоваться также без накопителя – группирователя, т.к. нижний замедлитель также ориентирован преимущественно для работы с тепловыми нейтронами.

На рис. 16 приведена схема мишенного модуля с бериллиевыми отражателями. В таблице приведены расчетные плотности теплового потока

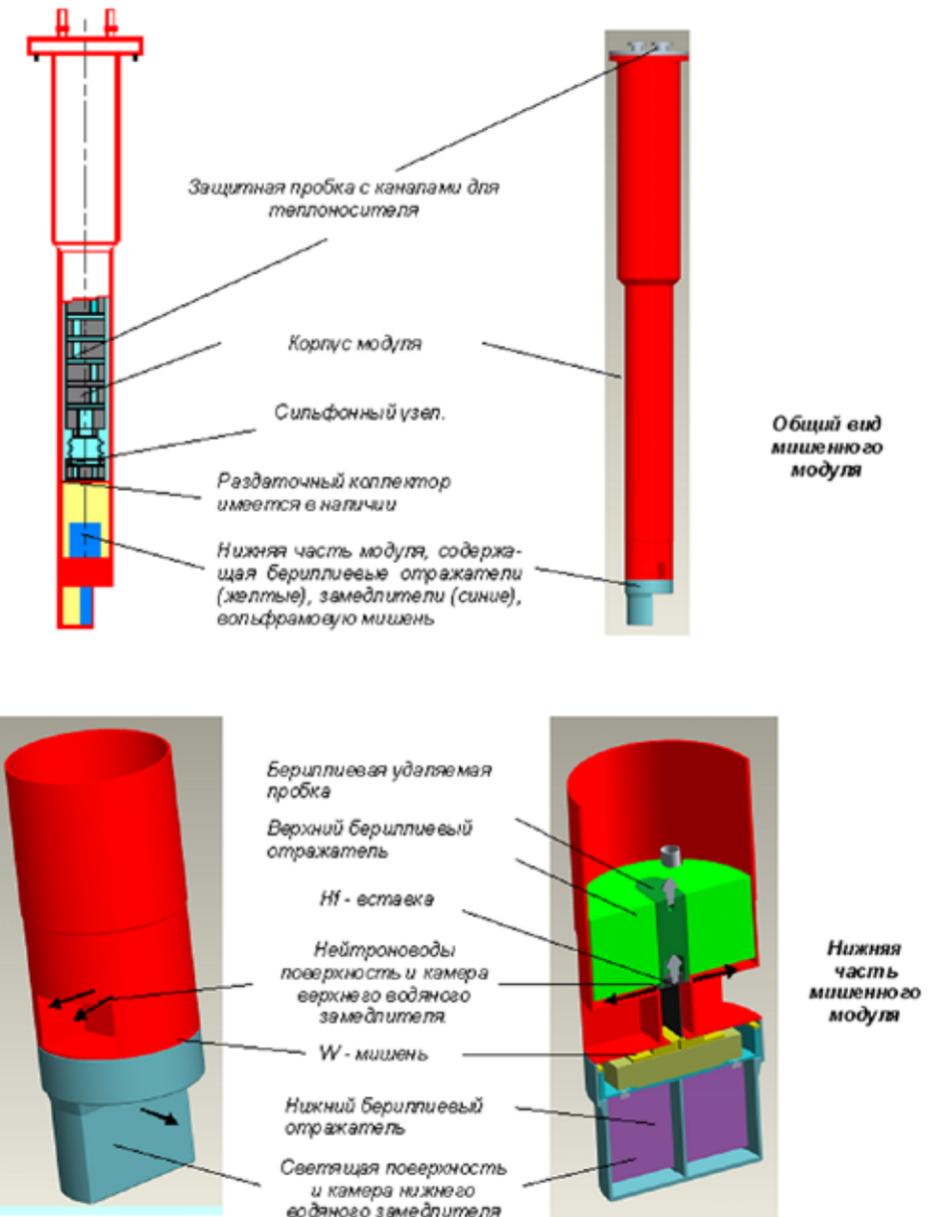


Рис. 16. Общая схема модернизированного мишенного модуля

Данные расчетов выхода нейтронов, генерируемых в модернизированном мишенном блоке, при различных энергиях протонов в первичном пучке

Энергия протонов (МэВ)	400	500	600
	Средняя плотность потока тепловых нейтронов в расчете на: один протон - $n/(см^2 p)$ / для тока 100 мкА - $n/(см^2 с)$		
На поверхности верхнего замедлителя	$2.24 \cdot 10^{-3} / 1.4 \cdot 10^{12}$	$3.24 \cdot 10^{-3} / 2.0 \cdot 10^{12}$	$3.97 \cdot 10^{-3} / 2.5 \cdot 10^{12}$
На расстоянии ~ 10 м от поверхности верхнего замедлителей	$3.65 \cdot 10^{-8} / 2.3 \cdot 10^7$	$5.15 \cdot 10^{-8} / 3.2 \cdot 10^7$	$6.35 \cdot 10^{-8} / 3.9 \cdot 10^7$

на верхнем замедлителе при наличии в мишенном модуле 2 см водных предзамедлителей.

На этом возможность модернизации отражателей в геометрических пределах мишенного модуля практически исчерпана.

- **Дальнейшее повышение эффективности отражателей с целью увеличения плотности потока нейтронов в расчете на один протон** неизбежно требует увеличения их размеров, а, следовательно, модернизации газового бака, т.е. заполнение его отражателями. Заполнение всего пространства газового бака бериллиевыми отражателями со сформированными внутри него каналами для нейтронных пучков позволит увеличить плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей еще **в четыре раза по сравнению с предыдущим вариантом** (модернизированным мишенным модулем с бериллиевыми отражателями) [32].

**3. Создание второго источника нейтронов во втором боксе радиационной защиты.** В настоящее время второй бокс свободен. Размещение в нем второго источника нейтронов позволит увеличить число действующих нейтронных каналов и, соответственно, спектрометров более чем в два раза доведя их количество до 15, с учетом того, что на месте широкоапертурного канала могут быть организованы три обычных нейтронновода.

Эти два источника могут работать одновременно, при условии, что одновременно с протонами будут ускоряться отрицательные ионы водорода Н<sup>-</sup>. Это позволило бы создать многоцелевой центр коллективного

пользования для научных организаций Москвы и Московского региона, сопоставимый по своим возможностям с центрами, созданными на основе реакторов ИБР-2 в ОИЯИ и «ПИК» в ПИЯФ.

В качестве альтернативы прорабатываются вопросы создания демонстрационного стенда – прототипа электроядерной установки для решения проблем замыкания ядерного энергетического цикла [20, 21, 22, 23]. Наличие нейтроннопроводов в массиве радиационной защиты позволило бы одновременно использовать такой стенд в качестве источника нейтронов.

Возможно также создание размножающей мишени с ограниченным умножением. Однако, как для создания демонстрационного стенда, так и для размножающей мишени на основе высокообогащенных делящихся материалов требуется специальное решение.

### Заключение

Выше был представлен материал, отражающий особенности импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06, сооруженного в Институте ядерных исследований РАН в составе крупного комплекса на базе сильноточного ускорителя ионов водорода, получившего ранее историческое название комплекса Московской мезонной фабрики. При реализации проекта ИН-06 получили воплощения идеи и разработки профессора Ю. Я. Стависского – одного из создателей пульсирующего нейтронного источника реакторного типа ИБР [33]. Несмотря на известные трудности с финансированием работ по сооружению полномасштабного комплекса нейтронных источников ИЯИ РАН, в настоящее время работа по вводу в научную эксплуатацию объектов Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, включающего нейтронный источник тепловых нейтронов ИН-06, вступила в завершающую стадию.

Как уже отмечалось, в соответствии с мировой тенденцией импульсные нейтронные источники с протонными драйверами становятся ядром многоцелевых исследовательских центров. В ноябре 2010 года в ИЯИ РАН был осуществлен пуск ряда нейтронографических установок для исследования конденсированных сред [5]. Проведены измерения нейтронных спектров на различных каналах ИН-06 и на различных тестовых образцах [34]. Результаты готовятся к публикации. Ведется проработка возможностей расширения числа исследовательских нейтронографических установок.

## Литература

1. Development opportunities for small and medium scale accelerator driven neutron sources. Report of a technical meeting held in Vienna, 18-21 May 2004. IAEA-TECDOC-1439, February 2005.
2. Ставиский Ю.Я. Импульсные источники нейтронов на основе протонных пучков мезонной фабрики. Препринт ФЭИ N 389. Обнинск, 1973.
3. Исследования наносистем и материалов с использованием синхротронного излучения и нейтронов в России. Современное состояние и перспективы развития. Научный совет Роснауки по использованию синхротронного излучения и нейтронов в нанонауках и материаловедении. 2006 г.
4. Коптелов Э.А., Рябов Ю.В., Алексеев А.А., Сидоркин С.Ф., Грачев М.И., Федченко В.А., Садыков Р.А., Лебедь Ю.Б., Литвин В.С., Кузнецов С.П., Клементьев Е.С., Алексеев П.А., Трунов В.А., Булкин А.П., Ульянов В.А., Аксенов С.Н. Комплекс взаимодополняющих импульсных нейтронных источников, нейтронографических и рентгеновских установок для нанодиагностики Института ядерных исследований Российской академии наук // III Международный форум по нанотехнологиям RUSNANOTECH 2010, 1–2 ноября 2010 г., Москва.
5. Садыков Р.А., Коптелов Э.А., Рябов Ю.В., Алексеев А.А., Грачев М.И., Федченко В.А., Литвин В.С., Кузнецов С.П., Клементьев Е.С., Алексеев П.А., Трунов В.А., Булкин А.П., Ульянов В.А., Аксенов С.Н. Нейтронографические установки на импульсных источниках нейтронов ИЯИ РАН: современное состояние // XXI. Совещание по Рассеянию Нейтронов в Исследованиях Конденсированного Состояния (РНИКС-2010). 16-19 ноября 2010. Москва.
6. Carpenter J. M. 2004. <http://www.neutron.anl.gov/NeutronProduction.pdf>.
7. A.V.Dementyev, N.M.Sobolevsky, Yu.Ya.Stavisky. Neutron Yield from Extended Lead Target under Incident Protons of 0.1 to 100 GeV // Nucl. Instr. Meth. A374 (1996) 70.
8. E.A. Koptelov, L.V. Kravchuk. A Neutron Complex of INR RAS — A Facility Status Report. ICANS-XVIII. 18th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, April 25-29, 2007, Dongguan, Guangdong, P R China.
9. L.V. Kravchuk. Operation of and prospects for MMF accelerator complex // Radiation Physics and Chemistry. 75 (2006) 920-922.  
L.V. Kravchuk. INR proton Linac operation and applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 562 (2006) 932-934.
10. E.A. Koptelov, M.I. Grachev, L.V.Kravchuk, V.A. Matveev e.a. Status of Neutron Complex of INR RAS // in KEK Proceedings 2000-22 JAERI-Conf 2001-0002, ICANS XV, 71-83.
11. A.V. Feschenko, M.I. Grachev, E.A. Koptelov, V.A. Matveev, A.D. Perekrestenko, S.F. Sidorkin, Y.V. Ryabov, S.G. Lebedev. Status of Neutron Complex of INR RAS // The 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, (ICANS-XVI), May 11-15, 2003, Duesseldorf – Neuss, Germany, VI, p. 103–109.
12. E.A. Koptelov, V.A. Fedchenko, O. N. Goncharenko, M. I. Grachev, L. V. Kravchuk, V.A. Matveev, A. D. Perekrestenko, Yu. V. Ryabov, S. F. Sidorkin. Spallation Neutrons at INR RAS – A Facility Status Report // The 17th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, (ICANS-XVII), April 25-29, 2005, Santa Fe, New Mexico, USA, VI, p. 69-76.
13. Матвеев В.А., Коптелов Э.А., Кравчук Л.В. Источники нейтронов ИЯИ РАН: статус и перспективы // XXI Совещание по Рассеянию Нейтронов в Исследованиях Конденсированного Состояния (РНИКС-2010). 16-19 ноября 2010. Москва.
14. Dumesh B. S., Kolmychkov N.V., Koptelov E. A., Lebedev S. G., Sidorkin S. F., Stavisky Yu. Ya. The pulse source of a slow neutron on the basis of proton beam of the meson factory. The preprint INR AS USSR, P-0232. 1982 (in Russian).
15. Bulkin Yu. M., Kazarnovsky M. V., Kolmychkov N. V., Kochnov Ya. K., Lebedev S. G., Lobashev S. G., Sekacheva T. V., Serezhnikov S. V., Sidorkin S. F., Smirnov V. S., Stavisky Yu. Ya., Trushkin V. I., Khmelschikov V. V., Khryastov N. A. The complex of neutron sources for physical researches on the basis of proton beam of meson factory. Neutron physics // Materials of the 6-th All-Union conference on neutron physics. Kiev, October 2-6 1983, v. 4, p. 189.
16. Grachev M. I., Kazarnovsky M. V., Khmelschikov V. V., Khryastov N. A. Kolmychkov N. V., Lobashev V. M., Matveev V. A., Ospanov M. N., Sazanov V. N., Sidorkin S. F., Stavisky Yu. Ya., Trushkin V. I., Vorontsov M. T. Pulsed and quasistationary neutron sources based on proton beam of Moscow meson facility // Proceedings of the Eleventh Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources ICANS-11, V.1, p.454. KEK, Tsukuba, October 22-26, 1990. KEK Report 90-25. March 1991, AMRD.
17. Dementyev A. V., Miroshnichenko V. G., Sidorkin S. F., Sobolevsky N. M., Stavisky Y. Y., Kononov I. I., Maslov A. A., Tretyakov I. I., Trushkin V. I., Rogov A. D. Tungsten and Uranium target for Moscow Meson Factory // 13 th. Meeting of the Inter. Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-13) PSI, Switzerland, p.461, and 1995.
18. Sidorkin S. F., Dementyev A. V., Miroshnichenko V. G., Sobolevsky N. M., Stavisky Yu. Ya., Kononov I. I., Maslov A. A., Tretyakov I. T., Trushkin V. I., Rogov A. D. Pulsed neutron source on the basis of a uranium target at the Moscow meson factory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A370 (1996) 467-476.
19. Sidorkin S., Koptelov E., Perekrestenko A., Stavisky Y., Trushkin V., Sobolevsky N. Neutron targets of moscow meson facility. Status, problems, prospects // 15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources. November 6-9, 2000, Tsukuba, Japan.
20. Сидоркин С.Ф., Коптелов Э.А., Рогов А.Д. Предложение по ADS – установке на основе линейного ускорителя ИЯИ РАН. Препринт ИЯИ РАН 1245/2009, М., 2009.
21. Сидоркин С.Ф., Коптелов Э.А., Кравчук Л.В., Матвеев В.А., Пономарев Л.И., Рогов А.Д. Предложение по ADS — установке на основе линейного ускорителя ИЯИ РАН // Международная научно-техническая конференция «Исследовательские реакторы в 21 веке». НИКИЭТ, Москва, 20-23 июня 2006.
22. Коптелов Э.А., Кравчук Л.В., Марков С., Матвеев В.А., Павлопулос П., Пономарев Л.И., Сидоркин С.Ф. Предложение по ADS – установке на основе линейного ускорителя Московской мезонной фабрики для международных демонстрационных экспериментов по ядерной трансмутации минорных актинидов и долгоживущих продуктов деления // Материалы конференции: «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ –2003)», Обнинск, 2004.
23. Sidorkin S. F., Koptelov E. A., Markov S., Matveev V. A., Pavlopulos P., Ponomarev L. I. The Basic Features of Multipurpose Target-Blanket Complex of Moscow Meson Factory // ICANS-XVI, The 16th Meeting of International Collaboration on Advanced Neutron Sources, May 11-15, 2003, Duesseldorf – Neuss, Germany.

24. Васильев А. А., Мещеров Р. А., Мурин Б. П., Ставиский Ю. Я. Патент США №3860828. 1975.
25. Мещеров Р. А., Рыбалко В. С., Ставиский Ю. Я. Препринт ИЯИ АН СССР П-0114, 1979.
26. Pering N. C., Lewis T. A. // Particle Accelerators Conf., IAEA 1969.
27. Russel G. J., Seegar P. A., Fluharey R. G. Parametric Studies of Target Moderator Configurations for Weapons Neutron Research (WNR) Facility // LA-6020, UC-34C, March 1977.
28. Russel G. J. et al. The LANSCE Target System // ICANS-9, PSI Villigen, Sept. 22-26, 1986.
29. Сидоркин С. Ф., Держиев В. И., Яковенко С. И. О возможности использования протонных пучков средней и высокой энергии для изучения накачки лазеров. П р е - принт ИЯИ АН СССР, П-0665, 1990; Sidorkin S. F., Derzhiev V. I., Yakovlenko S. I. On the possibility of using middle and high energy proton beams to study nuclear pumped lasers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A306 (1991) 240-246.
30. Сидоркин С. Ф., Держиев В. И., Яковенко С. И. Использование протонных пучков средней и высокой энергии для накачки лазеров // Атомная энергия. Т. 71, 1991. С. 436-443.
31. Sidorkin S. F., Lemekhov V. V., Perekrestenko A. D., Zhukov A. P., Trushkin V. I. New Target Module of the Pulsed Neutron Source of INR RAS // 17th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVII), April 25-29, 2005, Santa Fe, New Mexico.
32. Сидоркин С. Ф., Рогов А. Д. Расчеты конфигураций модифицированного мишенного модуля ИНИИ.22.000 импульсного источника нейтронов Московской мезонной фабрики // Фонд ИЯИ РАН, опись №2, ед. хр. 116, М., 2008.
33. Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я. Импульсный режим работы быстрого реактора // Атомная энергия. 1959. Т. 7. № 5. С. 417. Ставиский Ю. Я. Журнал технической физики. 1959. № 29. С. 962.
34. <http://www.inr.ru/>