

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ****РЕАКТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С НЕЙТРОНАМИ**

В конце 1951 г. в американских журналах были опубликованы статьи о двух реакторах на тяжёлой воде, предназначенных для эксперимен-

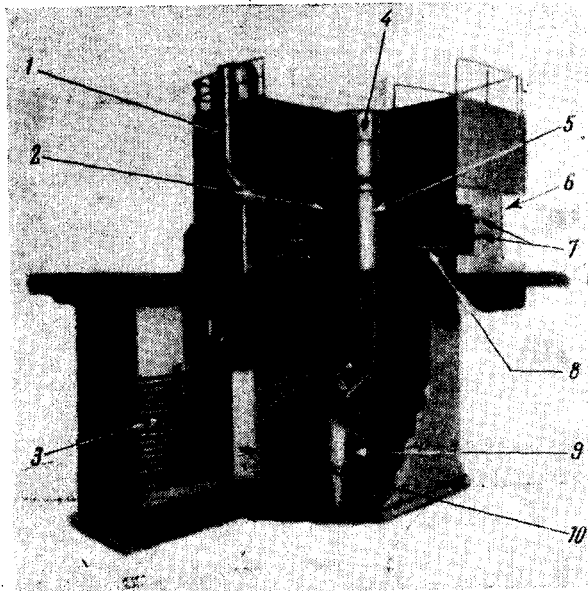


Рис. 1. Схематический разрез норвежского реактора: 1 — выходная труба вентиляционной системы; 2 — графитовый отражатель, окружающий реакторный бак; 3 — первая ступень холодильника; 4 — верхняя экранировка: слои дерева, кадмия и свинца; 5 — реакторный бак; 6 — отверстие для термической колонки; 7 — отверстия, ведущие к счётчикам; 8 — трубки для облучения; 9 — резервуар для тяжёлой воды в подвальном помещении; 10 — стенка между подвалом и колодезем.

тальных целей. Первый — норвежский реактор, недавно построенный в Келлере близ Осло *), и второй — американский, под названием NRX,

*) Dahl and Randers, *Nucleonics* 9, № 5, 5 (1951); *Scientific American* 185, № 6, 31 (1951).

в системе чок-риверского ядерного центра на реке Оттава, в 180 км от города того же названия, работающий уже 4 года *).

В настоящей заметке приводится описание этих реакторов на основе данных, опубликованных в указанных статьях.

Первый из описываемых реакторов был запущен в начале августа 1951 г. Используемая в нём тяжёлая вода — норвежского производства, уран был предоставлен Голландией из довоенных запасов. Рабочая мощность реактора — 100 кВт, хотя он может работать и на несколько большей мощности. При уровне 100 кВт интенсивность потока нейтронов составляет $3 \cdot 10^{11}$ нейтронов/см²·сек. Основные черты конструкции этого

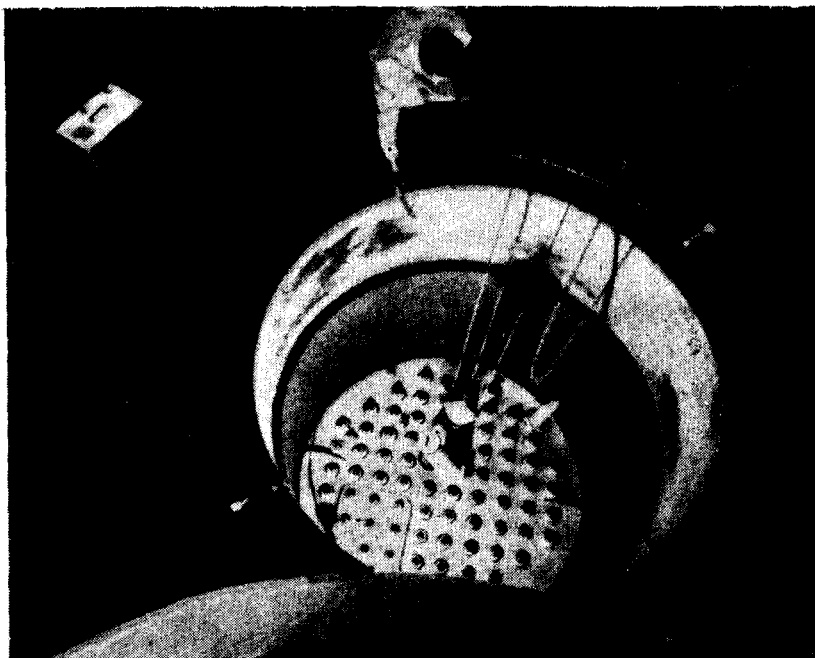


Рис. 2. Вид на верхнюю плиту через отверстие в защите. Снимок сделан летом 1951 г. при пробных испытаниях.

реактора аналогичны соответствующим реакторам, имеющимся в Канаде, во Франции, в США. Схема реактора приведена на рис. 1.

Тяжёлая вода заключена в тонкостенном алюминиевом баке, окружённом графитовым отражателем и бетонной защитой. Уран находится в алюминиевых трубках, расположенных вертикально внутри реакторного бака. Тепло, выделяющееся при делении урана, отводится циркулирующей тяжёлой водой, проходящей через холодильник, находящийся вне бетонной защиты. Для управления работой реактора исполь-

*) Levis, Physics Today 4, № 11, 12 (1951).

зуются кадмиевые пластины, скользящие между отражателем и реакторным баком.

Реакторный бак, содержащий 7 тонн тяжёлой воды, имеет диаметр 2 м и сварен (в аргоновой дуге) из листов алюминия 99,5-процентной чистоты. Сам бак приварен к верхней плите, в которой закрепляются урановые колонки (см. ниже). Дно бака не поддерживается снизу; он опирается кромкой верхней плиты на край круглого отверстия в верхней части бетонной защиты. Вес бака со всем содержимым равен примерно 11 т. Верхняя плита двойная, её наружная и внутренняя поверхности соединены короткими алюминиевыми тубингами общим числом 76, которые распределены по плите равномерно с расстоянием между центрами 180 мм. Вид со стороны верхнего отверстия в защите дан на рис. 2. Часть этих отверстий используется для контрольных целей: введения

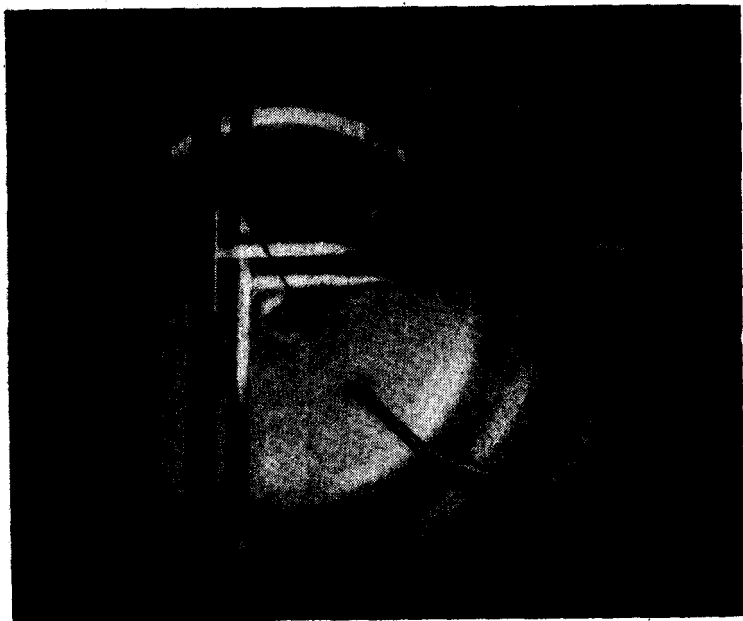


Рис. 3. Внутренняя часть реакторного бака. Видны пересекающиеся трубки для облучения, часть перфорированной трубы, которая соединяется с четырьмя тонкими трубками, выведенными в дно, и наливное отверстие в центре дна.

измерительных приборов, в частности термометров сопротивления для измерения температуры и её распределения в реакторном баке. Большинство же отверстий служит для введения урановых стержней и крепления урановых колонок.

Подлежащий облучению материал можно ввести внутрь реакторного бака, воспользовавшись любой из шести горизонтальных труб, проходя-

щих через бак и выведенных наружу через отражатель и защиту. Две системы таких труб (по три в каждой) расположены перпендикулярно друг другу и оси бака (рис. 3 и 4). Расстояние между центрами двух соседних труб 250 мм, внутренний диаметр 63 мм, толщина стенок 3,5 мм. С наружных концов трубы закрываются латунными пробками с кадмиевыми наконечниками. Для облучения образец помещают в алюминиевую капсулу, которая вводится в короткую цилиндрическую втулку из графита примерно того же диаметра, что и труба. Эту втулку можно втолкнуть по трубе до середины бака, а после облучения вытолкнуть с другой стороны.

Входное отверстие для наполнения бака тяжёлой водой находится в центре дна (рис. 3). Сток воды для регулирования уровня происходит через круглую перфорированную трубу, укреплённую внутри

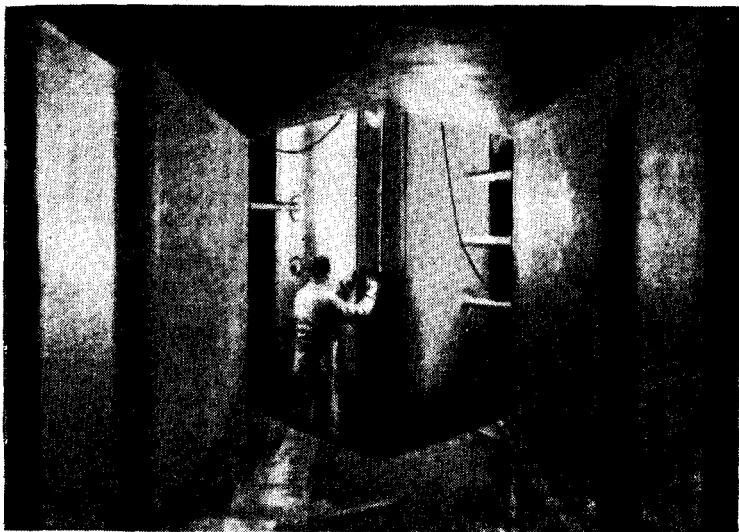


Рис. 4. Отверстие в защите, которое занимает термическая колонка; видны реакторный бак, трубы для облучения и одна из кадмиевых пластин.

бака по стенке, несколько ниже рабочего уровня тяжёлой воды. Эта труба соединена с четырьмя выводными трубками, выходящими из бака в каждом квадранте (рис. 3). Под дном бака эти четыре трубки соединяются в одну (выходную). Входная и выходная трубы соединены с охлаждающей системой через насосный узел.

В настоящее время в реакторном баке 2,2 т естественного металлического урана в виде стержней диаметром 2,54 см и длиной 30 см. Эти стержни, помещённые в спаренные алюминиевые трубки с толщиной стенок 2 мм (расстояние между центрами 40 мм), составляют так называемые урановые колонки. Общая эффективная длина урановых стержней в колонке равна 1,9 м. В реакторном баке верхние стержни всех урановых колонок находятся примерно на 10 см ниже уровня тяжёлой

воды. Пространство в трубе над урановыми стержнями, а также нижняя часть трубы заполняются графитом. Каждая колонка содержит 35,5 кг урана и весит 43 кг. Верхняя часть каждой урановой колонки снабжена специальной головкой для жесткого крепления к соответствующему месту внутренней поверхности верхней плиты.

Отражатель реактора сложен из графитовых брусков размером $70 \times 14 \times 14$ см, составленных в 8 призм с сечением 70×70 см. Эти призмы окружают реакторный бак по всей высоте, от пола до потолка реакторного помещения. Ребра призм почти соприкасаются и восемь 45-градусных секторов между соседними призмами также закладываются графитовыми брусками, обрезанными надлежащим образом. В результате минимальная толщина отражателя составляет 70 см. Пространство под реакторным баком также заполняется графитовыми брусками. Всего на отражатель ушло 32,8 тонны графита с удельным весом 1,68. Поскольку трение между брусками невелико, то для предотвращения скольжения во время укладки горизонтальные поверхности смазываются незначительным слоем какого-нибудь связующего вещества.

Реакторный бак и графитовый отражатель окружены железобетонными стенами, толщина которых нигде не составляет меньше 2 м. Верхний край бетонных стен примерно на 5 м выше потолка реакторного помещения, стены которого изнутри для дополнительной защиты покрыты тонким слоем кадмия.

В потолочной части бетонной защиты имеется круглое отверстие (см. рис. 2) диаметром 3,5 м, глубиной 2,9 м; первоначально это отверстие при работе предполагалось экранировать специальным баком с водой высотой 4 м, что, разумеется, вполне обеспечило бы защиту, однако в случае необходимости частичной смены урановых стержней надо было бы убирать этот огромный бак.

Поэтому его заменили несколькими слоями дерева, кадмия и свинца; в них, как раз над тубингами верхней плиты, были сделаны отверстия, затыкаемые сталебетонными пробками.

В бетонной защите есть ещё широкое вертикальное отверстие для термической колонки (рис. 4) размером $1,8 \times 1,8$ м с эффективной длиной 2 м; её наружная сторона экранирована свинцом толщиной 10 см, кроме того, между свинцом и графитом имеется кадмиевая прослойка. С противоположной колонке стороны защиты имеется два отверстия 20×20 см для опытов с быстрыми нейтронами; примерно в середине толщины стенки отверстие имеет значительно большее сечение. Имеется три сквозных отверстия для шести нейтронных счётчиков с трёхфтористым бором, которые являются основными контрольными и управляющими приборами. Наконец, имеются отверстия для облучательных труб, прорези для тросов, на которых подвешены кадмиевые стержни, колодцы для спуска и укладки графитовых брусков отражателя. Все отверстия в защите хорошо изолированы. Вентилятор непрерывно гонит свежий воздух через реакторное помещение и, таким образом, удаляются радиоактивная пыль и газы. Эта вентиляционная система является в известной мере и охлаждающей, так как уносит тепло, выделяемое реактором, эквивалентное примерно 6 кат, что немного снижает нагрузку холодильника.

Бетонные стены защиты опущены несколько ниже реакторного помещения. Ещё ниже находится подвал $5 \times 4,5$ м высотой 3,8 м, где расположены резервуар для тяжелой воды и необходимое оборудование. В подвал можно попасть через широкий колодец со съёмным деревянным потолком; колодец одной своей стороной граничит с подвалом. Здесь находится холодильник и циркуляционный насос. Колодец и подвал разделены стеной из бетонных блоков 80-см толщины, что обеспечивает полную защиту от излучения. Для прохода из колодца в подвал

в стене сделана экранированная дверь. Всё это можно видеть на рис. 1 и 5.

Находящийся в подвале резервуар соединён с дном реакторного бака алюминиевой трубой диаметром 14 см. Эта труба имеет специально сконструированный кран, управляемый реле, которое автоматически открывает кран, если интенсивность нейтронного потока превысит заданную величину; тогда тяжёлая вода стечёт из реакторного бака в резервуар в течение 45 сек. и тем самым цепная реакция будет прервана.

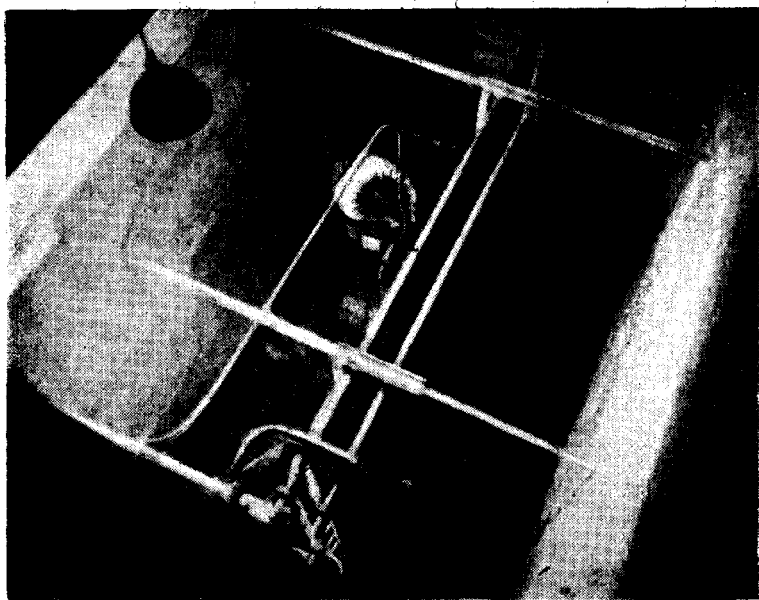


Рис. 5. Холодильник, где происходит теплообмен между тяжёлой водой и обычной водопроводной (первая ступень). Это помещение граничит с подвалом, где помещается резервуар с тяжёлой водой.

Выделяемое в реакторе тепло отводится двухступенчатым холодильником. В первой ступени осуществляется теплообмен между нагретой тяжёлой водой и обычной водопроводной. Во второй ступени эта вода циркулирует через радиатор, охлаждаемый воздухом, который выводится наружу вентиляционной системой. При такой системе охлаждения средняя температура тяжёлой воды при уровне мощности 100 кВт не превышает 40°С. Осуществление циркуляции тяжёлой воды осложнено требованием поддержания строгой герметизации всей системы, содержащей тяжёлую воду, и необходимостью поддерживать уровень воды в реакторном баке в очень узких пределах. Это обеспечивается системой кранов и насосов, работа которых управляется автоматически индикатором уровня тяжёлой воды.

Регулирование хода цепной реакции производится с помощью кадмиевых пластин. В нерабочем положении пластины находятся в пазах защиты внизу реактора. Для управления реактором достаточно обычно

двух пластин, две другие «запасные» используются лишь в критических случаях. Все четыре пластины одинаковы: размер каждой из пластин $1,3 \times 0,35$ м. Слой кадмия в 1,7 мм зажат между двумя алюминиевыми листами толщиной 4 мм. Направляющими для пластин служат 8-мм стальные рейки на пружинных анкерных оттяжках. Пластины подвешены на стальных тросах с противовесом, который для запасных пластин на 9 кг тяжелее, чем пластина, весящая 17 кг. Сами пластины находятся ниже уровня дна реакторного бака. При отмыкании стопора запасные пластины поднимаются в течение 1,7 сек.

Для получения данных о работе реактора и для управления им используются показания шести нейтронных счётчиков. Каждый из шести

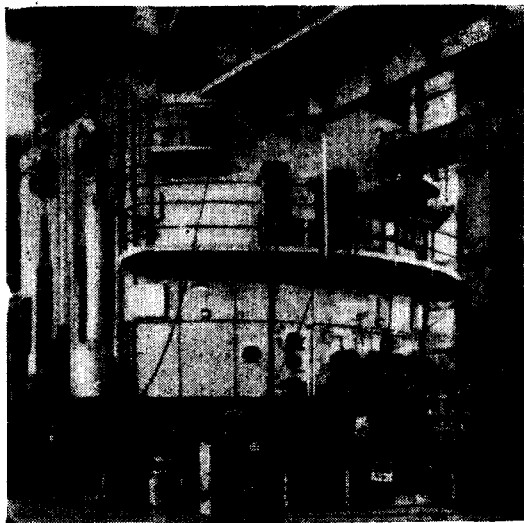


Рис. 6. Внешний вид реактора NRX.

счётчиков имеет свои функции. Один соединён непосредственно с гальванометром и показывает величину потока нейтронов даже при отключении главного источника питания. Обычно наблюдение за величиной потока нейтронов ведётся по показаниям другого счётчика. Три счётчика управляют запасными пластинами: если мощность возрастает слишком быстро, то один из этих счётчиков включает механизм, поднимающий кадмиевые пластины, а затем реле, управляющее краном, сливающим тяжёлую воду в резервуар. Два других могут быть отрегулированы так, чтобы поднимать пластины при каком-то заданном уровне мощности ниже максимальной.

Наконец, шестой счётчик через соответствующее автоматическое устройство регулирует передвижение управляющих пластин. Эти пластины можно передвигать и вручную. Показания всех контрольных приборов, пульт управления и данные о состоянии всех агрегатов и устройств реактора сосредоточены в диспетчерской комнате, где центральное место занимают приборы, показывающие уровень мощности и положение кадмиевых пластин.

В заключение, может быть, представляет интерес сообщить сведения о стоимости реактора и некоторых его частей (без урана).

Здание реактора и защита	72	тыс. долларов
Реакторный бак и охлаждающая система	50	» »
Электронное оборудование и автоматика	57	» »
Тяжелая вода	2000	» »
Оборудование ядернофизической лабораторий	143	» »
Оборудование общезфизической лабораторий	85,7	» »
Итого	2407,7	тыс. долларов

Реактор NRX, так же как и вышеописанный, работает на тяжелой воде и естественном уране и предназначен для экспериментальных исследований с нейтронами, однако его уровень мощности значительно выше, а именно, 10 000 *квт*. От других реакторов подобного типа он отличается большой интенсивностью потока нейтронов, достигающей $6 \cdot 10^{13}$ нейтронов/ $\text{см}^2 \text{сек}$. Эта величина примерно в 10—20 раз больше, чем у графитовых реакторов аналогичной мощности. Фотография внешнего вида реактора приведена на рис. 6.

Реакторный бак представляет собой цилиндрический резервуар диаметром 2,4 м и высотой 3 м. Внутри вертикально расположены трубы, содержащие в общей сложности 176 урановых стержней. Система охлаждается речной водой.

Тяжелая вода нагнетается в реакторный бак из запасного резервуара, по достижении некоторого критического уровня начинается цепная реакция. Постепенно устанавливается определенная мощность, величину которой можно контролировать по интенсивности нейтронного потока, измеряемой каким-нибудь подходящим счетчиком. Когда мощность достигает требуемой величины, необходимо отрегулировать высоту уровня тяжелой воды так, чтобы мощность оставалась постоянной. Эта регулировка должна быть довольно точной, так как, например, когда реакторный бак заполнен до высоты 250 см, повышение уровня на 2 см удваивает мощность в течение двух минут. Поэтому, помимо контроля уровня воды, используются также кадмиевые стержни. Благодаря автоматизации управления требуемый уровень мощности поддерживается довольно устойчиво с точностью до 0,5%.

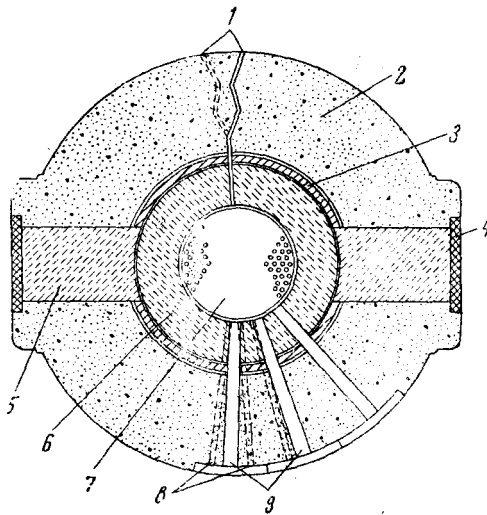


Рис. 7. Схематический разрез реактора NRX (рабочее сечение): 1 — отверстие для облучения; 2 — бетонная защита; 3 — стальная защита; 4 — свинцовый экран термической колонки; 5 — термическая колонка; 6 — графитовый отражатель; 7 — реакторный бак; 8 — 4-дюймовые отверстия; 9 — 12-дюймовые отверстия.

Вследствие большой сложности всех агрегатов реактора, естественно, возможны непредусмотренные нарушения нормального режима его работы, которые могут вызвать необходимость быстро прервать цепную реакцию. Для этого используются особые стержни из нейтронопоглощающих материалов, которые с помощью пневматических устройств можно в нужный момент быстро ввести в те из вертикальных труб, которые специально остаются незаполненными урановыми стержнями.

Так как реактор NRX предназначен для исследовательских целей и поэтому должен удовлетворять требованиям многих экспериментаторов, имеющих различные интересы, его можно запускать на любой нужной мощности или останавливать, если это необходимо.

На рис. 7 (см. стр. 137) дан схематический разрез реактора. В верхней части рисунка условно изображено одно из отверстий с автоматиче-



Рис. 8.

ским устройством, которое позволяет вводить и вынимать из реактора подлежащие облучению образцы, не останавливая последний. На рис. 8 приведена фотография этой стороны реактора. Каждая из видимых на фотографии больших труб служит защитным кожухом для стержня, на конце которого имеется держатель для образца.

В обе стороны сквозь бетонную защиту идут графитовые колонки, которые дают возможность получать тепловые нейтроны. Эти термические колонки полезны для физических экспериментов с гамма-лучами и продуктами деления, образующимися при захвате нейтронов, и для изучения различных ядерных реакций, сопровождающихся освобождением быстрых нейтронов. Интенсивность потока тепловых нейтронов в 2,5 м от колонки составляет 10^9 нейтронов/см² сек, а плотность тепловых нейтронов в 25 000 раз меньше, чем плотность нейтронов, попадающих в тер-

мическую колонку. Максимальное значение так называемого кадмиевого отношения для колонки оценивается примерно в 90 000.

В нижней части рис. 7 показаны отверстия, которые используются для получения коллимированных пучков нейтронов и гамма-лучей в различных исследовательских целях. Эта сторона реактора показана на рис. 9. Крышки, закрывающие четырёх-, пяти- и шестидюймовые отверстия, ясно видны в верхнем ряду. Двенадцатидюймовые отверстия расположены ниже. С правой стороны виден гамма-спектрометр для изучения образования пар. Далее, справа налево расположен нейтронный спектрометр. Затем, у одного из двенадцатидюймовых отверстий расположена установка Робсона¹, на которой он изучал радиоактивный распад свободных нейтронов. Ниже помещается массивный стол, на котором смонтирован другой нейтронный спектрометр. Наконец, крайняя



Рис. 9.

слева — аппаратура для исследования действия излучений на различные материалы. Установки снабжены самописцами для непрерывной регистрации результатов; некоторые из этих самописцев видны и на фотографии.

На рис. 10 приведена схема упомянутого выше гамма-спектрометра типа, предложенного Уокером и Макданиэлем². Первая часть установки помещена внутри бетонной защиты и начинается толстым висмутовым экраном, закрывающим отверстие с внутренней стороны реактора. Висмутовый экран поглощает гамма-лучи из реактора, но пропускает нейтроны. Вблизи него находится мишень; образующиеся в ней гамма-лучи рассеиваются во всех направлениях, но часть их (примерно $1/20\,000$ общего количества) проходит через свинцовые диафрагмы, выходит наружу и, наконец, попадает на радиатор. Нейтроны, прошедшие через мишень, поглощаются пробкой из бора и парафина. Радиатор представляет со-

бой фольгу из какого-либо тяжёлого элемента, в которой гамма-кванты соответствующей энергии превращаются в пару электрон—позитрон. Большинство пар движется в том же направлении, что и исходный пу-

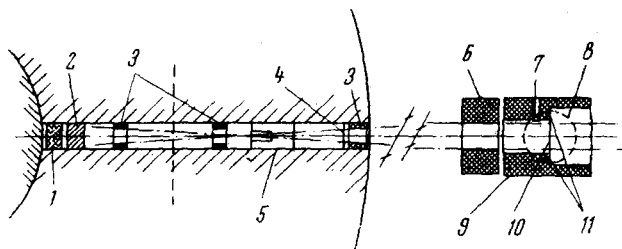


Рис. 10. Схема гамма-спектрометра: 1 — вискмутый экран; 2 — мишень; 3 — внутренние свинцовые диафрагмы; 4 — кадмиевый экран; 5 — пробка из бора и парафина; 6 — свинцовая входная диафрагма; 7 — катушка магнетометра; 8 — полюсы электромагнита; 9 — свинцовый кожух; 10 — радиатор; 11 — счётчики.

чок гамма-квантов. Проходя через магнитное поле, электрон и позитрон отклоняются в разные стороны. Совпадающие импульсы от электрона

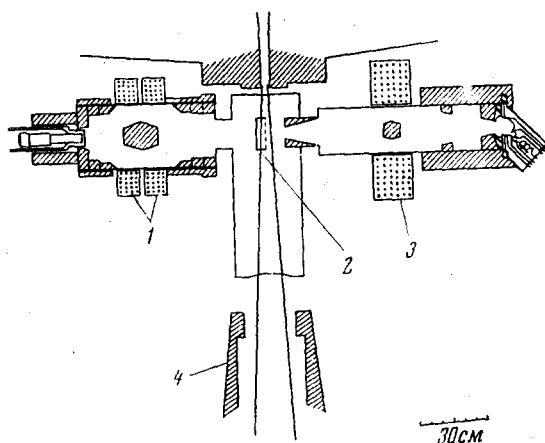


Рис. 11. Схема установки для изучения распада нейтронов: 1 — обмотка электромагнита бета-спектрометра; 2 — высоковольтный электрод; 3 — обмотки электромагнита протонного спектрометра; 4 — ловушка для поглощения прошедшего пучка.

и позитрона регистрируются в двух счётчиках, расположенных соответствующим образом. Чувствительность установки такова, что на 10^{13} квантов, образующихся при захвате нейтронов в мишени, при энергии квантов $2,75 \text{ Мэв}$ регистрируется одна пара. Если энергия квантов $7,4 \text{ Мэв}$,

чувствительность будет примерно в 40 раз больше. Приведённые данные имеют целью подчеркнуть важность величины нейтронного потока, которая около мишени составляет примерно $7 \cdot 10^{12}$ нейтронов/см² сек.

Схема установки Робсона для изучения спектров бета-лучей при радиоактивном распаде свободных нейтронов показана на рис. 11. Пучок нейтронов проходит через вакуумную камеру и выходит через тонкие алюминиевые окошки. При распаде нейтрона происходит реакция $n \rightarrow p + e + \bar{\nu} + 783 \text{ кэв}$. Из сохранения количества движения следует, что большая часть энергии переходит к лёгким частицам, а именно, к электрону и нейтрино, а протон будет иметь энергию порядка нескольких сот электрон-вольт. Таким образом, электрон может проходить через тонкий слой металла высоковольтного электрода внутрь бета-спектрометра, тогда как протон захватывается высоким потенциалом и попадает в протонный спектрометр. Чтобы исключить фон, электронно-регистрирующая схема отрегулирована так, чтобы импульс от электрона регистрировался с задержкой 0,9 мк сек; это отставание соответствует времени пролёта протона от места образования до протонного спектрометра. Тщательный анализ условий опыта позволил установить, что наблюдаемые протоны и электроны образуются в результате распада свободных нейтронов. Период полураспада свободных нейтронов был оценён в $12,8 \pm 2,5$ мин. по измерениям интенсивности исходного пучка нейтронов ($2 \cdot 10^9$ нейтронов/см² сек) и по количеству зарегистрированных протонов и электронов, являющихся продуктами его распада.

Нейтронные спектрометры этого реактора можно использовать не только для изучения ядерных реакций с нейтронами, но и для исследования структуры молекул, содержащих водород и лёгкие атомы, и ряда других целей.

В заключение автор заметки указывает, что в настоящее время на Чок-ривер создаётся новый NRU-реактор, который будет более совершенным, чем описанный.

Г. А.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Robson, Phys. Rev. 78, 311 (1950), 83, 349 (1951).
2. Walker a. MacDaniel, Phys. Rev. 74, 315 (1948).