

-83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

И.М. Франк

P-674

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР
ЛАБОРАТОРИИ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

(Доклад на 1X сессии Ученого Совета Объединенного института
ядерных исследований о работе Лаборатории нейтронной физики.
Ноябрь 1960 года)

И.М. Франк

P-674

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР
ЛАБОРАТОРИИ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

(Доклад на IX сессии Ученого Совета Объединенного института
ядерных исследований о работе Лаборатории нейтронной физики.
Ноябрь 1960 года)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

На сессиях Ученого Совета Объединенного института ядерных исследований начиная с 1957 года в докладах Лаборатории нейтронной физики сообщалось о проектах, а затем о ходе строительства импульсного реактора на быстрых нейтронах, о планах научных работ Лаборатории и о подготовке экспериментальной аппаратуры, необходимой для начала исследований.

Участники майской сессии Ученого Совета 1960 года познакомились с реактором в то время, когда основные монтажные работы были закончены и начался запуск реактора. Вскоре после этого - 23 июня 1960 года реактор достиг критического состояния в импульсном режиме и в июле был доведен до проектной мощности.

Реактор новой конструкции, как всякое новое инженерно-физическое сооружение, содержит в себе немало неизвестного. Пуск реактора и его испытания сами по себе являются исследовательской работой, представляющей самостоятельный интерес. Следует отметить, что современные знания физических процессов в реакторе достигли такого уровня, что поведение реактора может быть предсказано с большой степенью точности. Действительно, испытания реактора показали, что все ранее сделанные расчеты его динамики неплохо оправдались. Что касается инженерных и технических решений, то здесь ряд вопросов может быть выяснен только в результате длительного опыта эксплуатации и испытаний. Пока опыт работы на реакторе невелик, но он говорит о том, что конструкция реактора и системы его управления решены удачно. Сложная аппаратура, предназначенная для управления и пуска реактора, во всех случаях работала безотказно.

Ближайшей задачей Лаборатории является продолжение испытаний реактора для более детального изучения его физических характеристик и обеспечения его нормальной эксплуатации. Одновременно будут разворачиваться исследования в области нейтронной физики с использованием подготовленной к настоящему времени аппаратуры.

Вместе с тем, уже сейчас видна возможность дальнейшего улучшения реактора в целях уменьшения длительности импульсов и повышения его мощности. К этой работе Лаборатория будет готовиться.

К настоящему времени реактор прошел две серии испытаний, из которых вторая еще не закончена. В последнее время реактор испытывался в режиме, в

котором он генерирует 8,3 импульса в секунду (500 в минуту). Во время импульса мощность излучения нарастает примерно в 70 тысяч раз, причем полуширина импульса составляет 36 микросекунд. При средней мощности реактора в 1 киловатт мощность в максимуме импульса достигает 3000 киловатт, что соответствует мгновенной величине глобального потока из реактора около 10^{17} нейтронов в секунду.

Прежде чем переходить к изложению результатов проделанной работы, необходимо сказать об ее участниках. Разработка конструкции реактора, изготовление его отдельных узлов, их монтаж и испытания, пуск и исследования реактора — это, разумеется, коллективный труд большого числа специалистов.

Работа по проектированию импульсного реактора на быстрых нейтронах была начата по предложению Д.И.Блохинцева в Физическом институте Государственного Комитета Совета Министров СССР по использованию атомной энергии примерно пять лет тому назад. Эта работа была выполнена группой специалистов: т.т. Ю.Я.Стависским, И.И.Бондаренко, Ю.А.Блюмкиной, В.П.Зиновьевым, Н.В.Красноярским, Ф.И.Украинцевым и другими под научным руководством О.Д.Казачковского. Эти же товарищи совместно с работниками Лаборатории нейтронной физики нашего института осуществляли пуск и проведение исследований реактора.

Строительство реактора потребовало решения ряда инженерных задач. Как известно, конструкция этого реактора отличается от обычных прежде всего наличием машины, обеспечивающей быстрые, периодически повторяющиеся изменения реактивности. Эта уникальная машина была сконструирована и построена Центральным исследовательским институтом им. Баранова. Наличие в реакторе быстро движущихся частей потребовало решения некоторых материаловедческих вопросов.

Реактор оснащен различными оригинально сконструированными устройствами, обеспечивающими возможность плавной регулировки реактивности реактора и аварийной защиты. Впервые разработана аппаратура, позволяющая контролировать мощность реактора в импульсном режиме и обеспечивающая также и автоматическое управление реактором. Для размещения реактора и измерительной аппаратуры потребовалось проектирование и строительство специализированных помещений и т.д.

Во всей этой работе принимали участие различные проектные учреждения, институты и лаборатории. Инженеры и ученые этих организаций внесли значительный вклад в работу по созданию установки. Основными участниками этих

работ были т.т. Г.Е.Блохин, В.А.Бочковский, И.С.Головнин, Б.В.Крутиков, П.М.Назаров, В.М.Лебедев, В.А.Малых, В.И.Орлов, А.С.Займовский и многие другие.

Само собой разумеется, что весьма большой объем работы выполнен и сотрудниками Объединенного института ядерных исследований. Основная тяжесть работы легла на отдел эксплуатации реактора, которым руководит главный инженер лаборатории С.К.Николаев. Большой вклад в работу внесен инженерами Б.Н.Дерягиным, Б.Н.Буниним, А.К.Поповым, Б.Е.Лошиловым, С.А.Квасниковым, В.М.Назаровым, В.Д.Ананьевым и многими другими.

Хорошо работали молодые китайские инженеры т.т. Ван Ши-ди, Чень Те-юн, Цзен Най-гун. Значительный вклад в разработку теории реактора и выполнение пусковых работ внес Ким Хен Бон (КНДР). Ряд необходимых расчетов выполнен В.Н.Ефимовым, Е.П.Шабалиным и др.

В испытаниях реактора непосредственное участие приняли и физики под руководством Ф.Л.Шапиро: Ю.С.Язвницкий, В.И.Лушиков, Г.С.Самосват, А.Б.Попов и другие. Большой объем работы выполнен отделом электроники, конструкторским бюро и мастерскими лаборатории. Здесь работали как советские специалисты, так и физики и инженеры из различных стран-участниц института, главным образом молодежь. По существу весь коллектив Лаборатории, многие работники института и, прежде всего, директор Объединенного института ядерных исследований профессор Д.И.Блохинцев были участниками этого ответственного этапа работы Лаборатории нейтронной физики.

Мигающий реактор ОИЯИ

На предыдущих сессиях Ученого совета неоднократно сообщалось об основных особенностях конструкции реактора. Поэтому сейчас можно остановиться на этом вопросе лишь вкратце и сосредоточить внимание главным образом на обсуждении механизма его работы и полученных к настоящему времени экспериментальных результатах.

Как известно, основная особенность этого реактора состоит в наличии в нем механизма, осуществляющего периодически повторяющееся изменение реактивности. Для этой цели служит быстро вращающийся стальной диск, в который вблизи периферии запрессован вкладыш из урана -235. ~~_____~~

В экспериментах, о которых я буду рассказывать, диск совершал 83 оборота в секунду (5000 оборотов в минуту). При этом линейная скорость движения вкладыша составляет 230 метров в секунду. Имеется возможность повысить число оборотов до 6000, что предполагается сделать в дальнейшем. При вращении диска вкладыш проходит между кассетами с плутониевыми стерженьками (неподвижная активная зона), выводя реактор на весьма короткий срок в надкритическое состояние. Этот урановый вкладыш, имеющий форму диска, я буду называть основной подвижной зоной - сокращенно ОПЗ.

Число повторений импульсов 83 в секунду слишком велико для ряда экспериментов и не позволяет работать с медленными нейтронами при полной длине пролетной базы, равной 1000 м. Чтобы избежать этой трудности, в реакторе имеется второй вращающийся диск меньшего размера, в который также запрессован урановый вкладыш. (Вспомогательная активная зона, сокращенно ВПЗ). Этот вспомогательный диск может вращаться с меньшей скоростью, чем основной. Реактор становится надкритическим, только если оба вкладыша ОПЗ и ВПЗ совмещены с центром неподвижной активной зоны. Конструкция позволяет уменьшать число оборотов вспомогательного диска по сравнению с основным в определенное число раз, например, в 10 раз. Тогда вспышка возникает один раз на каждые десять оборотов основного диска, т.е. примерно 8 раз в секунду. Сейчас, как уже отмечалось, испытаны два режима работы реактора, а именно: режим, при котором реактор генерирует 8,3 имп./сек и 83 имп./сек (вспомогательный диск остановлен). Основное изменение реактивности вносит перемещение ОПЗ - 7,4%, вспомогательный вкладыш - ВПЗ меняет реактивность на 0,4%.

Система управления и защиты реактора обеспечивает изменение реактивности системы при пуске, работе и гашении реактора, аварийную его остановку, контроль уровня мощности во всех режимах работы и автоматическое поддержание уровня мощности (при мощности выше 1 ватта). Для ввода (или вывода) большой реактивности используется "грубый регулятор" (ГР). ГР является подвижной частью отражателя. С помощью сервопривода он может перемещаться, обеспечивая изменение реактивности со скоростью от $13 \cdot 10^{-5}$ 1/сек до $1,3 \cdot 10^{-5}$ 1/сек. Для точного изменения реактивности используется ручной регулятор (РР)-стержень, также являющийся частью отражателя.

Автоматический регулятор (АР) - такой же стержень, соединенный с сервоприводом системы автоматического регулирования. Для целей аварийной защиты используются два плутониевых стержня неподвижной зоны (АС-1, АС-2), подвешенные на электромагнитах. При появлении аварийного сигнала стержни выбрасываются из активной зоны под действием пружин и собственного веса с ускорением $20g$.

Реактивность, вносимая отдельными органами, составляет:

АС-1 и АС-2	- 1,1% (каждый)
ГР	- 2,6%
РР	- 0,1%
АР	- 0,038%.

В реакторе предусмотрено специальное устройство, предназначенное для создания мощных одиночных импульсов (бустер реактивности).

В системе управления и защиты используются две группы датчиков - пусковые и рабочие. В качестве пусковых датчиков используются пропорциональные счетчики, заполненные BF_3 и снабженные замедлителем из парафина. При малых мощностях (глубокая подкритика) усиленные импульсы от счетчиков, длительностью 0,5 мксек, подаются на пересчетные схемы и измерители скорости счета. Используется схема временных ворот, синхронизированных с помощью фотодатчика с вращением основного диска. Эта схема обеспечивает регистрацию нейтронов только во время прохождения основного вкладыша через неподвижную зону. При больших мощностях осуществляется интегрирование импульсов от пропорциональных счетчиков. Результирующие импульсы длительностью 600 мксек, амплитуда которых пропорциональна энергии, выделяющейся за время нейтронной вспышки, наблюдаются на осциллографе и измеряются с помощью интегрирующих схем. При мощностях выше 1 ватта используется импульсная электронная аппаратура, датчиками для которой служат импульсно-токовые камеры, заполненные метаном. Импульс ионизационного тока в камере, вызванный нейтронами и γ -лучами, усиливается и подается на триггеры аварийной защиты (два независимых канала) и на вход преобразователя импульса. Аварийная защита гасит реактор, если амплитуда импульса хотя бы в одном из каналов превосходит заранее заданное значение.

С выхода преобразователя импульсов снимается напряжение, пропорциональное амплитуде импульсов, мощности. Это напряжение подается на схему автоматического регулятора обычного типа (схема сравнения - усилитель мощности - амплитудин - сервопривод).

Вращение основного и вспомогательного дисков осуществляется с помощью силовой установки максимальной мощностью 100 квт. Установка включает ускоритель и электропривод, собранный по схеме Леонардо (трехмашинный агрегат). Предусмотрена система регулирования, обеспечивающая запуск, остановку машины и поддержание постоянного числа оборотов с точностью $\sim 2\%$ в диапазоне от 2000 до 6000 об/мин.

Для охлаждения воздуха, нагревающегося за счет трения в кожухе основного диска, предусмотрена циркуляция воздуха, отсасываемого из кожуха, через систему водяных холодильников с выбросом воздуха обратно в зал реактора.

Охлаждение неподвижной части активной зоны осуществляется атмосферным воздухом, нагнетаемым с помощью компрессора. Расход воздуха $\sim 60\text{ м}^3/\text{час}$. Общий вид установки реактора показан на фотографии (рис.1), а схема его устройства на рис. 2.

Реактор расположен в центре зала размером 10x10x7 м. Бетонные стены зала обеспечивают полную защиту. Реактор снабжен значительным количеством специальных устройств, позволяющих вести широкий круг нейтронных исследований. Основное экспериментальное устройство - главный нейтронный канал длиной 1000 м, представляющий собой металлическую трубу диаметром 400 мм в первой его части и 800 мм - во второй, в которой поддерживается вакуум порядка 0,01 мм ртутного столба. Нейтронный канал снабжен цепью промежуточных павильонов, позволяющих устанавливать экспериментальную аппаратуру на расстояниях 70, 250, 500, 750 и 1000 м. Наряду с главным нейтронным каналом сооружен вспомогательный, длиной 100 м.

Вплотную к залу реактора примыкает экспериментальный зал, в который может быть выведено 4 нейтронных пучка. Имеется возможность вывода нейтронных пучков в верхний экспериментальный зал, расположенный над залом реактора. План размещения реактора и экспериментальных павильонов показан на рис. 3.

Пуск и физические исследования реактора

Исследования реактора начались примерно за год до его пуска и проводились на стендовых подкритических сборках. Эти сборки полностью имитировали активную зону реактора. Отличие состояло лишь в том, что основной вкладыш (ОПЗ) либо был закреплен, либо перемещался с малой скоростью. Таким образом, на стенде реактор испытывался в стационарном подкритическом режиме.

Во время этих испытаний был получен ряд необходимых данных. Они позволили определить величину критической массы при различных расположениях плутониевых стержней, измерить эффективность органов управления, а, главное, найти величину двух очень существенных параметров, от которых зависит работа импульсного реактора. Эти параметры мы обозначаем буквами α и τ .

Физический смысл этих параметров следующий.

При смещении ОПЗ от оптимального положения коэффициент размножения нейтронов K меняется по квадратичному закону

$$\epsilon = K - 1 = \epsilon_m - \alpha X^2.$$

Здесь ϵ_m - максимальное значение реактивности и X - смещение ОПЗ от оптимального положения. Величину ϵ_m можно менять перемещением органов управления реактором, начиная от $\epsilon_m < 0$, т.е. от $K < 1$, до небольших положительных значений ϵ_m ($K > 1$). При этом речь идет о величинах K и ϵ_m для мгновенных нейтронов. Величина α для выбранной геометрии реактора является константой. Она существенна для динамики реактора. В самом деле, чем больше α , тем быстрее меняется реактивность при движении вкладыша, тем короче должен быть импульс нейтронного излучения.

Второй параметр, от которого также зависит длительность импульса в реакторе, - это среднее время τ , в течение которого происходит один цикл размножения нейтронов.

Для этих величин получились такие значения:

$$\alpha = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$$

$$\tau = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ сек.}$$

Из теории, развитой Бондаренко и Стависским^{х)}, следует, что при заданной

^{х)} И.И. Бондаренко, Ю.А. Ставиский. Атомная энергия, 7, 417, 1959.

мощности реактора изменение интенсивности нейтронного излучения вблизи максимума вспышки имеет форму, близкую к кривой Гаусса, полуширина которой равна

$$\theta = K \left(\frac{\tau}{\alpha v^2} \right)^{1/3}$$

Здесь v - скорость движения ОПЗ, а K - коэффициент, близкий к единице и слабо зависящий от параметров реактора. По расчетам, сделанным Ким Хен Боном, следует положить $K = 1,2$. Тогда, подставляя приведенные здесь значения v , α и τ , получаем для θ величину, совпадающую с экспериментальным значением $\theta = 36$ мксек. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что θ мало чувствительно к величинам α , τ и v^2 , поскольку оно пропорционально корню кубическому из комбинации этих величин.

Первый пуск реактора проходил естественно при остановленном диске, причем запрессованный в нем вкладыш (ОПЗ) находился в оптимальном положении. В таком виде реактор не отличается от обычного реактора на быстрых нейтронах. Для того, чтобы запустить реактор в импульсном режиме, диск, содержащий ОПЗ, приводится в состояние вращения с номинальной скоростью 5000 оборотов в минуту. При вращении диска заметное увеличение коэффициента размножения происходит только при условии, что ОПЗ находится в непосредственной близости к своему оптимальному положению. Поэтому большую часть времени в течение каждого оборота диска коэффициент размножения имеет постоянную величину такую, как если бы ОПЗ вообще не было. Величина K в это время примерно равна $K_0 = 0,93$, т.е. $\epsilon_0 = -0,07$. При этом излучение постоянного $Ra+Be$ источника нейтронов q , помещенного в неподвижной зоне реактора, усиливается в постоянное число раз $\frac{1}{|\epsilon_0|}$, т.е. примерно в 14 раз. Когда при вращении диска ОПЗ приближается к оптимальному положению, коэффициент размножения быстро растет, а затем вновь уменьшается. Разумеется, в начальных стадиях пуска органы регулирования реактора находятся в таком положении, что максимальное значение коэффициента размножения меньше единицы, т.е. $\epsilon_m < 0$. В моменты прохождения ОПЗ через неподвижную активную зону поток нейтронов меняется как $\frac{q}{|\epsilon|}$, где ϵ мгновенная величина реактивности, которая, как мы уже видели, вблизи максимума следует квадратичному закону. Таким образом, такой реактор работает как нейтронный усилитель, причем коэффициент размножения, постоянный в промежутках между импульсами, при прохождении ОПЗ через оптимальное положение на короткое время возрастает, а затем вновь возвращается к прежнему значению.

Максимум излучения совпадает с моментом прохождения ОПЗ через оптимальное положение, когда $\epsilon = \epsilon_m$. Полуширина импульса определяется моментом, в который интенсивность излучения, равная $\frac{q}{|\epsilon|}$, падает по сравнению с максимальной в два раза и, следовательно, $|\epsilon| = 2|\epsilon_m|$. При квадратичном законе изменения это означает, что ширина импульса $\theta = 2\sqrt{\frac{|\epsilon_m|}{\alpha v^2}}$.

Таким образом, если с помощью системы регулирования реактором величина K макс. увеличивается, т.е. ϵ_m приближается к нулю, то амплитуда импульса возрастает, а ширина его сжимается как $\sqrt{|\epsilon_m|}$. Когда коэффициент размножения отличается от 1 на величину, меньшую примерно 0,003, то поведение реактора становится сложнее. Процессы в реакторе уже нельзя рассматривать как квази-стационарные. В самом деле, при неизменном количестве запаздывающих нейтронов и постоянном ϵ , излучение подкритического реактора ($\epsilon < 0$) должно приближаться к стационарному состоянию, соответствующему данному ϵ , как $e^{-\frac{|\epsilon|}{\epsilon}t}$, а при $\epsilon > 0$ нарастание мощности идет как $e^{+\frac{|\epsilon|}{\epsilon}t}$. Таким образом характерным временем развития цепного процесса на мгновенных нейтронах является $\frac{T}{|\epsilon|}$. Когда $|\epsilon|$ мало и быстро меняется, то мощность реактора, соответствующая мгновенному значению ϵ ($\epsilon < 0$), уже не успевает устанавливаться. Изменение мощности реактора отстает от изменения ϵ . Максимум излучения начинает запаздывать по отношению к максимуму коэффициента размножения, а длительность импульса начинает меняться с изменением ϵ все слабее. При дальнейшем увеличении K макс. величина ϵ_m становится равной нулю ($K_{\text{макс.}}=1$), а затем положительной. При этом, следовательно, реактор на очень короткий срок становится надкритическим для мгновенных нейтронов. В каждом цикле размножения нейтронов интенсивность нейтронного излучения возрастает, пока ОПЗ приближается к оптимальному положению, и особенно сильно растет в то время, пока $K > 1$, т.е. $\epsilon > 0$. Рост интенсивности прекращается лишь после того, как коэффициент размножения, пройдя через максимум, снова станет меньше единицы, т.е. реактивность перейдет через нулевое значение в область отрицательных величин. Это означает, что максимум вспышки отстает от максимума коэффициента размножения на несколько десятков микросекунд (половину времени пребывания реактора в надкритическом состоянии). Полуширина импульса при этом слабо зависит от малых изменений ϵ_m .

На рис.4 в полулогарифмическом масштабе показана ожидаемая зависимость мощности реактора от времени (в микросекундах) для различных ϵ_m . Момент времени, принятый за нуль, соответствует максимуму реактивности. Кривые получены Ким Хен Боном и Ефимовым в результате интегрирования уравнения реактора (без учета запаздывающих нейтронов) в предположении, что время жизни τ и изменение реактивности α соответствуют величинам, приведенным в начале этого раздела доклада. Таким образом принималось, что $\tau = 1,2 \cdot 10^{-8}$ сек и $\epsilon = \epsilon_m - \alpha' t^2$, где $\alpha' = \alpha v^2 = 3,7 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{\text{мксек}}\right)^2$ ($\alpha = 7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}$, $v = 2,3 \cdot 10^4 \text{ см.сек.}^{-1}$).

Из кривых (рис. 4) видно, что при $\epsilon_m = -1 \cdot 10^{-3}$ максимум импульса лишь немного опаздывает по сравнению с моментом $t = 0$, когда реактивность максимальна. При этом его амплитуда равна $\approx 0,8 \cdot 10^3$, т.е. лишь на 20% меньше, чем ожидаемая в квазистационарном случае ($\frac{1}{|\epsilon_m|} = 1 \cdot 10^3$). Таким образом отклонение от квазистационарности здесь еще невелико. При больших ϵ_m условие квазистационарности заведомо не выполнено. При $\epsilon_m = 0$ и $\epsilon_m > 0$ амплитуда импульса остается конечной, хотя и сильно возрастает с увеличением ϵ_m . При этом положение максимума амплитуды все больше запаздывает по сравнению с точкой $t = 0$. При $\epsilon_m = 1 \cdot 10^3$ ожидаемая максимальная амплитуда $\approx 7 \cdot 10^5$, т.е. при изменении ϵ_m от $-1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^3$ относительная амплитуда импульса растет примерно в тысячу раз. Следует отметить, что кривые (рис. 4) дают умножение мощности источника нейтронов, величина которого принимается заданной. В действительности это неправильно, так как одним из источников нейтронов являются запаздывающие нейтроны, число которых при работе реактора сильно возрастает с увеличением ϵ_m . (Этот вопрос рассмотрен подробнее в следующем разделе доклада). Кроме того следует иметь в виду, что если относить мощность реактора в импульсе не к источнику, а к мощности в реакторе в промежутке между импульсами, то амплитуды кривых следует уменьшить примерно на порядок, так как имеющиеся источники нейтронов в промежутке между импульсами размножаются, как уже отмечалось в $\frac{1}{|\epsilon_0|} = 14$ раз.

При стационарной работе реактора величина $\epsilon_m \sim 1 \cdot 10^{-3}$ и соответственно время пребывания в надкритическом состоянии ≈ 100 мксек. Величина мощности реактора в максимуме импульса по отношению к промежуткам между ними не превышает 10^5 . При такой амплитуде мощности величина импульса еще должна

поддаваться плавной регулировке с помощью управляющих стержней РР или АР (см. предыдущий раздел доклада). Все эти теоретически ожидаемые особенности поведения реактора действительно подтвердились на опыте.

В проведении экспериментов непосредственное участие приняли физические группы Лаборатории, а подготовленная ими и отделом электроники аппаратура оказалась чрезвычайно полезной.

Для точного определения формы импульса необходимо пользоваться детектором, регистрирующим только быстрые нейтроны либо γ -лучи. Для первой серии опытов использовался сцинтилляционный счетчик (ZnS - плексиглас), во второй серии опытов - ториевая делительная камера. Импульсы от этих детекторов подавались на временной 1024-канальный анализатор. Анализатор запускался фотодатчиком, связанным с вращающимся диском, содержащим ОПЗ. Таким образом анализатор включался при вполне определенном положении вращающегося диска и счет в каждом канале анализатора определялся числом импульсов от детектора при различных последовательных положениях ОПЗ относительно неподвижной активной зоны. Число импульсов детектора запоминалось в каждом из каналов анализатора за много циклов прохождения ОПЗ через зону. Полученная таким образом кривая очевидно воспроизводила среднюю амплитуду и форму кривой изменения интенсивности излучения реактора. Меняя ширину канала анализатора от 8 мксек до 2 мксек, варьируя расстояние от реактора до детектора и размеры детектора, можно было снимать эти кривые при всех стадиях работы от самой начальной до выхода на номинальную мощность. Ширина полученных кривых, положение максимума и величина амплитуды мощности оказались в согласии с расчетом. Поэтому их можно было использовать как контроль правильности работы пусковой аппаратуры. При первых пусках реактора такие измерения оказались чрезвычайно полезными.

На рис. 5,6, и 7 показана форма нейтронной вспышки при различных режимах реактора. В случае, представленном на рис. 5, $\epsilon_m = -5 \cdot 10^{-3}$ и ширина кривой примерно 200 мксек; для кривой рис.6 $\epsilon_m = -0,4 \cdot 10^{-3}$ и ширина около 70 мксек. Таким образом, это еще случаи подкритического режима, при которых ширина пика θ сжимается при уменьшении абсолютной величины ϵ_m . Рис. 7 соответствует мгновенной надкритичности $\epsilon_m \sim +0,7 \cdot 10^{-3}$. Ширина пика в этой области уже мало зависит от ϵ_m и равна примерно 40 мксек. Следует отметить, что

величина ϵ_m особенно в области $\epsilon_m > 0$ пока измерена со сравнительно небольшой точностью. Поэтому анализировать зависимость ширины импульса от ϵ_m особенно при ϵ_m , близком к нулю, пока еще преждевременно. Однако из полученных данных однозначно следует, что при $\epsilon_m > 0$ ширина импульса, как и ожидалось, уже медленно меняется при изменении ϵ_m .

На рис. 8 экспериментальная кривая рис. 7 для формы импульса совмещена с расчетной кривой для $\epsilon_m = 0,75 \cdot 10^{-3}$, полученной Ким Хен Боном и Ефимовым (в полулогарифмическом масштабе это кривая 8 на рис. 4). Так как при $\epsilon_m \sim 1 \cdot 10^{-3}$ как ширина, так и форма кривой импульса уже мало чувствительны к небольшим ошибкам в измерении ϵ_m , то такое сопоставление является вполне законным. Из рис. 7. видно, что экспериментальные точки действительно хорошо ложатся на теоретическую кривую.

Выход на мощность и стационарный режим реактора

Как следует из сказанного, импульсный реактор по существу является импульсным усилителем мощности нейтронного потока. При этом в промежутке между двумя импульсами интенсивность излучения остается практически постоянной и служит как исходная при генерации следующего импульса. Чем больше ϵ_m , тем в большее число раз она усиливается. Эта начальная интенсивность пропорциональна суммарному излучению источников нейтронов, содержащихся в реакторе. Она складывается из излучения $Ra + Be$ - источника, помещенного в неподвижной активной зоне, нейтронов спонтанного деления и запаздывающих нейтронов. Это суммарное излучение усиливается в промежутках между импульсами в постоянное число раз $\frac{1}{|\epsilon_0|} = 14$. Обозначим через Q число нейтронов, испускаемых такими источниками за один цикл работы реактора (т.е. в промежутке от импульса до импульса). Если N_n полное число нейтронов, испускаемых во время импульса, то при заданных α , ν , τ и T -периоде повторения импульсов всегда

$$N_n = Q f(\epsilon_m).$$

Таким образом N_n пропорционально Q , а коэффициент пропорциональности является некоторой функцией ϵ_m , быстро возрастающей, как мы видели, при увеличении ϵ_m . Процесс размножения в импульсе происходит целиком за счет мгновенных нейтронов. Что касается запаздывающих нейтронов, то они вносят

свой вклад в величину Q . В результате оказывается, что поведение импульсного реактора, несмотря на его своеобразие, во многом напоминает поведение обычного реактора. Это сходство начинает проявляться уже в подкритическом режиме при среднем глобальном потоке быстрых нейтронов из реактора порядка 10^{10} нейтронов в секунду (мощность порядка ватта).

В самом деле, допустим, что в какой-то момент времени перемещением регулирующего стержня была несколько увеличена величина $\epsilon_m < 0$. В результате $f(\epsilon_m)$ возрастает, т.е. число нейтронов N_n , а, следовательно, и число делений во время вспышки увеличится. Эти деления создадут осколки, испускающие запаздывающие нейтроны. Поэтому к величине Q дополнительно прибавится некоторое число запаздывающих нейтронов, т.е. Q немного увеличится. Средний период распада запаздывающих нейтронов велик по сравнению с промежутком времени между импульсами реактора. Поэтому потребуется много импульсов реактора, пока число запаздывающих нейтронов, медленно нарастая, достигнет нового равновесного значения. Постепенное нарастание Q при постоянном $f(\epsilon_m)$ приведет к пропорциональному увеличению и N_n . Таким образом, импульсный реактор, подобно обычному подкритическому реактору, при изменении реактивности даст немедленное увеличение излучения, связанное с мгновенными нейтронами, а затем постепенное нарастание излучения, определяемое увеличением числа запаздывающих нейтронов.

Установившийся режим реактора получим, приняв во внимание, что $Q = Q_0 + \beta N_n$, где $\beta \approx 0,003$ — отношение числа запаздывающих нейтронов к мгновенным, т.е. βN_n вклад в величину Q запаздывающих нейтронов, а Q_0 — остальные источники ($Ra + Be$ и спонтанные). Таким образом

$$N_n = (Q_0 + \beta N_n) f(\epsilon_m).$$

При увеличении ϵ_m вклад запаздывающих нейтронов в величину Q будет нарастать. При средней мощности реактора порядка десяти ватт число запаздывающих нейтронов будет уже велико по сравнению с Q_0 . (Величина $Q_0 = 10^7$ нейтронов в секунду). При увеличении ϵ_m режим реактора все в большей степени будет зависеть от баланса между мгновенными и запаздывающими нейтронами. Нетрудно убедиться, что при подходящем ϵ_m реактор должен иметь стационарный по средней мощности режим. При этом он может быть стабилизирован на любом уровне мощности, а величина Q будет целиком определяться запаздывающими нейтронами.

Это условие для ϵ_m легко получить из написанного выше уравнения, положив в нем $Q_0 = 0$ (практически Q_0 становится пренебрежимо малым по сравнению с βN_n при увеличении мощности). Действительно, $f(\epsilon_m)$ монотонно возрастает при увеличении ϵ_m и поэтому имеется такое $\epsilon_m = \epsilon_k$, при котором $f(\epsilon_k) = \frac{1}{\beta}$. Очевидно, что написанное выше условие для баланса нейтронов (для $Q_0 = 0$) при этом будет выполнено при произвольном N_n . Такой режим, аналогичный критическому состоянию обычного реактора, будем называть импульсной критичностью.

Аналогия с обычным критическим реактором проявляется и в той роли, которую играют запаздывающие нейтроны в механизме управления мощностью реактора. Это сразу становится очевидным, если рассмотреть динамику реактора в том случае, если ϵ_m увеличится или уменьшится по сравнению со значением, определяющим импульсную критичность $\epsilon_m = \epsilon_k$. Допустим, например, что перемещением регулирующего стержня величина ϵ_m несколько увеличена по сравнению с ϵ_k . При этом число нейтронов в импульсе N_n возрастает, кроме того, теперь

$$f(\epsilon_m) > \frac{1}{\beta}, \text{ т.е. } \frac{N_n}{Q} = f(\epsilon_m) > \frac{1}{\beta}.$$

Следовательно отношение числа мгновенных нейтронов к запаздывающим отклонится от равновесного. Число запаздывающих нейтронов Q , создаваемых мгновенными, будет теперь нарастать, т.е. увеличиваться, а так как величина отношения $\frac{N_n}{Q} = f(\epsilon_m)$ постоянна при заданном ϵ_m , то будет возрастать и N_n . Иными словами выделяемая реактором мощность будет увеличиваться пропорционально увеличению числа запаздывающих нейтронов Q . При этом количество запаздывающих нейтронов Q определяется очевидно суммой величин N_n от многих импульсов, возникших за некоторый интервал времени, предшествующий данному. Поэтому изменение ϵ_m приведет к увеличению Q не сразу, а лишь постепенно. Аналогичная картина будет и при уменьшении ϵ_m по сравнению с ϵ_k . Иными словами, наличие запаздывающих нейтронов создает инерционность в изменении мощности, выделяемой реактором, совершенно так же, как это имеет место в обычном реакторе. Это обстоятельство значительно упрощает возможность плавной регулировки импульсного реактора. Рассмотренные

здесь особенности импульсного реактора, теперь проверенные и на опыте, не являются неожиданными. (Сказанное отличается лишь формой изложения от результатов, приведенных в работе Стависского и Бондаренко, о которой уже упоминалось).

Отметим, что соответствующая импульсной критичности $\epsilon_m = \epsilon_k > 0$, т.е. такой стационарно-работающий реактор в каждом периоде размножения проходит через состояние, в котором он является надкритическим по мгновенным нейтронам. В обычном реакторе, как известно, такое состояние совершенно недопустимо.

При импульсной критичности отношение величины импульса к фону, т.е. к излучению в промежутки между импульсами, достигает постоянного значения, величину которого нетрудно оценить. В самом деле, можно приближенно положить

$N_n = A_n \theta$. Здесь A_n - мгновенное значение интенсивности излучения в максимуме импульса, а θ его полуширина. Если A - интенсивность излучения в промежутке между импульсами, а T - период повторения импульсов, то AT равно числу нейтронов, излученных в промежуток между импульсами. Поэтому

$$AT = \frac{1}{|\epsilon_0|} Q. \text{ Учитывая, что } \frac{N_n}{Q} = \frac{1}{\beta}, \text{ получим}$$

$$\frac{A_n}{A} = \frac{|\epsilon_0|}{\beta} \cdot \frac{T}{\theta}.$$

Подставляя численные значения этих величин $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$, $|\epsilon_0| = 7 \cdot 10^{-2}$,

$\theta = 40$ мксек и $T = 1,2 \cdot 10^4$ мксек при 83 импульсах в секунду и $T = 1,2 \cdot 10^5$ мксек

при 8,3 импульсах в секунду, получим $\frac{A_n}{A}$ равное примерно 7000 в первом случае и 70 000 - во втором. Очевидно, что такое сильное нарастание интенсивности излучения за короткое время импульса возможно только при $\epsilon_k > 0$. Расчет показывает, как уже отмечалось, что $\epsilon_k \sim 1 \cdot 10^{-3}$. Величина отношения амплитуды импульса к фону и ее постоянство при импульсной критичности согласуются с полученными, пока предварительными, экспериментальными данными.

Из сказанного нетрудно также определить мгновенную мощность реактора. Она, очевидно, превышает среднюю в $\frac{T}{\theta}$ раз. Следовательно, при достигнутой сейчас средней мощности в 1,2 киловатта мгновенная мощность составляет 360 киловатт при 83 импульсах и 3600 киловатт при 8,3 импульсах в секунду.

При малых линейных размерах реактора это означает очень высокую мгновенную плотность потока нейтронов. Для большинства экспериментов нам существен-

ны не быстрые нейтроны, а поток медленных нейтронов, возникающий в парафиновом замедлителе, который может быть одет на реактор. Пока получены лишь самые предварительные данные о величине потока с парафиновым замедлителем. Можно лишь утверждать, что, по крайней мере, с точностью до порядка величины поток согласуется с ожидаемым по расчету.

Как видно из сказанного, в момент импульса величина нейтронного излучения возрастает во много раз. Процесс размножения нейтронов в реакторе носит статистический характер. В результате амплитуда импульса реактора подвержена статистическим флюктуациям. При этом роль их в импульсном реакторе должна быть особенно значительной. На эту особенность впервые обратил наше внимание проф. Л.Пал. Расчеты флюктуаций были сделаны как им, так и независимо - Ю.Стависским. Результаты этих расчетов пока не были детально сопоставлены, но, по-видимому, в них нет существенных расхождений.

Существенность флюктуаций величин импульсов обнаружилась уже в самом начале пусковых работ. Флюктуации величины импульсов, генерируемых реактором при нулевой его мощности, оказались очень большими. На экране осциллографа были отчетливо видны всплески, в несколько десятков раз превышающие среднюю амплитуду импульсов. Если бы разброс амплитуд оказался таким же и при больших мощностях, то, если не использование реактора, то во всяком случае автоматическое его управление оказалось бы очень затруднительным. Однако, как и следовало ожидать, неконтролируемый нами хаос микромира при увеличении мощности реактора все в большей степени уступает свое место макроскопическим закономерностям, в которых амплитуда импульса однозначно определяется параметрами реактора.

Естественно, что вопрос о флюктуациях импульсов стал предметом первоочередных исследований, проводимых на реакторе. Для этого импульсы тока от метановой ионизационной камеры, находящейся в зале реактора, пропорциональные числу нейтронов за время вспышки, подавались на вход стоканального амплитудного анализатора. Амплитудные распределения были сняты при различных мощностях реактора. На рис. 9 и 10 показаны полученные распределения при мощности реактора 4 и 1200 ватт. Если в первом случае полуширина кривой амплитуд превышает 80% от среднего значения, то при мощности 1,2 киловатта она составляет всего 12%.

Средний квадрат отклонения от средней амплитуды оказался, как и следовало ожидать, линейной функцией обратной величины мощности (рис. 11). В результате, уже начиная с мощности порядка десятка ватт, надежный контроль за реактором может быть осуществлен с помощью автоматического регулятора мощности.

Программа работ на 1961 год и ядерно-физические исследования

Изложенные выше результаты, полученные на реакторе, не исчерпывают программы его испытаний. Эта программа займет еще значительное время. Основной и ближайшей задачей этих работ является ввод реактора в нормальную эксплуатацию, позволяющую физикам начать систематическую исследовательскую работу.

Физиками и специалистами по радиоэлектронике за истекший срок проделана очень большая работа по подготовке экспериментальной аппаратуры для проведения нейтронных измерений. Развертывание экспериментальных работ на реакторе будет проводиться в несколько этапов. Я остановлюсь лишь на некоторых первоочередных работах.

Одними из основных работ на импульсном реакторе являются исследования по спектрометрии нейтронов. В настоящее время полностью подготовлена аппаратура для измерения полных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами. Этой работой руководит Ю.С. Язвницкий. Для измерений необходим детектор, обладающий большой площадью и хорошей эффективностью. Этим условиям удовлетворяет разработанный для этой цели жидкостный спинтилляционный детектор, содержащий метилборат. Площадь его около 500 см^2 (диаметр 25 см), а эффективность очень слабо зависит от энергии нейтронов. Для 100 эв она составляет около 50%. Детектор помещается в конце нейтронновода на расстоянии 1000 м от реактора. Такая пролетная база при $\theta = 40$ мксек обеспечивает разрешающую способность спектрометра $0,04 \frac{\text{мксек}}{\text{метр}}$. Для исследований будет использован 1024-канальный анализатор. Общий вид детектора и схема его устройства видны на рис. 12 и 13. Изучаемые образцы располагаются на половине длины нейтронновода в экспериментальном павильоне на расстоянии 500 м от реактора. Перемещение образцов производится автоматически. Пульт управления всей аппаратурой (рис. 14) и тысячеканальный временной анализатор импульсов размещены в основном здании Лаборатории.

Работой по измерению сечений радиационного захвата резонансных нейтронов, также подготовленной для эксперимента, руководит Л.Б.Пикельнер. На рис. 15 и 16 показана схема устройства детектора и его общий вид. Здесь также используются жидкостные сцинтилляционные детекторы. Их два, каждый объемом 200 литров. Эффективность детекторов около 60% для γ -лучей кобальта. Детекторы имеют форму цилиндров с внешним диаметром 80 см и имеют внутри канал диаметром 20 см. В этом канале располагаются образцы, облучаемые коллимированным пучком от реактора. Детекторы работают на совпадениях и регистрируют захватные γ -лучи, возникающие в образце. Измеряя зависимость интенсивности γ -лучей из образца как функцию времени пролета нейтронов от реактора до образца, можно судить об энергетическом ходе сечения радиационного захвата нейтронов. Установка размещена в павильоне на расстоянии 750 метров от реактора и, разумеется, также полностью автоматизирована^{х)}.

В стадии завершения и подготовки находится аппаратура для других работ по нейтронной спектрометрии: измерению спектров γ -лучей при захвате резонансных нейтронов, измерению сечений деления и резонансного рассеяния нейтронов.

Другим направлением работ, для которого использование реакторов является весьма перспективным, является исследование жидких и твердых веществ по рассеянию и неупругому взаимодействию медленных нейтронов. Успех этой работы полностью зависит от того, насколько удастся защититься от нейтронного фона. Выяснение этого вопроса является ближайшей задачей. Работа подготовлена товарищами А.Шкатула (Краков) и В.Голиковым. Это направление работ развивается у нас как совместное исследование с Институтом ядерных исследований в Кракове.

х) В настоящее время эксперименты по спектрометрии нейтронов уже начаты. На рис. 17 показана снятая описанным выше детектором экспериментальная кривая зависимости интенсивности γ -лучей радиационного захвата нейтронов в серебре от энергии нейтронов. Кривая получена при экспозиции около 1 часа. Полученные результаты показывают, что, по крайней мере, в области энергий до сотен электрон-вольт разработанная методика вполне оправдывает. К тому же выводу приводят и предварительные данные по измерению полных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами.

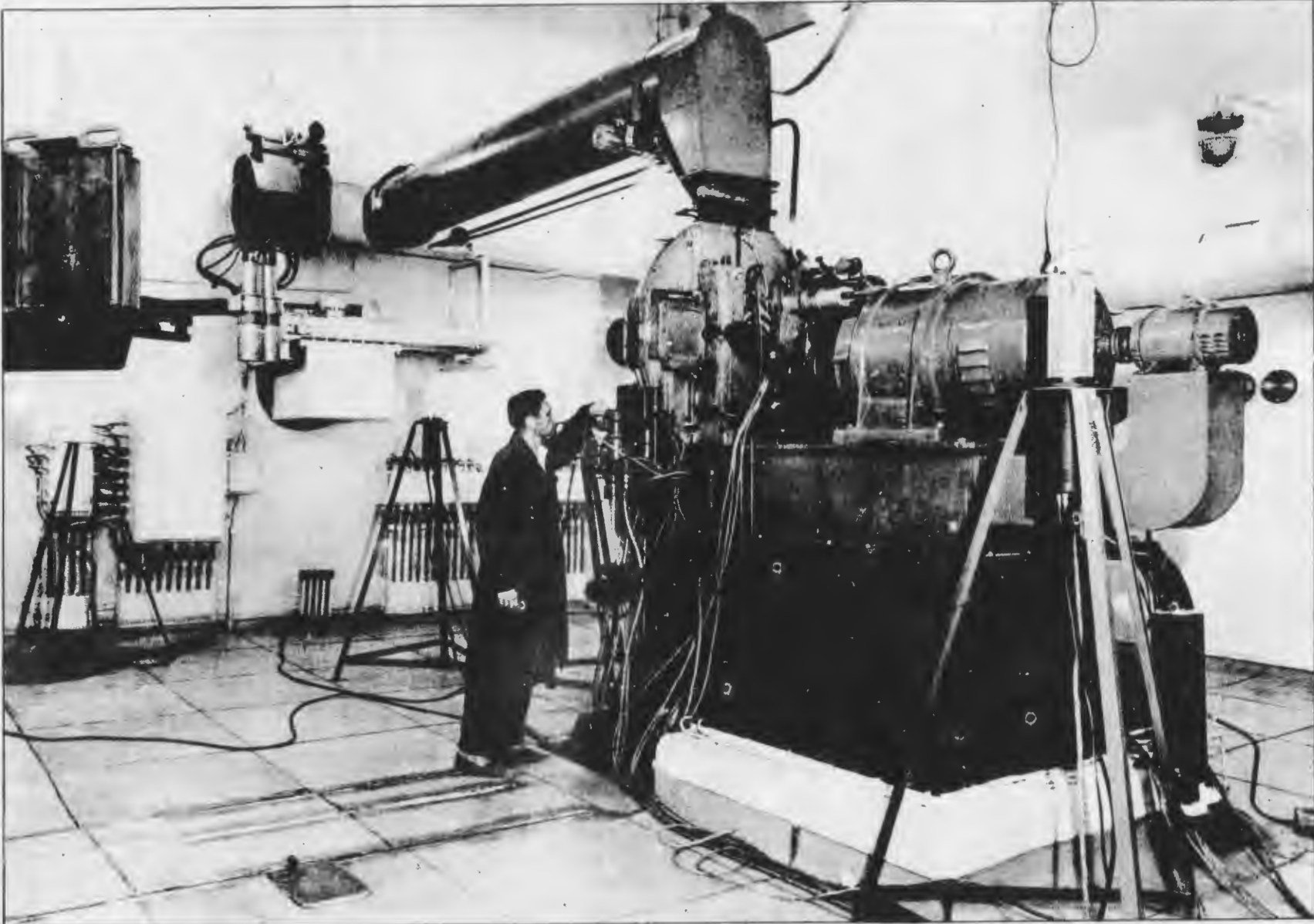


Рис. 1. Общий вид реактора.

Я остановился на изложении основных направлений физических исследований, которые развертываются на реакторе одновременно с его пуском. Это изложение является кратким, так как подробнее эти работы рационально рассматривать уже после получения экспериментальных результатов.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1961 года.

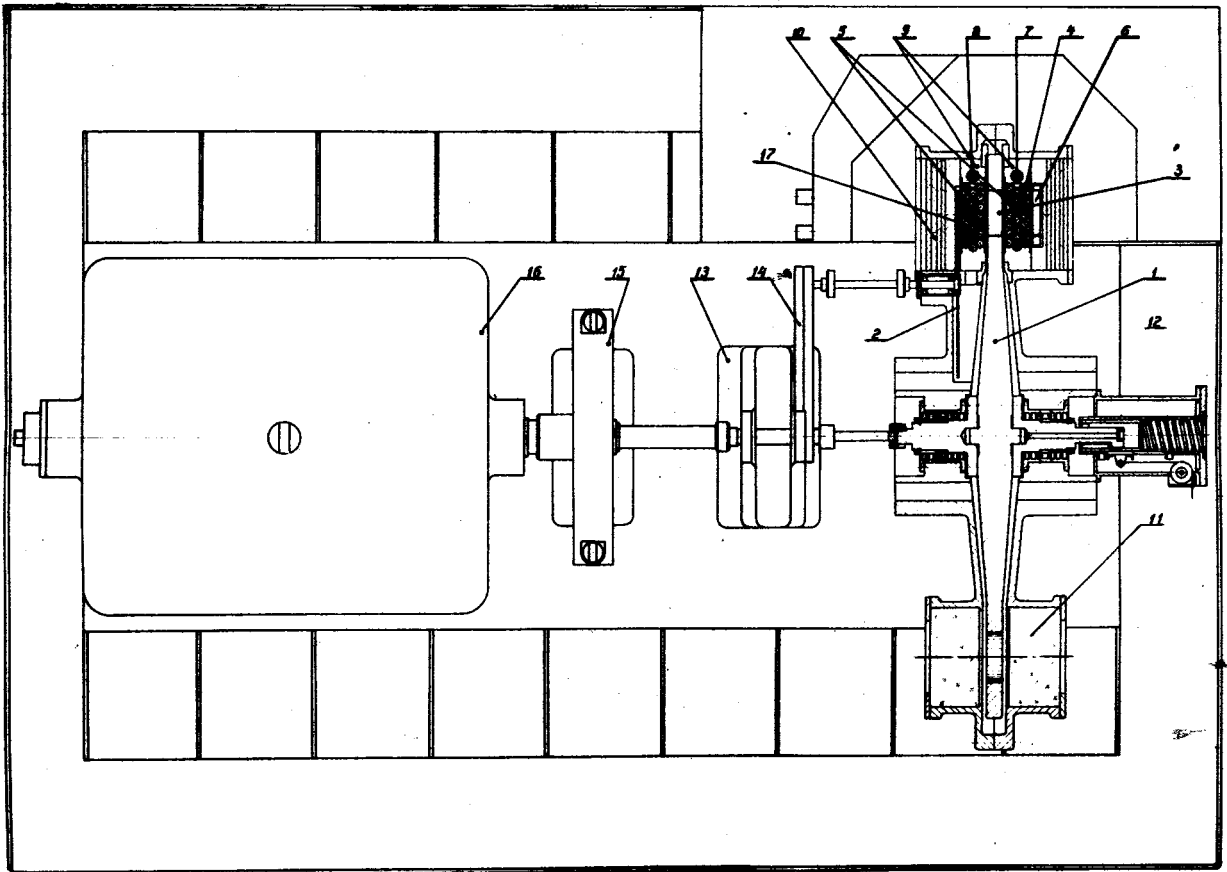
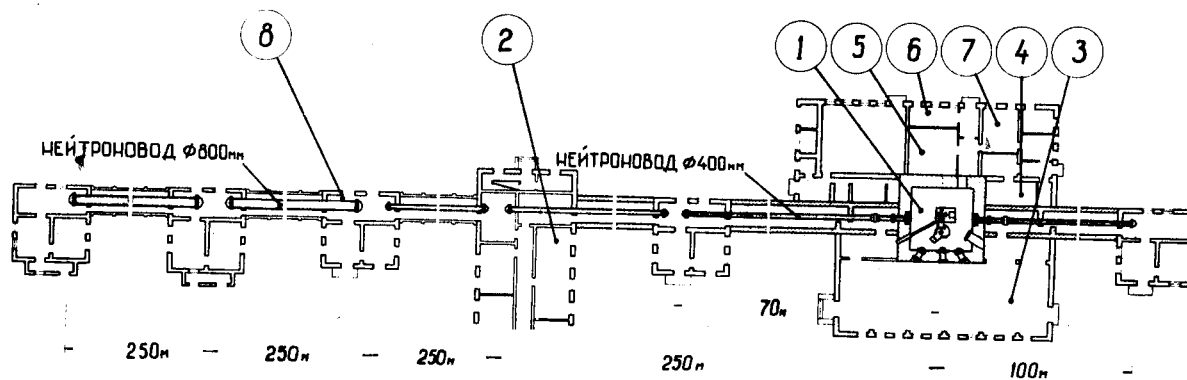


Рис. 2. Схема устройства реактора.

1. Основной вращающийся диск. 2. Вспомогательный вращающийся диск.
3. Основная подвижная зона (ОПЗ). 4. Неподвижная активная зона.
5. Аварийные стержни (АС). 6. Пластина грубого регулятора (ГР)
- 7 и 8. Регулирующие стержни АР и РР. 9 и 10. Отражатель нейтронов.
13. Передача для увеличения числа оборотов. 14. Привод к валу вспомогательного диска. 15. Тормозное устройство для быстрой остановки вращения. 16. Электродвигатель для вращения диска.
17. Вспомогательная подвижная зона /ВПЗ/.



- | | | | |
|---|-----------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Зал реактора | 5 | ВЕНТИЛЯЦИОННАЯ |
| 2 | Пульт управления | 6 | КОМПРЕССОРНАЯ |
| 3 | ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЗАЛ | 7 | БЫТОВЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ |
| 4 | МАСЛЯНЫЕ НАСОСЫ | 8 | ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПАВИЛЬОНЫ |

Рис. 3. Схематический план помещений реактора, нейтронвода и экспериментальных павильонов.

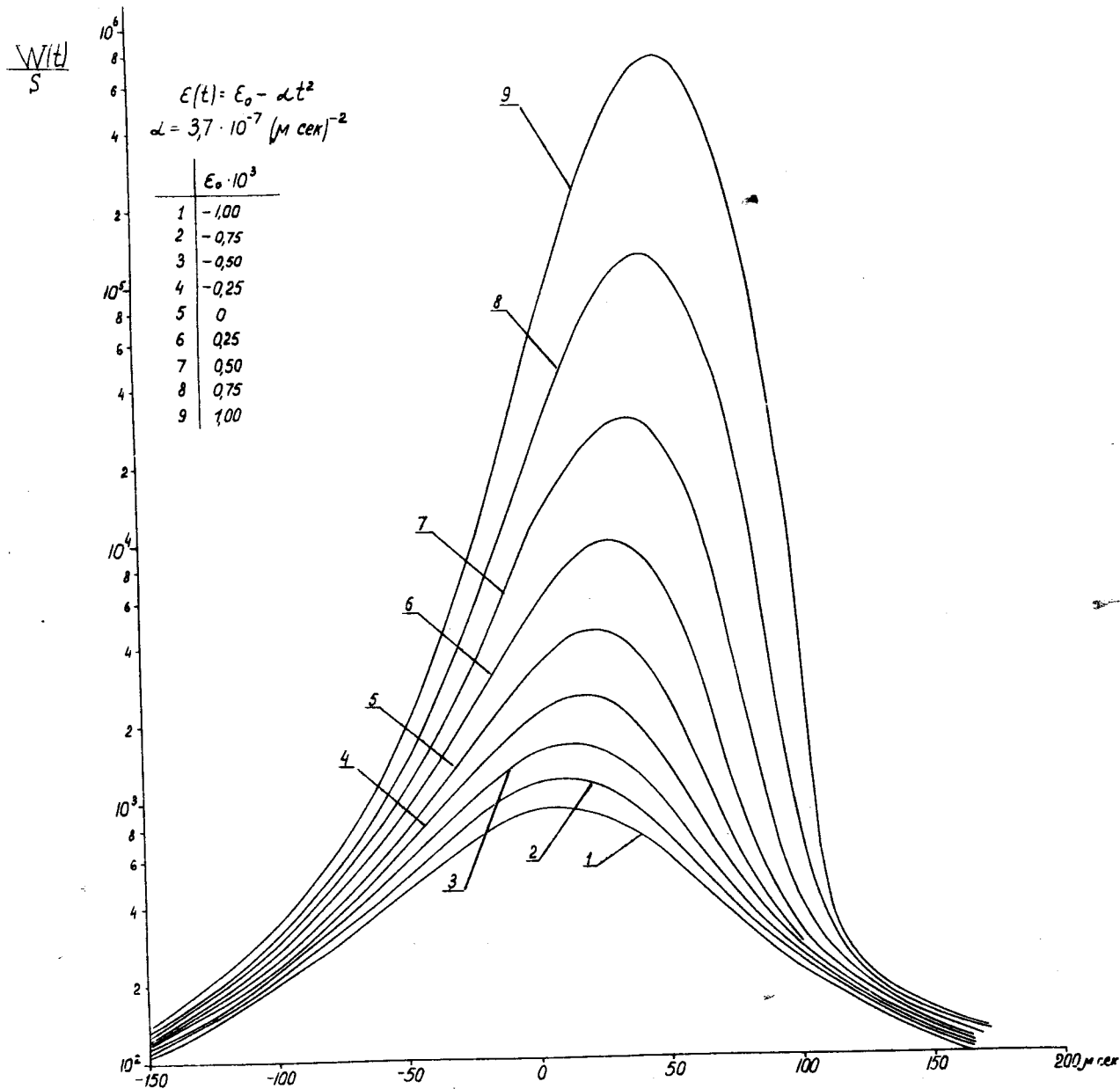


Рис. 4. Ожидаемый импульс от единичного источника нейтронов при различных максимальных реактивностях E_m .

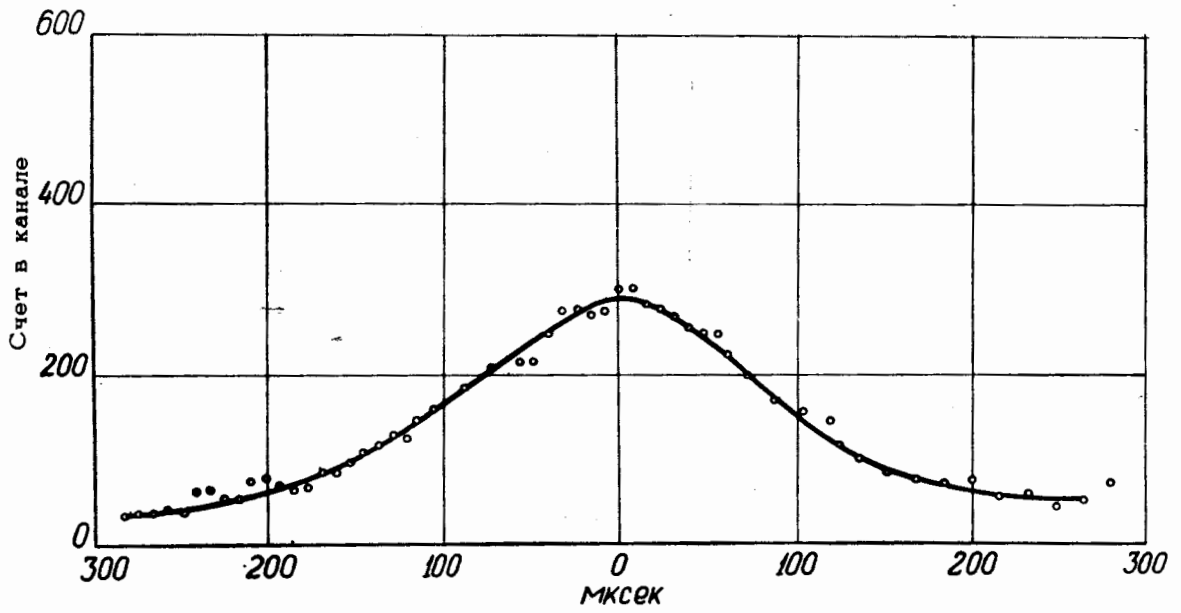


Рис. 5. Наблюдаемая форма импульса при $\epsilon_m = -5 \cdot 10^{-3}$.

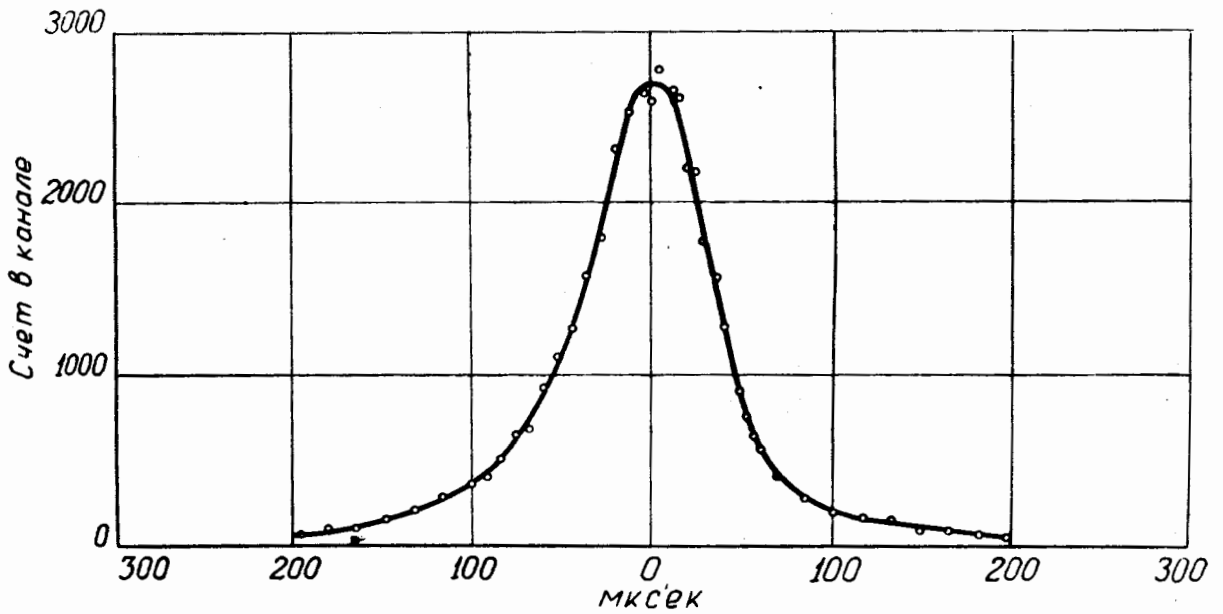


Рис. 6. Наблюдаемая форма импульса при $\epsilon_m = -0,4 \cdot 10^{-3}$.

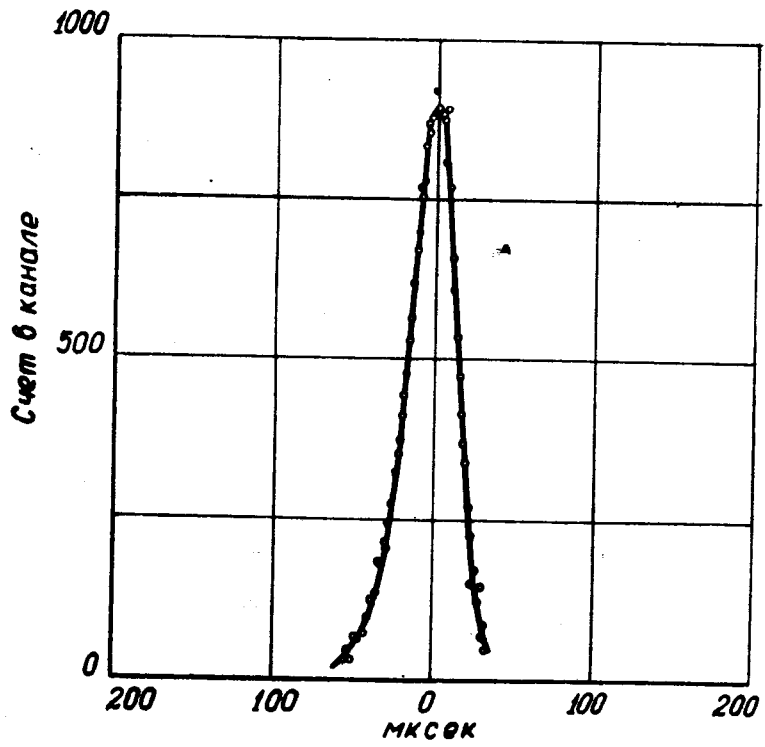


Рис. 7. Наблюдаемая форма импульса при $\epsilon_m \sim 0,7 \cdot 10^{-8}$.

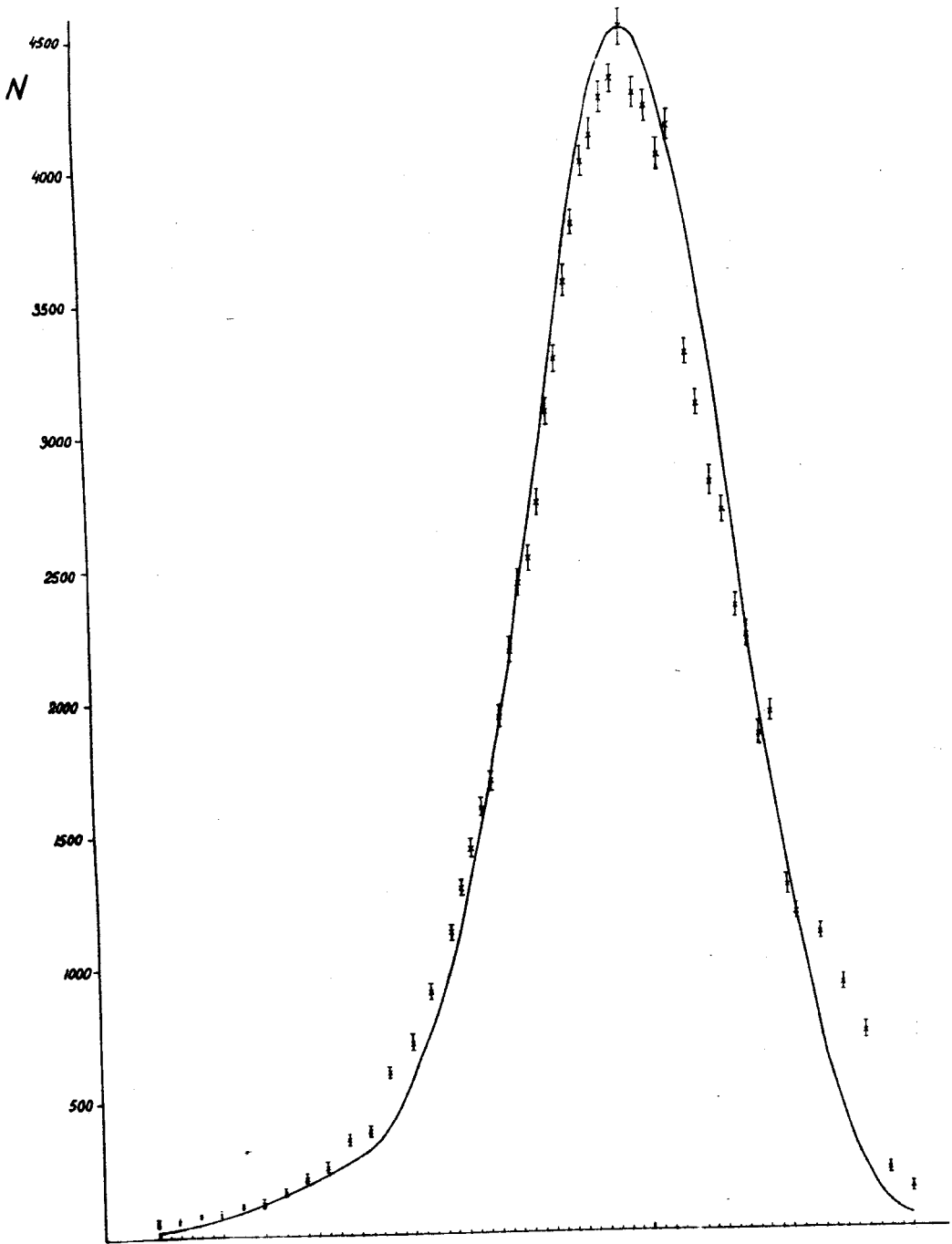


Рис. 8. Сравнение экспериментально наблюдаемой кривой для формы импульса с расчетом для $\epsilon_m = 0,75 \cdot 10^{-3}$.

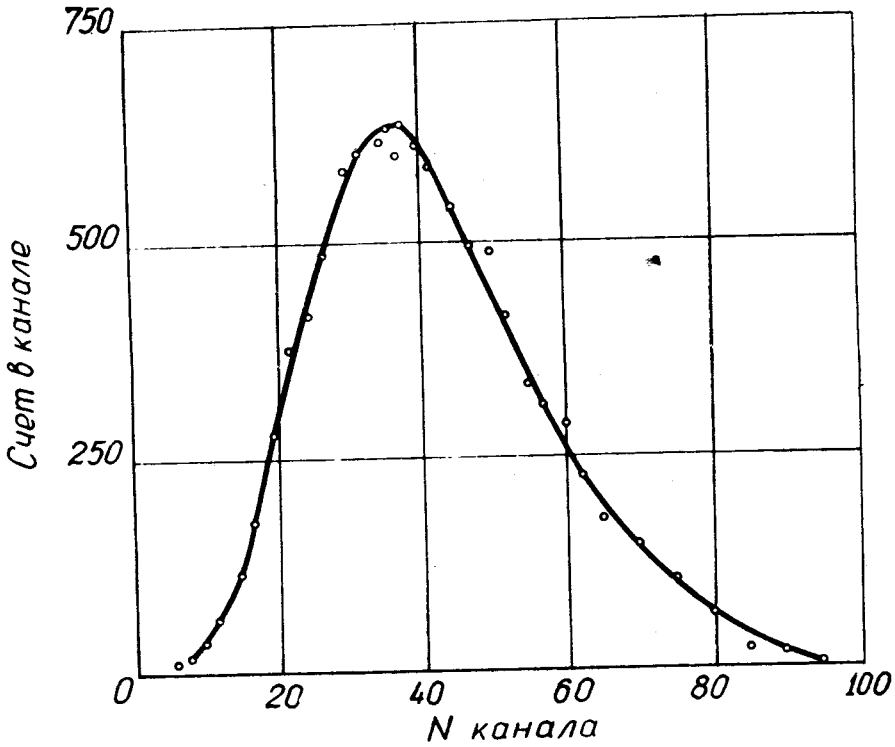


Рис. 9. Статистическое распределение количества нейтронов, излучаемых в импульсе при средней мощности реактора 4 ватта.

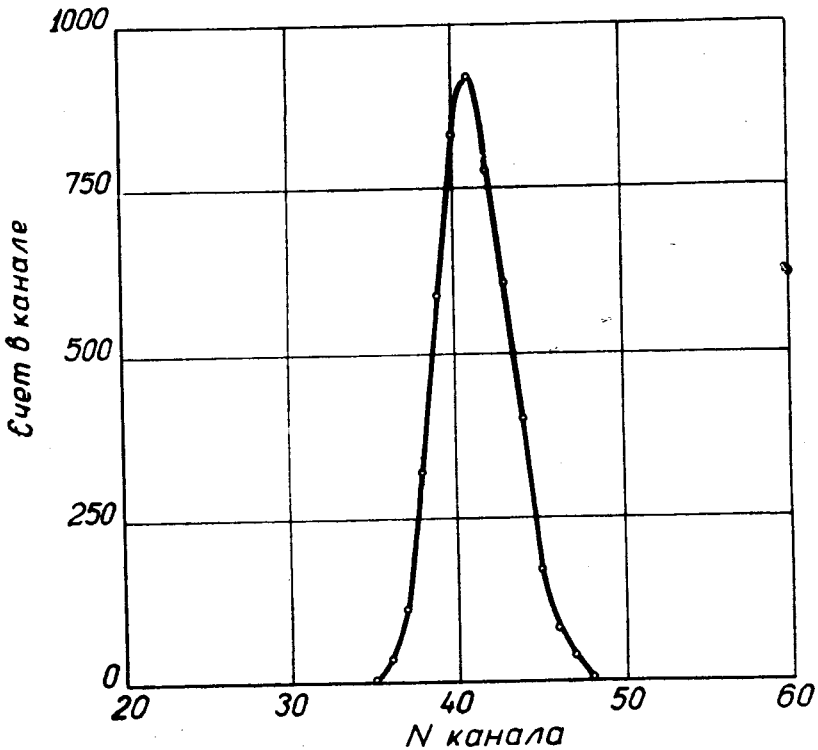


Рис. 10. Статистическое распределение количества нейтронов, излучаемых в импульсе при средней мощности $\sim 1,2$ квт.

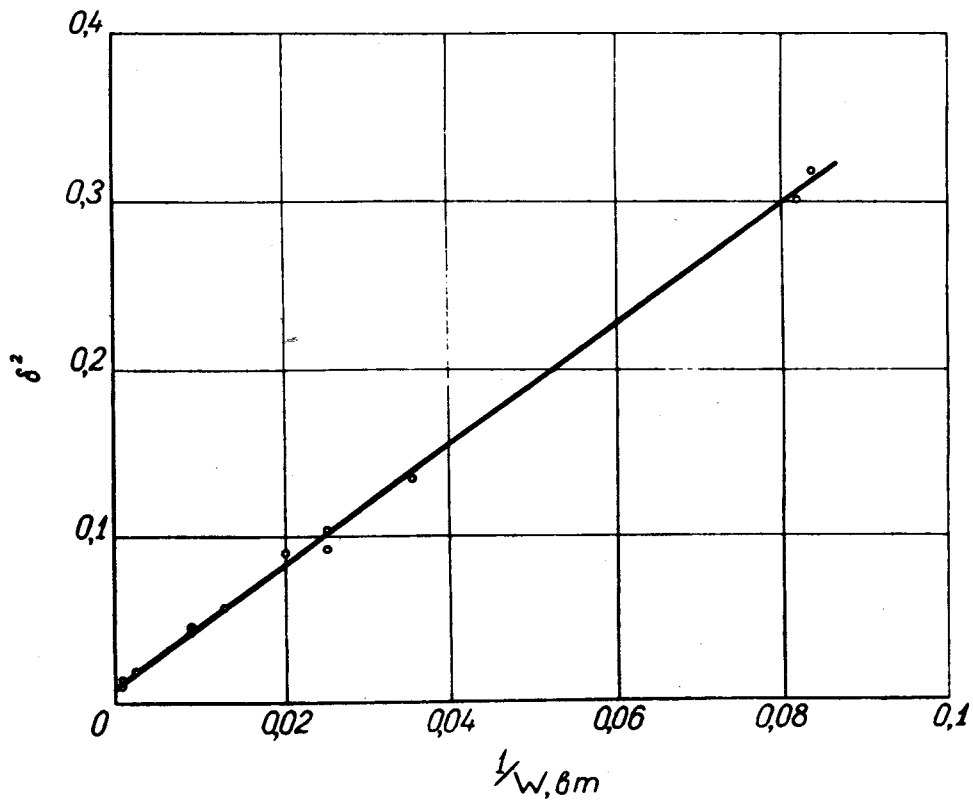


Рис. 11. Средний квадратичный разброс величин энергии, выделяемой в импульсе, как функция обратной величины средней мощности реактора.

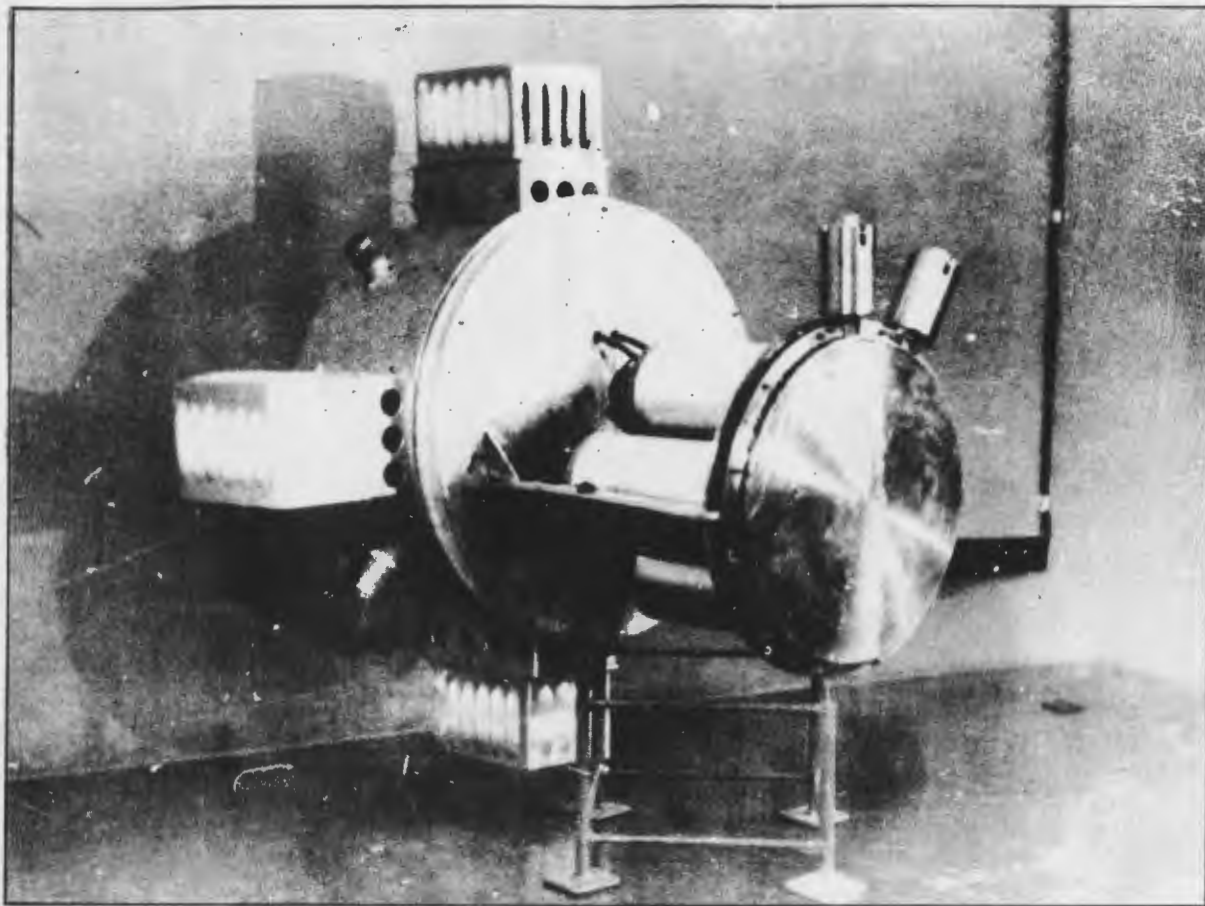
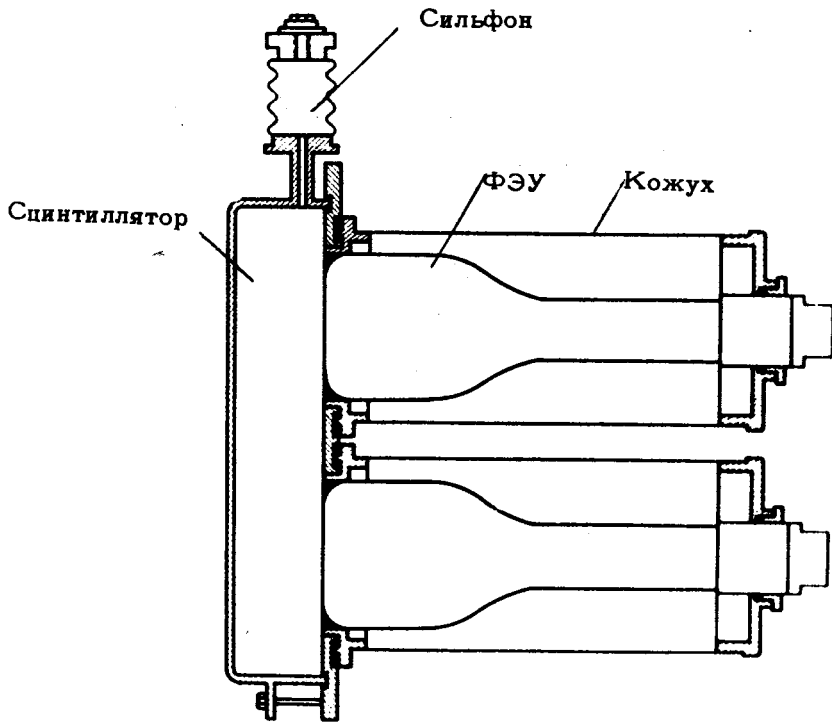


Рис. 12. Общий вид жидкостного сцинтилляционного детектора для измерения полных нейтронных сечений.



Нейтронный детектор

Рис. 13. Схема устройства нейтронного детектора для измерения полных нейтронных сечений.

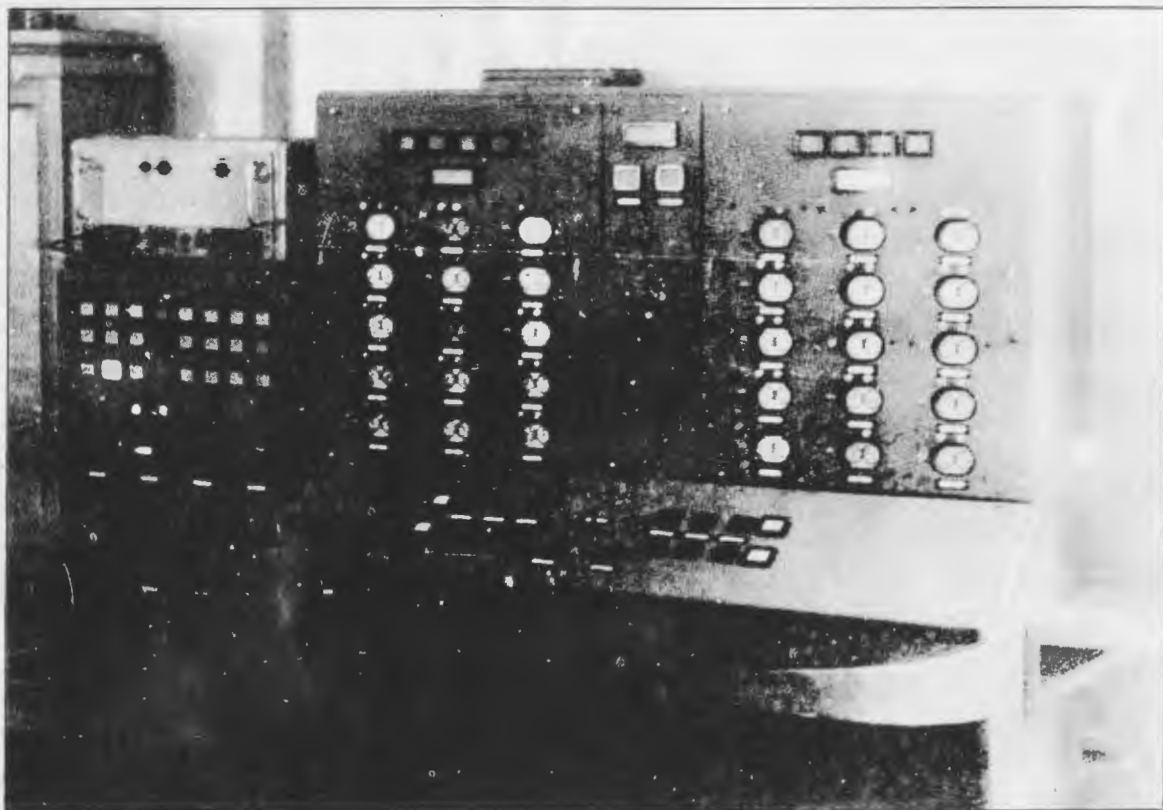


Рис. 14. Пульт управления аппаратурой для измерения полных нейтронных сечений.

Экспериментальная установка

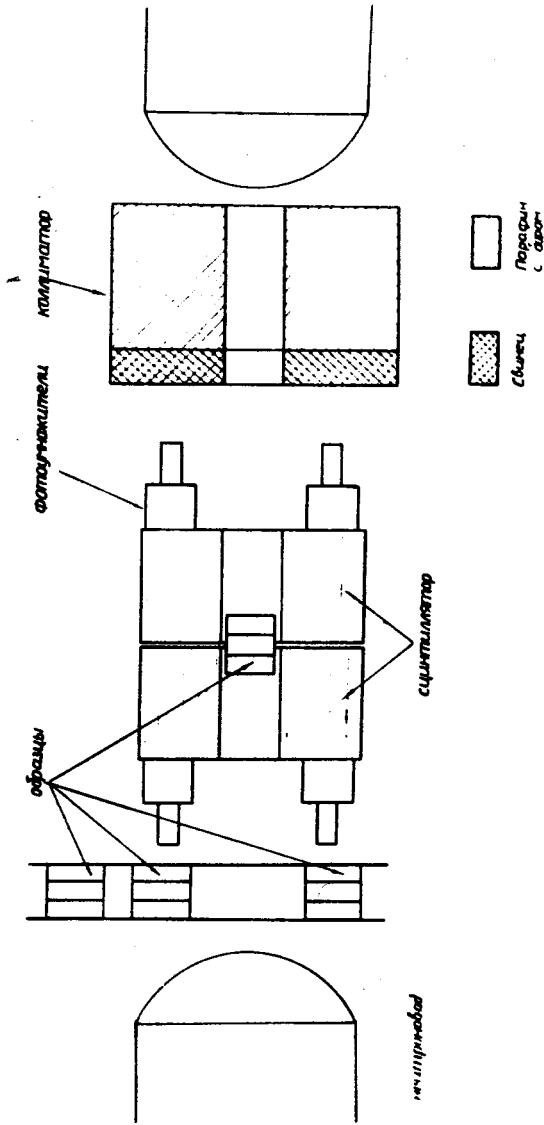


Рис. 15. Схема устройства детектора для измерений сечений радиационного захвата нейтронов.

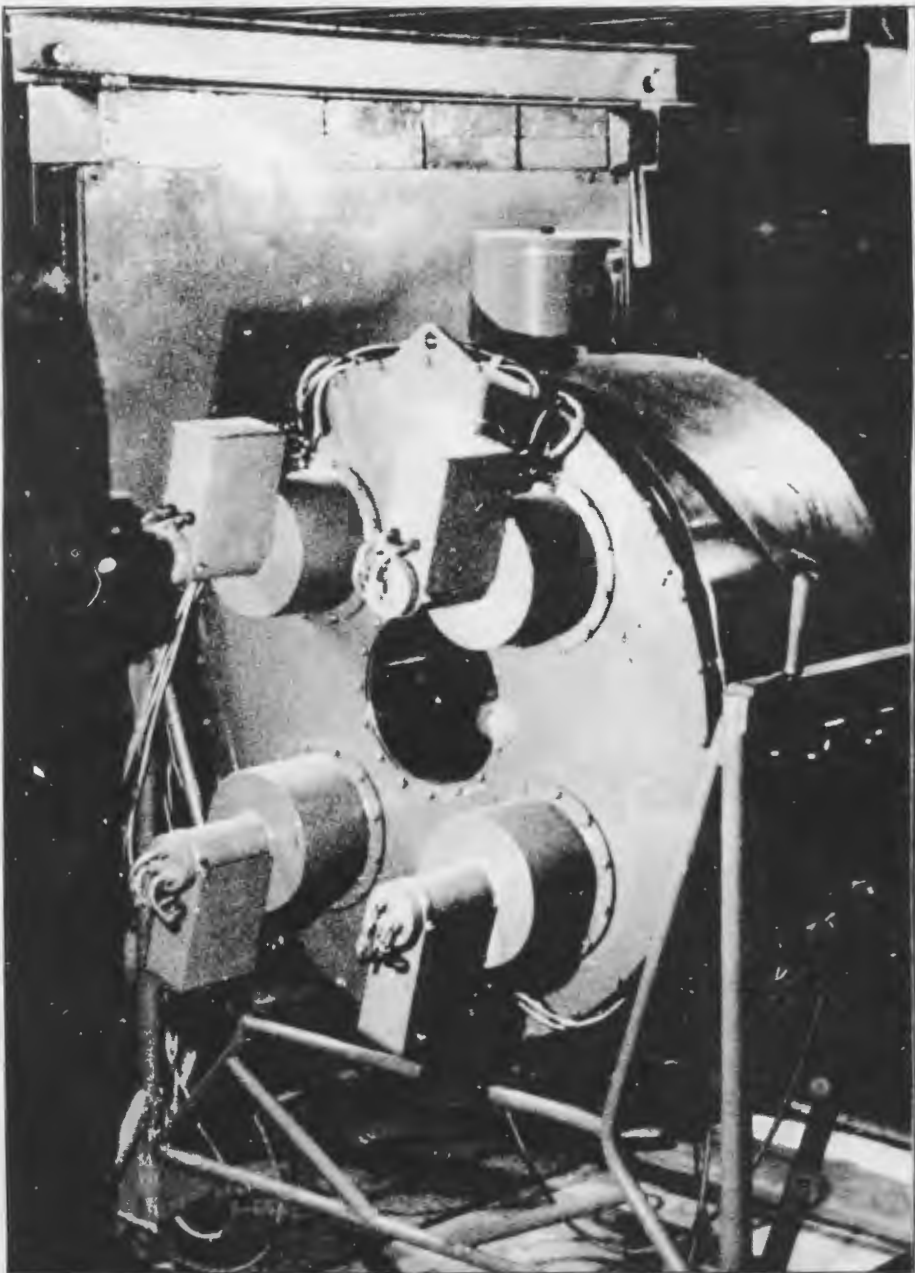


Рис. 16. Общий вид одного из двух баков жидкостных сцинтилляционных детекторов для измерения сечений радиационного захвата нейтронов.

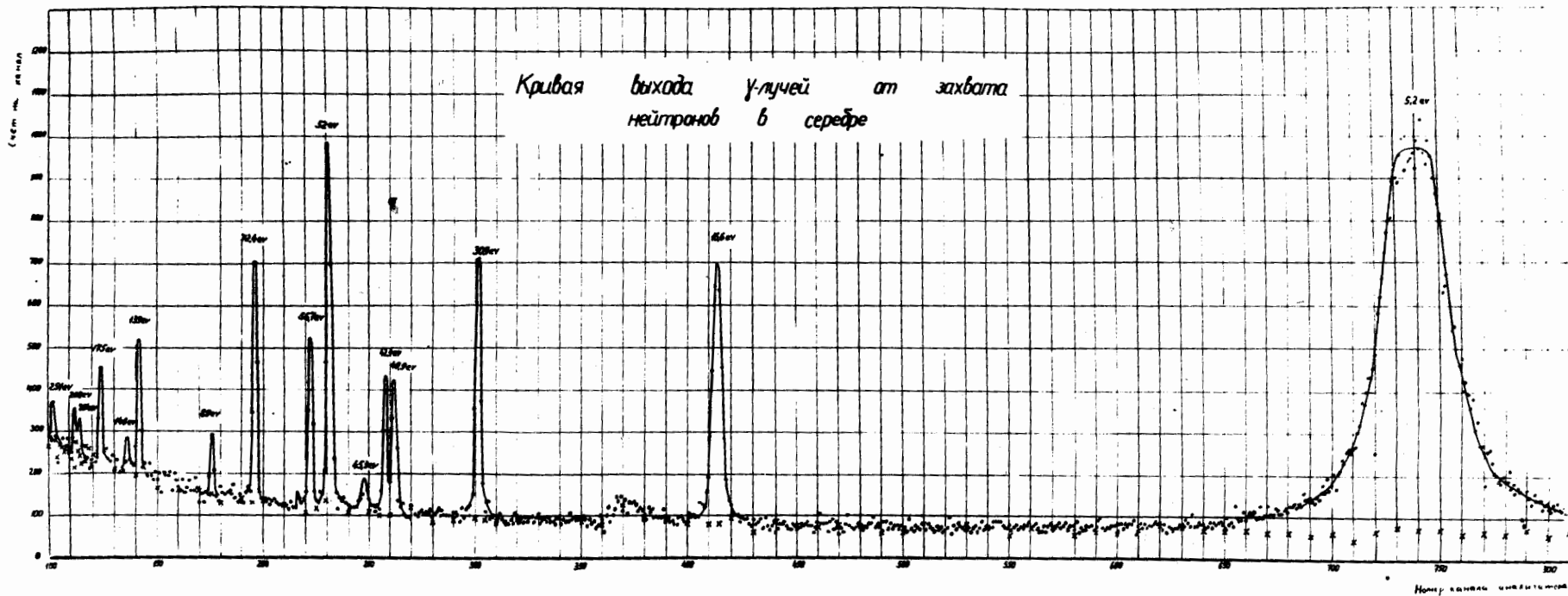


Рис. 17. Спектр, полученный при измерении радиационного сечения захвата нейтронов в серебре (кривая получена при экспозиции 1 час). Верхняя кривая с образцом серебра, нижняя без образца серебра /ФОН/.