

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



8045

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАДА

P13 - 8045

В.С.Дмитриев, Л.С.Ильинская, Г.Н.Погодаев,
В.В.Поднебеснов, А.Д.Рогов, В.Т.Руденко,
О.А.Шатская

ПЕРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ,
ВОЗБУЖДАЕМЫЕ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ
РЕАКТОРА ИБР-30 ИМПУЛЬСАМИ МОЩНОСТИ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

P13 - 8045

В.С.Дмитриев, Л.С.Ильинская, Г.Н.Погодаев,
В.В.Поднебеснов, А.Д.Рогов, В.Т.Руденко,
О.А.Шатская

ПЕРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ,
ВОЗБУЖДАЕМЫЕ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ
РЕАКТОРА ИБР-30 ИМПУЛЬСАМИ МОЩНОСТИ

Направлено в АЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В импульсных быстрых реакторах и бустерах тепло-выделяющие элементы /твэлы/ активной зоны подвержены действию тепловых ударов. Явление теплового удара обусловлено тем, что во время развития импульса мощности происходит скачкообразное повышение температуры зоны, величина которого зависит от энергии импульса мощности, массы и теплоемкости делящихся материалов. Механическая инерционность твэлов приводит к возбуждению в них термоупругих волн напряжений. Величина напряжений определяется физическими свойствами материала твэлов, их конструкцией, скоростью роста температуры и уровнем подогрева за импульс. Свободные колебания затухают в зависимости от интенсивности рассеяния запасенной во время импульса энергии. Воздействие ударов может усугубляться высокой частотой их повторения и вызывать ускоренный износ элементов активной зоны импульсного реактора или бустера из-за явлений усталости. Механические напряжения могут также быть причиной разрушения твэлов, если будет превышен предел прочности, либо во время одного импульса, либо за счет интерференции термоупругих волн от нескольких импульсов при слишком высокой частоте их следования. В свою очередь, динамика твэлов оказывает влияние на кинетику реактора.

Механические напряжения, возникающие в оболочке твэла импульсного быстрого реактора /ИБР/, впервые измерены в 1968 г. /1,2/. В качестве датчиков деформации использовались тензорезисторы. При сравнительно небольших энергиях импульсов /средний подогрев твэла за импульс 10°C / переменные механические напряжения

оказались равными $5 \cdot 10^6$ н/м². Данные эксперимента хорошо совпадают с результатами расчета, проведенного по методике J. Randles^{3/}. Вместе с тем было обнаружено, что в оболочках, кроме продольных, возбуждаются и поперечные /изгибные/ колебания, которые не были предсказаны расчетной методикой. Их возникновение обусловлено неравномерным температурным полем по сечению твэла. Конструктивно элементы ИБР выполнены в виде плутониевых стержней, свободно помещенных в защитные оболочки с верхней их заделкой в решетке активной зоны. Значительные напряжения в оболочке объясняются передачей механического импульса в месте опоры сердечника. При разработке конструкции твэлов для более мощного импульсного реактора /ИБР-30/ была применена плотная посадка сердечника в оболочку по цилиндрической поверхности без контакта сердечника с оболочкой по торцу^{2/}.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение деформаций и механических напряжений, возникающих в оболочке твэла ИБР-30 вследствие теплового удара, соответствующего среднему подогреву горючего активной зоны ИБР-30 на 20°С за импульс при энергии импульса $2 \cdot 10^{15}$ дел. Было сделано предположение, что ударные и колебательные процессы в оболочке твэла могут быть вызваны не только воздействием расширяющегося сердечника, но и непосредственным разогревом оболочки импульсом излучения. Для проверки этого предположения и определения истинных величин деформаций испытанию подвергались рабочий твэл и оболочка холостой сборки /без сердечника/, на которые были установлены высокотемпературные тензорезисторы на кремнеорганической основе. Для наблюдения и оценки электрических эффектов при импульсном облучении в самом тензорезисторе облучению подвергались тензорезисторы, укрепленные на пластинке из кремнеорганического цемента ВН-15Т.

Основные измерения проводились при работе ИБР-30 в режиме редких импульсов с частотой следования импульсов 0,2 Гц и средней мощности реактора до 15 кВт.

Конструкция экспериментальныхборок и методика измерений

Рабочая сборка /рис. 1/ состоит из штанги 2 с пластинчатой вставкой 3 и твэла 1, крепящегося к штанге с помощью резьбового соединения. Холостая сборка выполнена аналогично рабочей сборке, но вместо твэла к штанге прикреплена полая трубка, идентичная по своим размерам и материалу оболочке рабочего твэла ИБР-30. Во время испытаний сборки поочередно устанавливались в центральный канал активной зоны /3 на рис. 2/. Рабочая сборка охлаждалась воздухом, изменяя расход которого, можно было менять температуру твэла при неизменной мощности реактора. Для оценки влияния положения тензорезисторов относительно центра активной зоны на их показания сборка соединена с сервоприводом для ее поворота вокруг вертикальной оси во время измерений. Регулировка охлаждения, а также поворот сборки производились без снижения мощности реактора. Пластинка из цемента ВН-15Т с установленными на ней тензорезисторами помещалась в периферийный канал активной зоны /15 на рис. 2/ и крепилась к фланцу канала проволочной подвеской так, чтобы тензорезисторы были ориентированы вдоль оси канала.

Для измерений относительных деформаций использованы высокотемпературные проволочные приклеиваемые тензорезисторы с базой 10 мм. Материал тензочувствительной решетки - проволока диаметром 30 мкм из сплава НМ23Х10, предварительно термообработанная для стабилизации тепловых характеристик. В качестве связующего и изолирующего материала применен кремнеорганический цемент ВН-15Т. Температураборок измерялась хромель-алюмелиевыми термопарами. Схемы расположения тензорезисторов и термопар приведены на рис. 1 и 3. На пластинке из цемента ВН-15Т дополнительно установлена петля из коммутационного провода /II на рис. 3/ для оценки доли наводки от импульса излучения. Блок-схема измерительной аппаратуры приведена на рис. 4.

Измерительный прибор представляет собой транзисторный усилитель с коэффициентом усиления 1000 и

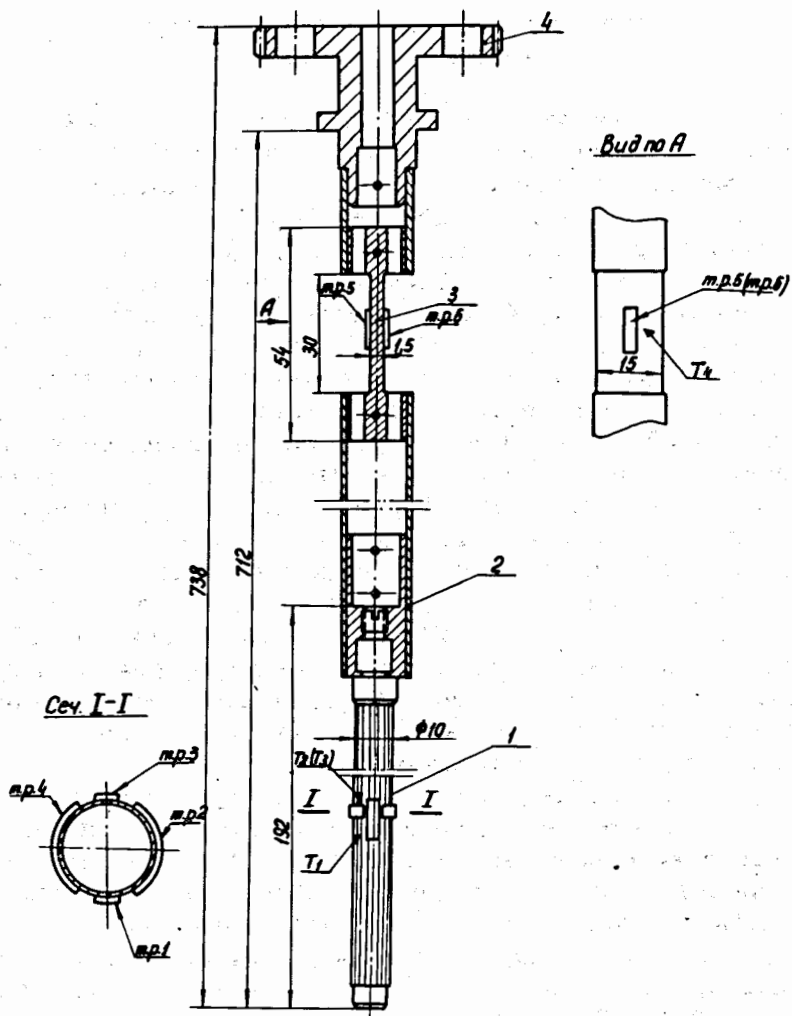


Рис. 1. Рабочая сборка. 1 - твэл ИБР-30, 2 - штанга, 3 - пластина подвески, 4 - шестерня привода штанги, Т₁-Т₄- термопары, т.р. 1 - т.р. 6 - тензорезисторы.

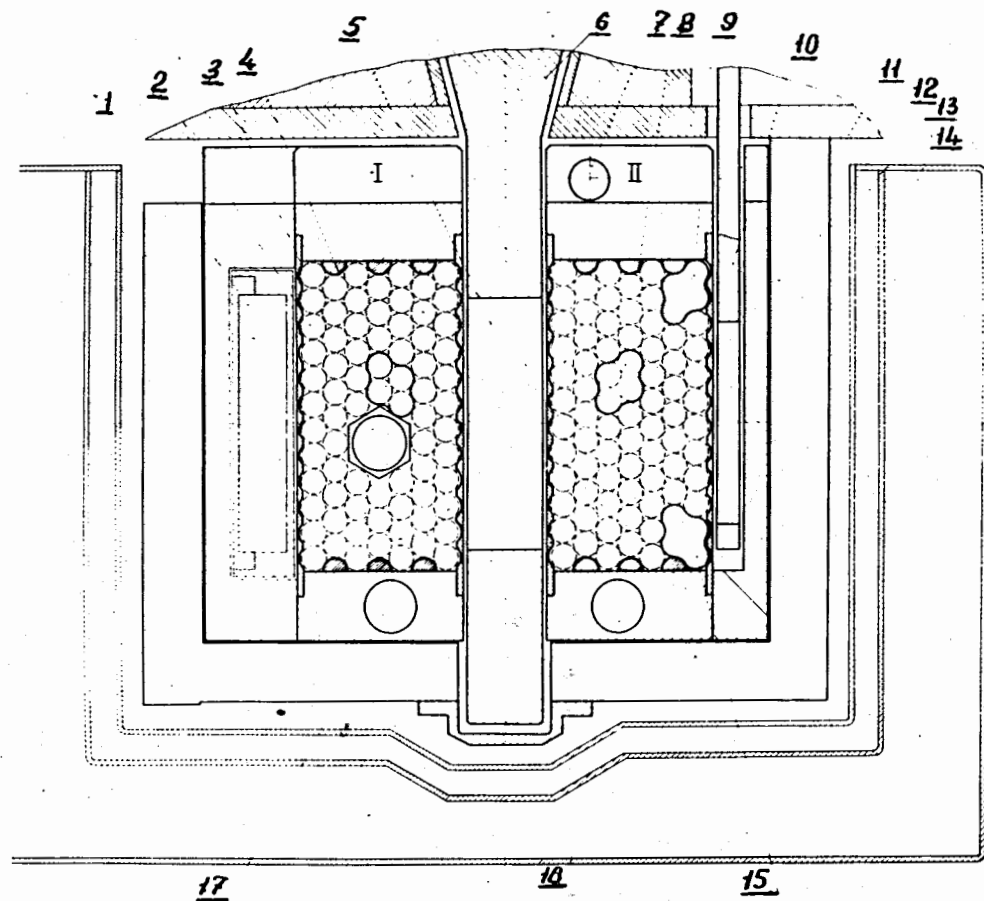


Рис. 2. Активная зона ИБР-30. I, II - кассеты неподвижной зоны, 1 - грубый регулятор, 2 - рабочий стержень, 3 - мишень линейного ускорителя электронов, 4, 8 - стержни аварийной защиты, 5 - основная подвижная зона, 6 - диск, 7 - канал Ra-Be источника, 9 - канал стержня редких импульсов, 10 - диск вспомогательной зоны, 11 - вспомогательная подвижная зона, 12 - отражатель, 13 - поглотитель, 14 - замедлитель, 15 - канал для облучения образцов, 16 - канал стержня ручного регулятора, 17 - канал стержня автоматического регулятора.

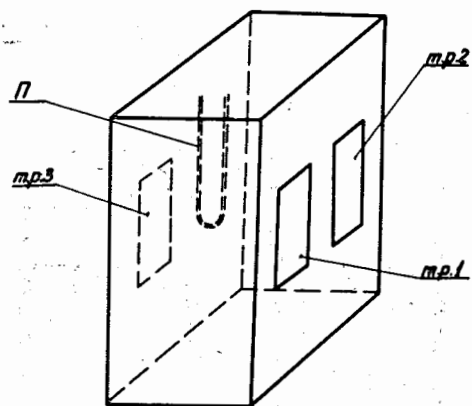


Рис. 3. Схема расположения датчиков на пластине из цемента ВН-15Т. т.р.1 - т.р. 3 - тензорезисторы, П - петля из коммутационного провода.

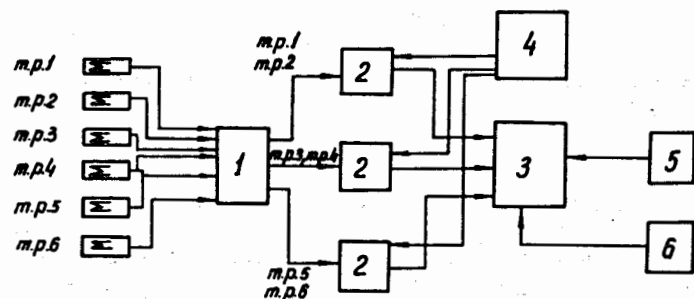


Рис. 4. Блок-схема измерительной аппаратуры. т.р. 1 - т.р. 6 - тензорезисторы, 1 - блок переключателей, 2 - усилитель, 3 - осциллограф, 4 - источник питания, 5 - блок "нулей", 6 - датчик импульса мощности реактора.

потенциометрической схемой подключения тензорезисторов. Для электропитания усилителей и тензорезисторов применена батарея гальванических элементов. Регистрация усиленных сигналов производилась фотографированием экрана электронного осциллографа С1-37, позволяющего регистрировать одиночные импульсы и сохранять свечение следа электронного луча в течение длительных промежутков времени. На экране последовательно записывались со сдвигом по вертикальной оси сигналы с нескольких тензорезисторов /либо несколько сигналов с одного тензорезистора/, после чего производилось фотографирование. Ждущая развертка осциллографа запускалась электрическим сигналом, который формировался блоком "нулей" и опережал импульс мощности на ~ 70 мксек. Для определения времени старта колебательных процессов в исследовавшихся сборках перед съемкой каждого кадра на экране записывался сигнал импульса мощности. При фотосъемке на записанные сигналы накладывалось светящееся изображение градуировочной сетки, по которой производилась калибровка каналов усиления и развертки осциллографа.

При обработке результатов определялись характеристики записанных колебаний. Градуировка измерительного тракта производилась с помощью камертонного устройства. Чувствительность (С) измерительного тракта вычислялась из соотношения

$$C = \frac{2A\phi}{UK},$$

где 2А - размах колебаний конца ножки камертона, мм; $\phi = 1,7 \cdot 10^{-5}$ постоянная камертона, которая определяет деформацию, соответствующую перемещению на 1 мм конца ножки камертона, на которой наклеивались тензорезисторы, аналогичные применявшимся в эксперименте; U - размах колебаний на экране осциллографа, дел; K = 0,05 В/дел - цена деления градуировочной сетки при тарировке.

Измеренное значение чувствительности оказалось равным $39 \cdot 10^{-5}$ ед.отн.деф./В и не зависящим от величины деформации. Относительные деформации (ϵ) исследовавшихся деталей определялись из соотношения:

$$\epsilon = BSK_1K_2,$$

где B - амплитуда колебаний на экране осциллографа, дел; S - чувствительность измерительного тракта, ед.отн.деф./В; K_1 - цена деления градуировочной сетки осциллографа при измерениях, В/дел, K_2 - поправочный коэффициент, учитывающий нелинейность амплитудно-частотной характеристики усилителя. Механические напряжения (σ) вычислялись по формуле

$$\sigma = \epsilon E,$$

где $E = 2.10^{11}$ н/м² - модуль упругости для материала исследовавшихся деталей.

Результаты измерений

На рис. 5 показаны сигналы от тензорезистора и петли, установленных на пластинке из цемента. Форма наводки на тензорезистор практически повторяет форму импульса мощности, а амплитуда пропорциональна плотности потока излучения. Петля, имитирующая коммутационные линии, не реагирует на импульс излучения, т.е. процессы, вызывающие появление наведенного сигнала, происходят в тензорезисторе.

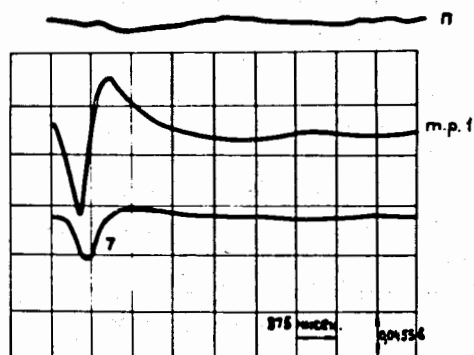


Рис. 5. Сигналы с тензорезистора /т.р. 1/ и петли (II), установленных на пластине из цемента ВН-15Т, 7 - импульс мощности реактора, энергия импульса 2.10^{15} дел.

Пример осциллограммы, полученный при облучении холостой сборки, показан на рис. 6. Из рисунка видно, что в начальный момент времени на тензорезисторах наводится такой же сигнал, как и при облучении пластинки из цемента. Осевые тензорезисторы /т.р. 1 и т.р. 3/ зарегистрировали колебания с переменной частотой ~ 3000 Гц и максимальной величиной напряжения $2,3.10^5$ н/м². Эти напряжения, по-видимому, обусловлены разогревом оболочки за счет импульса излучения реактора. Тензорезистор, наклеенный перпендикулярно оси оболочки /т.р. 4/, не регистрировал кольцевых деформаций. Вращение подвески относительно ее оси позволило установить, что показания тензорезисторов не зависят от ориентации сборки относительно центра зоны.

При анализе осциллограмм, которые получены с тензорезисторов, установленных на оболочке твэла рабочей сборки, выделены колебания двух видов: продольные и поперечные. Продольные /рис. 7/ возникают после импульса излучения при всех значениях средней мощности реактора и увеличиваются с увеличением его мощности. Частота этих колебаний ~ 5000 Гц. Как видно из рис. 7, сигналы с тензорезисторов 1 и 3 синфазны, что подтверждает предположение о продольности колебаний. Максимальная амплитуда сигналов при энергии импульса мощности 2.10^{15} дел. соответствует величине механического напряжения в оболочке 7.10^5 н/м². Поворот сборки вокруг центральной оси не влияет на показания тензорезисторов. При мощности импульса 1.10^{15} дел на продольные колебания накладываются поперечные /изгибные/ с частотой 1000 Гц. Как видно из рис. 8, сигналы с тензорезисторов 1 и 3 находятся в противофазе - это подтверждает предположение о поперечном характере колебаний. Максимальные напряжения в оболочке твэла от изгиба не превышают 5.10^5 н/м².

Амплитуда поперечных колебаний, зарегистрированных тензорезистором 1, достигает максимального значения при повороте сборки тензорезистором к центру зоны и уменьшается при повороте сборки на 90° /рис. 9/. Таким образом, изгиб твэла происходит в радиальной плоскости зоны и является следствием неравномерного

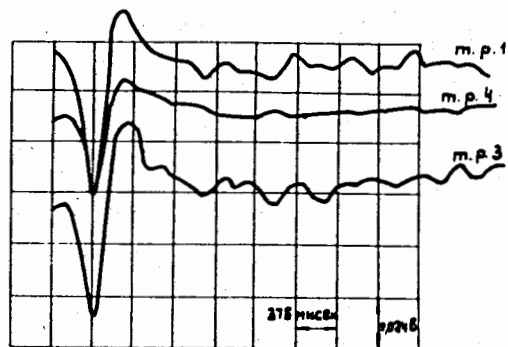


Рис. 6. Сигналы с тензорезисторов, установленных на оболочке холостой сборки. Оболочка повернута тензорезистором 1 к центру зоны, энергия импульса мощности реактора - $2 \cdot 10^{15}$ дел.

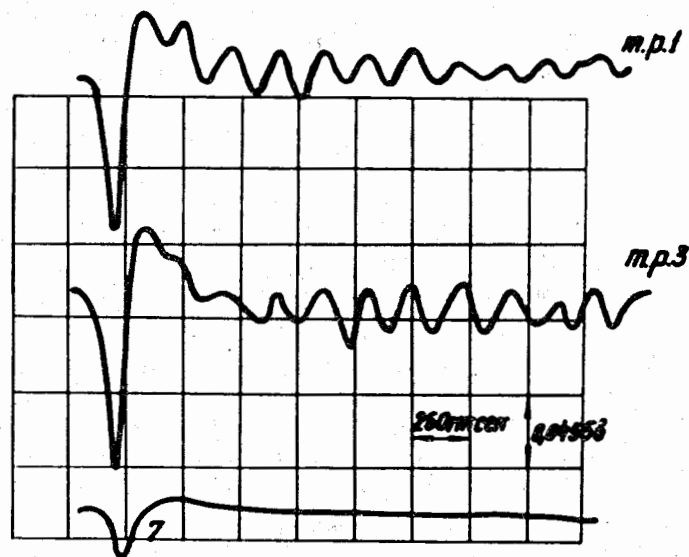


Рис. 7. Сигналы с тензорезисторов, установленных на оболочке твэла рабочей сборки. Твэл повернут тензорезистором 3 к центру зоны, 7 - импульс мощности, энергия импульса $2 \cdot 10^{15}$ дел.

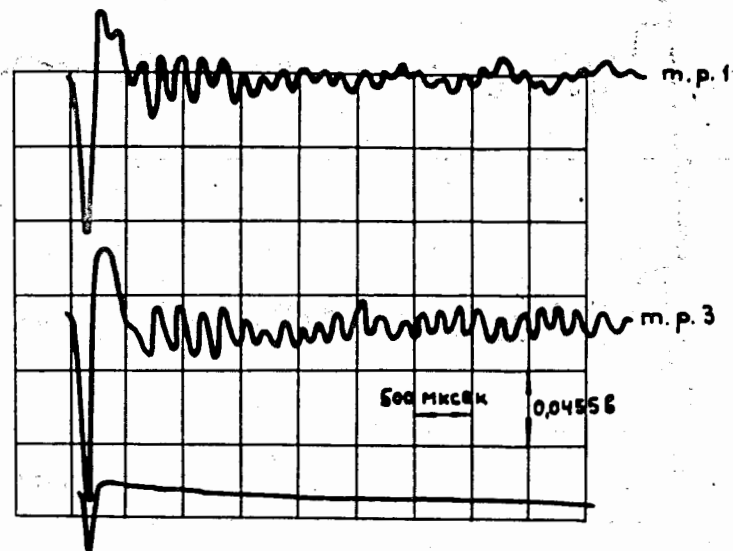


Рис. 8. Сигналы с тензорезисторов, установленных на оболочке твэла рабочей сборки. Твэл повернут к центру зоны тензорезистором 1, 7 - импульс мощности, энергия импульса $2 \cdot 10^{15}$ дел.

тепловыделения по сечению твэла из-за уменьшения нейтронного потока от центра зоны к периферии. Наводка, возникающая в момент образования импульса мощности, исключалась из рассмотрения в соответствии с результатами, полученными для тензорезисторов на пустой оболочке. Продолжительность механических колебаний твэла составляет 8-10 мсек. При постоянной средней мощности реактора производилось изменение температуры твэла регулированием интенсивности охлаждения. Повышение температуры оболочки с 112 до 230 °C привело к снижению напряжений, регистрируемых датчиками, на 20%. В связи с неисправностью тензорезисторов 2 и 4 измерений кольцевых деформаций оболочки не производилось. Максимальная сила, возникающая в подвеске стержня и определенная по напряжениям продольных колебаний пластинчатой вставки, составила 15 н при энергии импульса мощности $2 \cdot 10^{15}$ дел.

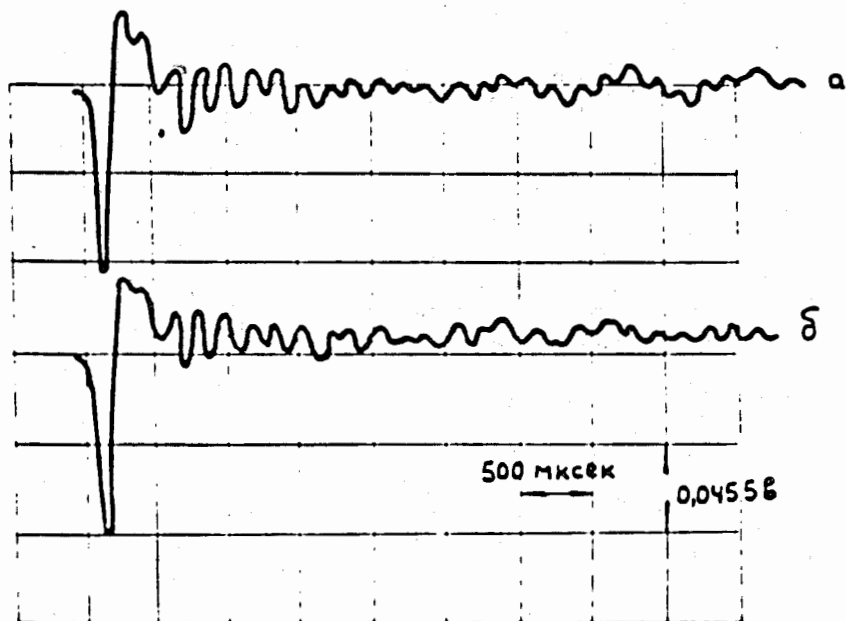


Рис. 9. Сигналы с тензорезистора 1, установленного на оболочке твэла рабочей сборки. а - твэл повернут к центру зоны тензорезистором 1, б - твэл повернут к центру зоны терморезистором 2, энергия импульса мощности $2 \cdot 10^{15}$ дел.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить И.М.Франка, С.К.Николаева за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения, Н.Л.Владимирова, Е.К.Киселеву, Н.Г.Паженцева - за помощь при подготовке эксперимента.

Литература

1. В.Д.Ананьев, Д.И.Блохинцев и др. ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969.
2. В.Т.Руденко. ОИЯИ, 13-5764, Дубна, 1971.
3. J. Randles, R. Laursma, EUR.-3654e, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июня 1974 года.