

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С3486

А-745

3472/2-78

21/VIII - 78

3 - 11551

В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов, А.Д.Рогов,  
Е.П.Шабалин

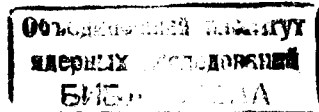
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭФФЕКТОВ ТЕПЛОВОГО УДАРА  
В ТВЭЛЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА  
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИБР-2

**1978**

3 - 11551

В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов, А.Д.Рогов,  
Е.П.Шабалин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭФФЕКТОВ ТЕПЛОВОГО УДАРА  
В ТВЭЛЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА  
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИБР-2



Ломидзе В.Л. и др.

3 - 11551

Экспериментальное исследование эффектов теплового удара  
в твэле импульсного реактора периодического действия ИБР-2

Экспериментальным путем исследованы механические эффекты теплового удара в твэле импульсного реактора ИБР-2. Непосредственно измерялись: высота подскока верхней топливной таблетки в результате быстрого (~100 мкс) подогрева топлива (до 25 К) и динамические напряжения в оболочке твэла. Экспериментальные данные в несколько раз занижены по сравнению с соответствующими теоретическими значениями величин, характеризующих силу теплового удара. Для объяснения указанного расхождения предложена качественная модель теплового удара в столбе неидеальных таблеток. Модель проверена в дополнительных экспериментах.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Lomidze V.L. et al.

3 - 11551

Experimental Investigation of Thermal Shock in IBR-2  
Fuel Pellets

The results of experimental investigation of thermal shock mechanical effects in IBR-2 fuel pellets are presented. The height of upper fuel pellet jumping due to the fast (about 100 mks) fuel temperature (upto 25 K) and thermomechanical stresses in the fuel pin cladding are measured. There is a great disagreement between experimental and theoretical results. For qualitative explanation of it a model of thermal shock in fuel pin, consisting of pellets, is proposed. The model was tested experimentally.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

## ВВЕДЕНИЕ

Явление теплового удара в импульсном реакторе обусловлено быстрым нагревом ядерного топлива за время нейтронной вспышки. Из-за механической инерции топливные стержни не успевают расширяться в соответствии с ростом температуры и на начальном отрезке времени оказываются сжатыми. В дальнейшем потенциальная энергия сжатого стержня расходуется на возбуждение волн деформаций и напряжений в оболочке твэла, а также на энергию упругих колебаний самого стержня /если он целый/ или на кинетическую энергию его частей /если он состоит из отдельных таблеток/. Для мощных импульсных реакторов периодического действия, каким является реактор ИБР-2<sup>1/1</sup>, тепловой удар становится актуальной проблемой как в отношении прочности оболочек твэлов, так и в отношении ядерной безопасности /из-за сопутствующих эффектов реактивности/. Методы расчета механических эффектов теплового удара для твэлов со сплошными топливными сердечниками довольно надежны, если свойства топлива известны с достаточной степенью точности. Однако существующие методы описания теплового удара в составных топливных стержнях<sup>3-5</sup> основаны на предположении об идеальном контакте между топливными таблетками, поэтому теоретические выводы, основанные на этой модели, могут привести к существенно завышенным оценкам "силы" теплового удара. В этом случае экспериментальные методы исследования быстрого нагрева топливных стержней особенно полезны.

Целью настоящей работы является обнаружение и измерение механических эффектов теплового удара в составном топливном сердечнике экспериментального твэла импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2 /1/. Параллельно делается попытка приблизительно описать тепловой удар в топливном столбе реальных таблеток с использованием методов, основанных на модели идеального контакта.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальное устройство состоит из экспериментального твэла и твэла-имитатора, которые прикреплены в верхней части к стальной трубе диаметром 22 мм. Труба, в свою очередь, привинчена к опорной пластине. Вся конструкция помещалась вне активной зоны реактора и облучалась импульсами нейтронов и  $\gamma$ -квантов с энергией до  $6 \cdot 10^{16}$  делений и длительностью  $\sim 100$  мкс. В некоторых случаях для увеличения плотности делений экспериментальный твэл окружался цилиндрической оболочкой из оргстекла толщиной 10 мм, а со стороны, противоположной реактору, устанавливался медный отражатель нейтронов.

Экспериментальный твэл ИБР-2 /см. рис. 1/ представлял собой герметичную трубку из нержавеющей стали диаметром 8,6 мм, толщиной 0,4 мм и длиной 300 мм, заполненную таблетками из спеченой двуокиси плутония диаметром не более 7,53 мм и общим весом 97,45 г. Твэл-имитатор имел медный сердечник и предназначался для выделения эффектов, не обусловленных тепловым ударом в  $PuO_2$ . На стальных оболочках экспериментального твэла и твэла-имитатора были размещены тензодатчики /поз. 6/ и датчики перемещений верхней таблетки /поз. 3, 4 на рис. 1/. В общей сложности на каждой оболочке было наклеено 4 тензодатчика: два датчика фольгового типа /1ФКТК-5-100С-Ш/ и два бумажных /2ПКБ-10-200ГБ/, с коэффициентами тензочувствительности 2,22 и 2,13 соответственно.

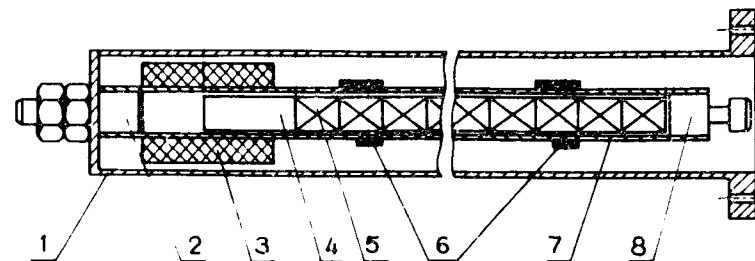


Рис.1. Экспериментальный твэл ИБР-2: 1 - опорная труба, 2 - верхняя пробка, 3 - катушка датчика малых перемещений /ДМП/, 4 - подвижный сердечник ДМП, 5 - топливные таблетки, 6 - тензодатчик, 7 - оболочка твэла, 8 - нижняя пробка.

Непосредственно измерялись следующие величины: высота подскока верхней таблетки  $h$ , статическое удлинение столба таблеток  $\Delta L$  в результате подогрева топлива за импульс, деформации  $\epsilon_s$  оболочки твэла после импульса мощности реактора. Блок-схемы измерений указанных величин представлены на рис. 2а,б.

Датчиком малых перемещений /ДМП/, с помощью которого измерялись значения  $h$  и  $\Delta L$ , служил дифференциальный трансформатор с подвижным сердечником из пермаллоевой ленты, установленный свободно на верхней таблетке топливного столба. Перемещение сердечника вызывало изменение амплитуды электрических колебаний в сигнальной обмотке; регистрация этого изменения осуществлялась двумя параллельно подключенными осциллографами с разными масштабами развертки по осям X и Y: медленной - для регистрации удлинения и быстрой - для регистрации высоты подскока.

В измерениях деформаций использовались два запоминающих двухлучевых осциллографа.

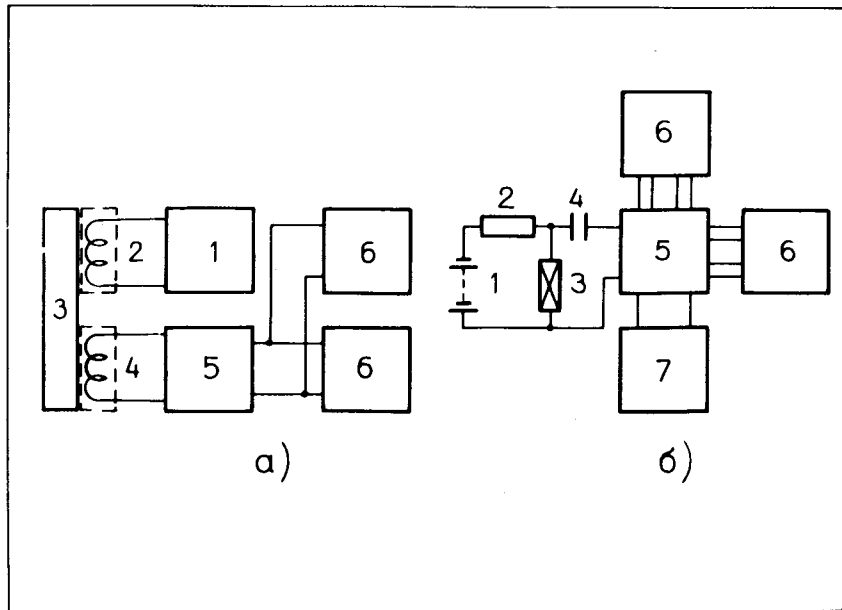


Рис.2. Блок-схема измерений.

а/ Измерение перемещений верхней таблетки: 1 - низкочастотный генератор, 2 - обмотка возбуждения ДМП, 3 - подвижный сердечник ДМП, 4 - сигнальная обмотка ДМП, 5 - усилитель, 6 - осциллограф.

б/ Измерение деформаций оболочки: 1 - источник питания, 2 - сопротивление, 3 - тензодатчик, 4 - разделительный конденсатор, 5 - четырехканальный усилитель, 6 - двухлучевой запоминающий осциллограф, 7 - блок питания усилителя.

## 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Полученные экспериментальные данные /высота подскока верхней таблетки  $h$ , удлинение топливного сердечника  $\Delta L$  в результате подогрева за один импульс,  $\epsilon_s$  - деформация оболочки твэла/ позволяют определить:

а/ скорость верхней таблетки

$$v = \sqrt{2gh}; \quad /1/$$

б/ подогрев ядерного топлива за время быстрой части импульса

$$T = \gamma_q \Delta L / \alpha L, \quad /2/$$

где  $L$  (230,5 мм) - высота топливного сердечника,  $\alpha$  ( $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1/2}$ ) - коэффициент линейного расширения  $\text{PuO}_2$ ,  $\gamma_q$  ( $0,55 \pm 0,05$ ) - доля энергии в быстрой части импульса;

в/ продольные динамические напряжения в оболочке

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad /3/$$

( $E_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$  - модуль упругости стали)

Подогрев топлива  $T$  оценивался также по данным измерения флюэнса нейтронов  $F(0,1)$  /с энергией больше 0,1 МэВ/:

$$T = \gamma_q A F(0,1) / k_z. \quad /4/$$

Здесь  $A = 3,6 \cdot 10^{13} \text{ К/нейтр./см}^2, k_z$  - коэффициент неравномерности тепловыделения по длине твэла. Оценка по флюэнсу была возможна только в отсутствие замедлителя из оргстекла.

Погрешность измерения высоты подскока таблетки и удлинения топливного сердечника определялась точностью предварительной градуировки ДМП и классом точности используемых приборов. Систематическая погрешность оценивается значением  $\pm 5\%$ , статистическая погрешность - не более  $\pm 2\%$ . Погрешность измерения деформаций  $\epsilon_s$  была большой /порядка 50%/ , так как измеренные деформации  $//3 \div 5/ \cdot 10^{-6}$  оказались на пороге чувствительности схемы.

Типичная картина подскока верхней таблетки, зарегистрированная ДМП, показана на рис. 3, а величина статического удлинения столба таблеток - на рис. 4.

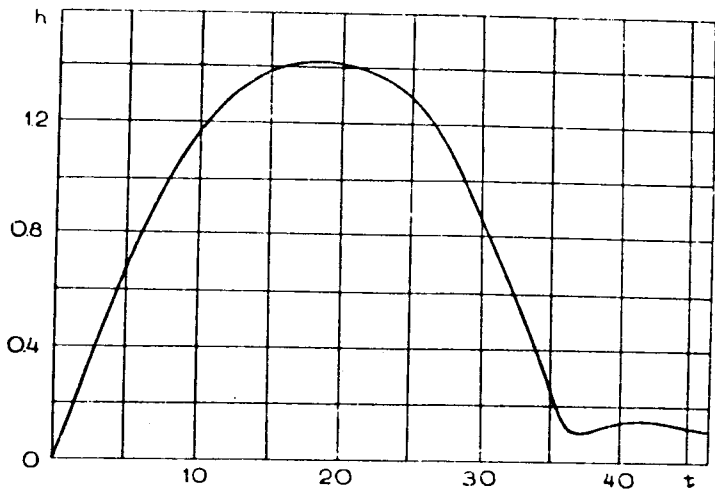


Рис.3. Осциллограмма траектории полета верхней таблетки при подогреве топлива на 25 К:  $h$  - высота подъема таблетки относительно начального положения /мм/,  $t$  - время /мс/.

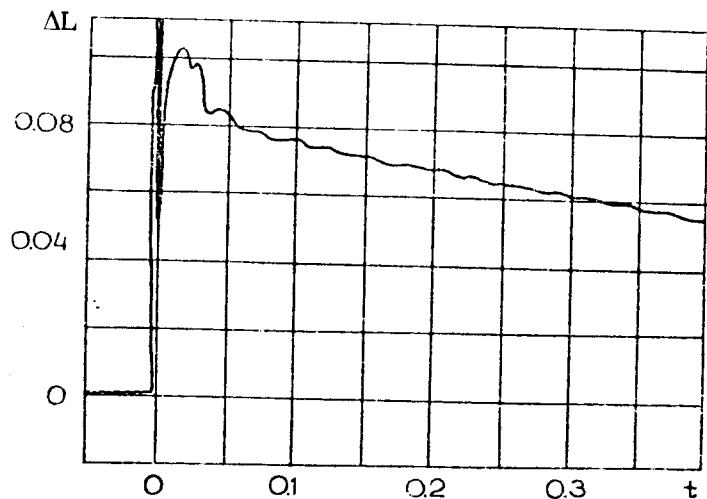


Рис.4. Осциллограмма статического удлинения столба таблеток /мм/. Уменьшение  $\Delta L$  со временем  $t$  /с/ обусловлено остыванием топлива.

В твэле-имитаторе удлинения стержня и "прыжков" обнаружено не было.

На рис. 5 показана зависимость скорости расширения столба таблеток от подогрева топлива.

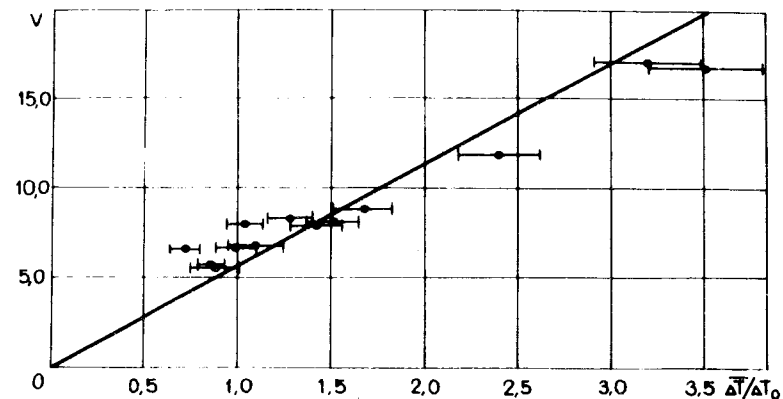


Рис.5. Зависимость скорости подскока верхней таблетки /см/с/ от подогрева  $\Delta T$  топлива за импульс  $\Delta T_0 = 7$  К/.

В предположении идеального контакта между таблетками скорость верхней таблетки можно оценить по формуле <sup>/3,5/</sup>:

$$v = acT, \quad /5/$$

где  $c = \sqrt{E/\rho}$  - скорость звука в  $PuO_2$ .

Если предположить, что эта формула справедлива и для случая неидеального контакта, то величина  $c$ , соответствующая измеренной скорости подскока  $v$  и известным значениям  $a$  и  $T$ , оказывается равной  $1 \pm 0,2 \cdot 10^3$  м/с, т.е. приблизительно в три раза ниже скорости звука в  $PuO_2$ . Приведенная 20%-ная погрешность определяется, главным образом, систематической погрешностью оценки величины подогрева топлива.

В работе <sup>/4/</sup> показано, что амплитуда незатухающей волны напряжений в оболочке, возникающих в результа-

те теплового удара в топливе, рассчитывается по формуле

$$\sigma_{s \max} = \frac{E_s a c T}{c_s (1 + \gamma)} \left[ \delta_a + \delta_0 \frac{\sin \pi y / 2}{\pi y / 2} \right], \quad /6/$$

где  $\gamma = E_s S_s c / E S c_s$  - жесткость оболочки,  $E, c$  и  $S (E_s, c_s, S_s)$  - модуль упругости, скорость звука и сечение стержня /оболочки/,  $y = c \Theta / L$  - отношение длительности нейтронной вспышки  $\Theta$  к времени пробега  $L/c$  звуковой волны вдоль стержня длиной  $L (y \leq 1)$ ,  $\delta_a$  и  $\delta_0$  - составляющие аксиального коэффициента неравномерности тепловыделения  $K_z = \delta_a + \delta_0 (\delta_a + 2\delta_0 / \pi = 1)$ . При  $c = 10^{-3}$  м/с получим, после подстановки в /6/ численных значений остальных параметров:

$$\sigma_{s \max} = 3,5 \cdot 10^5 \cdot T \quad /Н/м^2 / \quad /6a/$$

Таким образом, если принять, что  $c = 10^3$  м/с, то теоретические значения амплитуды напряжений в оболочке для измеренных подогревов топлива /5-25 градусов/ лежат в интервале  $1,8 \div 8,6 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Однако из-за больших импульсных наводок на кабель и тензодатчики /рис. 6/ измерить деформации оболочки во время импульса мощности или непосредственно после его окончания /т.е. в условиях, когда затуханием колебаний оболочки можно пренебречь/ не удалось. Поэтому приведенные расчетные данные для  $\sigma_{s \max}$  пока не имеют экспериментального подтверждения.

Деформации оболочки были измерены лишь спустя некоторое время /несколько периодов колебаний/ после окончания импульса и даже для самых мощных импульсов не превышали  $5 \cdot 10^{-6}$  / $\sigma_{s \max} = 10^6$  Н/м<sup>2</sup>/.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты эксперимента показывают, что скорость расширения топливного сердечника, определенная по

высоте подскока верхней таблетки, в несколько раз ниже теоретического значения  $v = a c T$ , где  $c$  - скорость звука в  $PuO_2$ . Амплитуда зарегистрированных после импульса мощности напряжений в оболочке очень мала /в десятки раз ниже расчетного значения /6/ для амплитуды напряжений во время вспышки/.

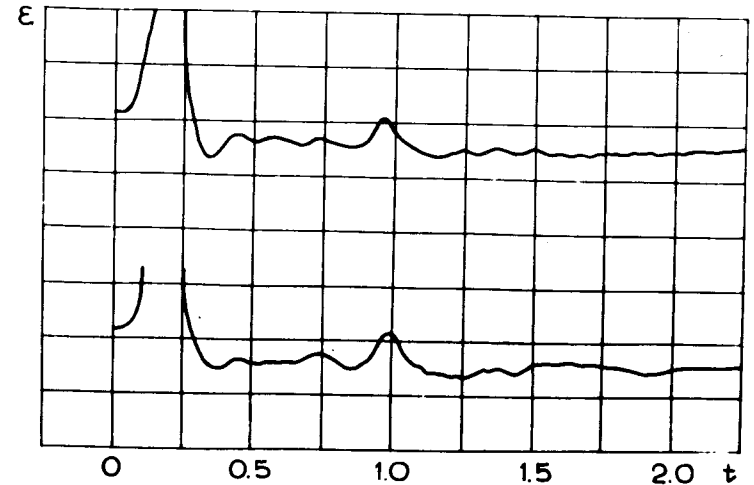


Рис.6. Осциллограмма колебаний оболочки:  $\epsilon$  - деформация оболочки /цена деления шкалы  $1,2 \cdot 10^{-5}$  /,  $t$  - время /мс/. Область от 0 до 0,4 мс обусловлена импульсом наводки.

Малость измеренных инерциальных эффектов в экспериментальном твэле ИБР-2 объясняется, вероятно, неидеальностью границ раздела между таблетками. Неидеальность контакта на начальной стадии деформации сжатия /область  $(0, \epsilon_0)$  на рис. 7/ должна приводить к снижению упругости стержня и, следовательно, к уменьшению величины  $c$ . При больших деформациях ( $\epsilon > \epsilon_0$ ) влияние граничных эффектов ослабевает и стержень начинает вести

себя в соответствии с законом Гука\*. Если изображенную на рис. 7 зависимость напряжений сжатия от деформации  $\epsilon$  представить в форме ( $\epsilon > 0$ ):

$$\sigma = -E \begin{cases} \epsilon_0^{-1} \epsilon_0 (\epsilon/\epsilon_0)^n, & 0 < \epsilon < \epsilon_0 \\ \epsilon^{-n-1} (n-1) \epsilon_0, & \epsilon > \epsilon_0, \end{cases} \quad /7/$$

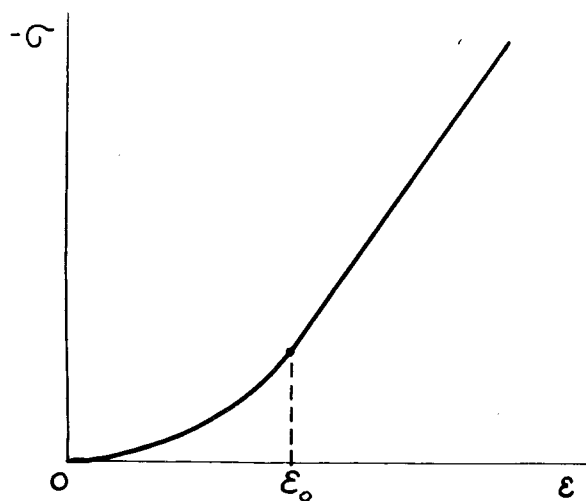


Рис. 7. Предполагаемая зависимость напряжений сжатия  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  для столба неидеальных таблеток:  $\epsilon_0$  - величина деформации, начиная с которой дальнейшее сжатие стержня можно считать подчиняющимся закону Гука.

\* Излагаемая здесь качественная модель поведения столба таблеток является лишь грубым приближением к действительности и не затрагивает таких важных вопросов, как диссипация энергии на границах раздела, случайный характер контакта /возможность, например, перекоса таблеток/ и т.п.

где  $n \geq 1$  и  $\epsilon_0 > 0$  - параметры, требующие экспериментального определения, то в "догуковской" области ( $\epsilon < \epsilon_0$ ) уравнение движения частиц стержня примет вид ( $\sigma \leq 0, T = 0$ ):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0^{n-1}} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n-1} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad /8/$$

т.е. эффективная скорость распространения сигнала вдоль столба таблеток порядка

$$c_T = \left( \frac{v}{\epsilon_0} \right)^{\frac{n-1}{n+1}} c. \quad /9/$$

Здесь  $v$  - скорость смещения частиц топлива,  $c$  - скорость звука,  $v/c \leq \epsilon_0$ . Из /9/ видно, что  $c_T < c$  при  $\epsilon < \epsilon_0$  и  $c_T = c$  при  $\epsilon \geq \epsilon_0$ , причем скорость распространения сигнала  $c_T$  зависит от скорости частиц стержня  $v$  /при  $\epsilon < \epsilon_0$ /. В случае теплового удара в столбе таблеток  $v \sim aT$ . При механическом ударе величина  $v$  равна скорости ударника.

Влияние границ раздела на характер деформаций /сжатия/ столба таблеток в описанной модели целиком учитывается введением параметра  $c_T$  вместо скорости звука  $c$ . Тот факт, что  $c_T < c$ , качественно объясняет малость измеренных инерциальных эффектов при тепловом ударе.

С целью проверки сделанных выше предположений и попытки объяснения малости наблюдаемых инерциальных эффектов были проведены дополнительные исследования, относящиеся к механическому удару по стержню.

В стальную оболочку длиной 444 мм помещался либо керамический /из электрофарфора/ стержень, либо столб керамических таблеток той же высоты /высота столба - 260 мм, высота одной таблетки - 5 или 10 мм/. Сверху



на стержень свободно падал вольфрамовый ударник. В момент удара включался запуск осциллографа, и сигнал с тензодатчиков, наклеенных на нижней части оболочки, регистрировался на экране.

В этих исследованиях было установлено:

1. Скорость распространения сигнала ( $c_T$ ) в столбе таблеток значительно меньше, чем в целом стержне ( $c$ ). При высоте таблеток 10 мм /как в экспериментальном твэле/ скорость  $c_T$  в 3÷4 раза меньше  $c$  и составляет  $1,2 \div 1,6 \cdot 10^3$  м/с /скорость звука в фарфоровом стержне  $c = 4,9 \cdot 10^3$  м/с/; для таблеток высотой 5 мм величина  $c_T$  уменьшается еще в 1,3÷1,4 раза /т.е. приблизительно в  $2^{1/3} \div 2^{1/2}$  раза, что соответствует значениям параметра  $n = 2 \div 3$ , поскольку  $c_T \sim c_0^{(n-1)/(n+1)}$ , а  $c_0$  по физическому смыслу пропорциональна  $0$  числу разрезов на единицу длины стержня/.

2. Скорость распространения сигнала вдоль столба таблеток ( $c_T$ ) возрастает с увеличением скорости ударника  $v$  /см. рис. 8/. При этом зависимость  $c_T$  наиболее близка к /9/ при  $n \approx 2$ ,  $c_0 \approx 2 \cdot 10^{-3}$ .

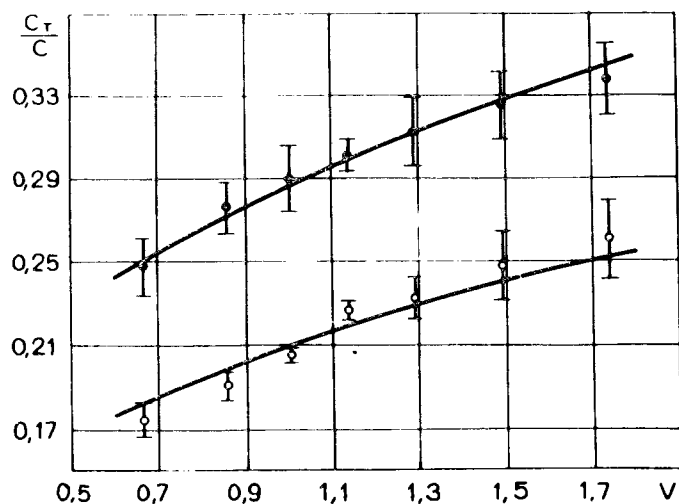


Рис. 8. Зависимость скорости распространения сигнала  $c_T$  вдоль столба таблеток /измеряемой в единицах скорости звука  $c$ / от скорости ударника  $v$  /м/с/. Высота таблеток равна 5 и 10 мм для нижней и верхней кривой соответственно.

3. Колебания оболочки с таблетками затухают значительно быстрее, чем с целым стержнем /см. рис. 9,10/: за 2-3 периода амплитуда деформаций уменьшается на порядок.

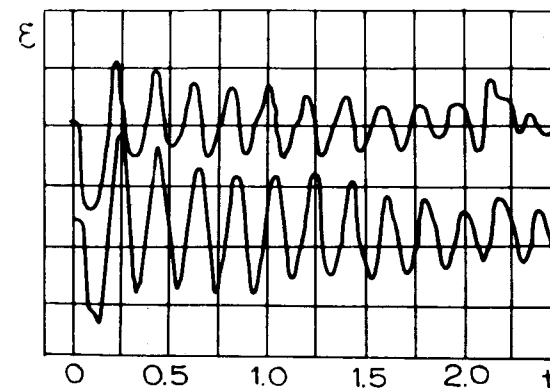


Рис. 9. Осциллограмма колебаний оболочки с целым стержнем:  $\epsilon$  - деформация оболочки,  $t$  - время /мс/.

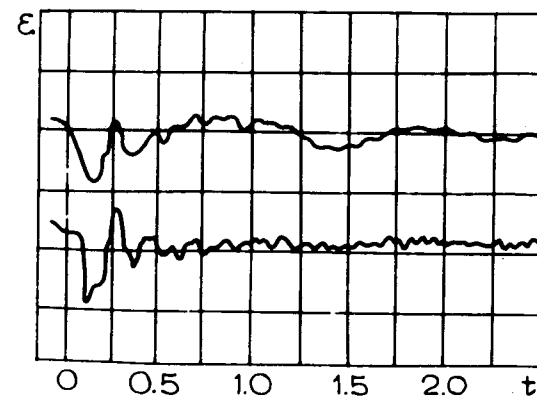


Рис. 10. Осциллограмма колебаний оболочки со стержнем, составленным из отдельных таблеток:  $\epsilon$  - деформация оболочки,  $t$  - время /мс/.

Таким образом, можно сделать вывод, что малая величина измеренных деформаций оболочки экспериментального твэла ИБР-2  $/5 \cdot 10^{-6}, T=25 \text{ K}/$ , вероятнее всего, объясняется быстрым затуханием колебаний и для деформаций во время вспышки следует ожидать величину\* порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  при  $T=25 \text{ K}$  ( $\sigma_s = 10^7 \text{ Н/м}^2$ ), т.е. приблизительно равную теоретическому значению  $/6a/$ .

Скорость распространения сигнала  $c_T$  по столбу таблеток действительно оказалась значительно ниже скорости звука  $c$ , причем отношение  $c/c_T = 3 \div 4$  для столба фарфоровых таблеток и для топливного сердечника приблизительно одинаково.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Измеренные эффекты теплового удара в экспериментальном твэле ИБР-2 существенно занижены по сравнению с результатами теории, основанной на модели идеального контакта между топливными таблетками. Зарегистрированная скорость подскока верхней таблетки /равная  $0,17 \text{ м/с}$  при подогреве топлива  $T=20 \text{ K}$  за время  $10^{-4} \text{ с/}$  в  $3 \div 4$  раза ниже теоретического значения  $acT$ . Динамические напряжения в оболочке, измеренные спустя время, равное нескольким периодам колебаний, в несколько десятков раз ниже теоретического значения  $/6/$  для начальной амплитуды напряжений и не превышают  $10^6 \text{ Н/м}^2$ . Начальная амплитуда напряжений, оцененная с десятикратной поправкой на затухание колебаний, не превышает, соответственно,  $10^7 \text{ Н/м}^2$  и близка к теоретическому значению  $/6/$  при  $c = c_T = 10^3 \text{ м/с}$ .

2. Экспериментальным путем установлено, что скорость распространения сигнала вдоль столба неидеальных таблеток значительно /в 3-4 раза/ ниже скорости звука  $c$ , а продольные колебания оболочки, внутрь которой

\*Предполагается, что характер затухания колебаний оболочек, заполненных фарфоровыми и топливными таблетками, приблизительно одинаков.

помещен столб таблеток, очень быстро затухают: за  $2 \div 3$  периода колебаний амплитуда уменьшается на порядок.

3. Основная причина малости измеренных инерциальных эффектов теплового удара и быстрого затухания колебаний оболочки твэла - таблеточная структура топливного сердечника.

Авторы благодарят Н.П.Анцулова, В.А.Клейна, Ю.А.Иванова за помощь в проведении измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, P3-10888, Дубна, 1977.
2. Tokar M., Nutt A.W. (LASL), Trans. ANS., 1970, 15, p.210.
3. Ломидзе В.Л. ОИЯИ, P11-6622, Дубна, 1972.
4. Ломидзе В.Л. ОИЯИ, P11-6621, Дубна, 1971.
5. Nucl.Sci.Eng., 1967, 30, p.317.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 мая 1978 года.