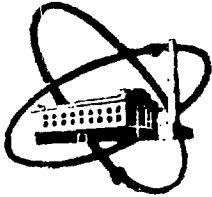


SIU9102492

FEI-1983

ФЭИ-1983



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

П. С. ДОЛМАТОВ, Ю. И. ЛИХАЧЕВ, Е. И. МАЛАХОВА,
М. Я. ХМЕЛЕВСКИЙ

**ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ ДЛЯ РАСЧЕТА
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ
СБОРОК ПРИ ИМПУЛЬСНОМ
АВАРИЙНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Обнинск — 1989

УДК 621.039.54

П. С. Долматов, Ю. И. Лихачев, Е. И. Малахова, М. Я. Хмелевский.

Применение МКЭ для расчета деформирования тепловыделяющих сборок при импульсном аварийном нагружении.

ФЭИ-1983. Обнинск: ФЭИ, 1989. — 15 с.

Рассмотрена одна из возможных аварийных ситуаций в активной зоне быстрого реактора, при которой в результате кризиса теплосъема в некоторой ТВС возникает импульс давления (гидродинамический удар в теплоносителе). Показана возможность оценки степени распространения аварии по активной зоне посредством численного моделирования кинетики упруго-пластического напряженно-деформированного состояния ТЭС, окружающих аварийную сборку.

Дано краткое описание программного комплекса FEMINA, предназначенного для решения методом конечных элементов нелинейных и (или) нестационарных задач термомеханики в произвольной плоской геометрии. Приведены результаты модельного расчета.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из аварийных ситуаций, которая может возникнуть в активной зоне быстрого реактора, является случай, когда после локального закипания, вызванного нарушением теплосъёма, сборка оказывается лишённой теплоносителя и происходит расплавление топлива. При повторном заполнении сборки натрием расплавленное топливо начинает интенсивно с ним взаимодействовать, что вызывает импульс давления (гидродинамический удар) и может обусловить большие деформации чехла и распространение аварии на соседние сборки. Развитие аварии может привести к нарушению работоспособности органов системы управления реактором с необратимым возрастанием реактивности /1,2/.

В этой связи представляет значительный интерес оценка с помощью математических методов степени распространения аварии, или, другими словами, расчёт деформаций ТВС в процессе нагружения импульсом давления.

I. Постановка задачи

Рассматривается плоское поперечное сечение активной зоны быстрого реактора, точнее, некоторой её части, где произошёл "всплеск" давления, обусловленный указанными выше причинами, рис.1. Параметры импульса давления: величина максимума, форма, длительность приняты в соответствии с данными /1,2/ и показаны на рис.2.

Характерное время нагружения составляет несколько миллисекунд ($I+10$). Учитывая это, можно предположить, что жидкометаллический теплоноситель в процессе нагружения не успеет перераспределяться между ТВС, т.е. считать теплоноситель неподвижной и несжимаемой средой, заполняющей пространство между ТВС. Такое предположение работает "в запас" прочности, поскольку считается, что передача энергии нагружения от сборки к сборке происходит без диссипации в теплоносителе.

Процесс деформирования ТВС в рассматриваемом случае подразделяется на два основных этапа.

1.1. Начальный этап нагружения

Во всех ТВС, окружающих аварийную сборку, сохраняется исходная геометрическая структура: шестигранный чехол отделён от пучка твэлов зазором; касание только за счёт дистанционирования. Можно считать, что до определённого момента грани ТВС, на которые непосредственно действует избыточное давление (рис. IV), деформируются свободно, не опираясь на пучок твэлов, без подкрепления его жёсткостью.

Очевидно, что максимальный уровень деформаций должен быть на гранях чехлов, непосредственно обращённых к аварийной сборке. Величина деформаций зависит от жесткости чехла и от уровня давления. При достаточно мощном импульсе деформирование ТВС переходит в следующую стадию.

1.2. Пластическое течение грани ТВС

Возникновение пластического течения на некотором (наиболее нагруженном) участке грани приводит к резкому снижению её жесткости, прогиб увеличивается и происходит "посадка" грани на размещённые под ней твэлы. При этом изменяется жёсткость всей конструкции, т.к. теперь грань ТВС и твэлы деформируются совместно.

Учитывая наличие пластического течения в материале ТВС, можно полагать, что определяющей в данном случае будет интегральная жёсткость пучка твэлов. Дальнейший рост давления вызовет увеличение деформаций внутренней части ТВС, рассматриваемой как некая однородная среда, обладающая определёнными параметрами упругости.

Для некоторых, не слишком высоких уровней давления пластическое течение будет лишь на внутренних гранях внутреннего ряда ТВС и не распространится на другие грани (внутреннего или следующего рядов). Если же уровень давления достаточно высок, то в процессе нагружения в различных частях конструкции реализуются как первая, так и вторая стадии: есть и свободное, чисто упругое деформирование граней, и пластическое течение, когда нагрузку уже воспринимают лежащие ниже ряды твэлов. Здесь, в принципе, не исключено и их пластическое деформирование (как гомогенной среды).

Корректное исследование описанного выше процесса невозможно без использования так называемого математического эксперимента. Необходимо численно моделировать нестационарное нагружение конструкции с учётом её реальной геометрии и нелинейного (упруго-пластического) характера деформирования. Расчётная оценка степени распространения зоны пластического деформирования материалов ТВС имеет смысл только в такой полн масштабной постановке. Современные средства вычислительной техники и численные методы позволяют решать подобные проблемы, т. е. зона распространения аварии может быть очерчена с помощью математического эксперимента.

2. Метод решения

Решение поставленной задачи осуществлялось с помощью программного комплекса FEMINA (Finite Element Method In Nonlinear Analysis), разработанного в ЦЭИ для решения методом конечных элементов (МКЭ) нелинейных и (или) нестационарных задач термомеханики в произвольной плоской геометрии. Ниже приводятся основные характеристики и структура комплекса.

2.1. Основные уравнения МКЭ для нелинейной, квазистационарной задачи механики деформируемого тела

Из теории МКЭ известно, что для квазистационарного нагружения, посредством минимизации функционала полной мощности получается следующая основная система уравнений /3,4/ :

$$[K] \{U\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $[K]$ - матрица жёсткости системы;

$$[K] = \sum_{e=1}^E \int_{S^e} [B]^T [D] [B] dS \quad (2)$$

- сумма по всем E дискретным элементам, на которые подразделена

рассматриваемой система; S^e - площадь элемента.

$[B]$ - матрица координатных градиентов, $[D]$ - матрица упругих констант, $\{\dot{U}\}$ - вектор подлежащих определению скоростей перемещений в узлах сетки.

$$\{\dot{F}\} = - \sum_{e=1}^E \left[\int_{S^e} [B]^T [D] \{\dot{\epsilon}_0\} dS + \int_{\psi^e} [N]^T \{\dot{P}\} d\psi \right]. \quad (3)$$

Здесь $[N]$ - матрица функций формы, $\{\dot{P}\}$ - вектор скоростей изменения нагрузки на границе элемента, $\{\dot{\epsilon}_0\}$ - вектор скоростей изменения неупругих деформаций:

$$\{\dot{\epsilon}_0\} = \{\dot{\epsilon}^{cz}\} + \{\dot{\epsilon}^{pl}\} + \{\dot{\epsilon}_v\} / 3. \quad (4)$$

Индекс v обозначает скорость объёмноизотропных деформаций, cz , pl - скорости деформаций ползучести и пластичности, определяемые по теории течения

$$\{\dot{\epsilon}^{cz}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x^{cz} \\ \dot{\epsilon}_y^{cz} \\ \dot{\gamma}^{cz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_x - \sigma_y}{2\sigma_i} & \frac{2\sigma_y - \sigma_x}{2\sigma_i} & \frac{3\tau}{\sigma_i} \end{bmatrix}^T \cdot \epsilon_i^{cz} \quad (5)$$

$$\{\dot{\epsilon}^{pl}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x^{pl} \\ \dot{\epsilon}_y^{pl} \\ \dot{\gamma}^{pl} \end{Bmatrix} = \begin{cases} \left[\frac{(2\sigma_x - \sigma_y)^2}{6\sigma_i} \dot{\sigma}_x + \frac{(2\sigma_x - \sigma_y)(2\sigma_y - \sigma_x)}{6\sigma_i} \dot{\sigma}_y + \frac{\tau^2 \dot{\tau}}{\sigma_i} \right] F_\sigma \\ x \leftrightarrow y \\ \left[\frac{(2\sigma_x - \sigma_y)\tau}{\sigma_i} \dot{\sigma}_x + \frac{(2\sigma_y - \sigma_x)\tau}{\sigma_i} \dot{\sigma}_y + \frac{\tau^2 \dot{\tau}}{\sigma_i} \right] F_\tau \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $\dot{\epsilon}_i^{cz}$ - интенсивность скорости ползучести,

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2}, \quad (7)$$

E_p - модуль упрочнения материала, σ_τ - предел текучести,

$$F_\sigma = \begin{cases} 0, & \sigma_i < \sigma_\tau \\ 1.5/E_p \sigma_i, & \sigma_i \geq \sigma_\tau \end{cases} \quad (8)$$

Учитывая, что скорость упругих деформаций определяется разностью скоростей общих и необратимых деформаций:

$$\{\dot{\epsilon}^d\} = \{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}_0\} \quad (9)$$

- скорости напряжений в соответствии с законом Гука определяются как

$$\{\dot{\sigma}\} = [D] \left(\{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}_0\} \right). \quad (10)$$

Скорости общих деформаций связаны со скоростями узловых перемещений геометрическими соотношениями:

$$\{\dot{\epsilon}\} = [B] \{\dot{U}\}. \quad (11)$$

В результате кинетика параметров напряжённо-деформируемого состояния (НДС) описывается замкнутой нелинейной системой $2N_U + 6N_E$ обыкновенных дифференциальных уравнений (I), (10), (11); N_U - число узлов конечноэлементной сетки, N_E - число элементов. Интегрирование должно производиться численными методами, ориентированными на так называемые жёсткие системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

2.2. Программная структура комплекса FEMINA

Программный комплекс FEMINA реализован на ЭВМ ЕС в операционной системе CMS/VM (Фортран - 77), имеет открытую модульную структуру, что способствует его дальнейшему развитию. Блок-схема комплекса представлена на рис.3.

Принципиально комплекс содержит следующие макроблоки (см. рис.3):

1. **GRID** - автономная программа, осуществляющая триангуляцию произвольной плоской области, подготовку данных для схемы МКЭ и коррекцию конечноэлементной сетки.

2. **FEBNEN** - блок, в котором производится оптимизация конечноэлементной сетки: перенумерация узлов с целью минимизации ширины ленты ненулевых элементов в глобальной матрице жёсткости (процедура **RNODES**) и постановка граничных условий.

3. **FEMINA** - блок, в котором непосредственно реализуется схема МКЭ, производится вычисление интегралов (I)-(II) и подготовка результирующей системы (I), (10), (11).

4. **DRIVE** - блок, реализующий численное интегрирование нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Используется метод Гира с автоматическим выбором шага интегрирования.

5. **LEQ2PB** - блок, осуществляющий решение системы линейных алгебраических уравнений методом **LU**-разложения с итерационным уточнением результатов.

6. **ABRIS** - блок визуализации результатов расчёта: построение проекций полей параметров НДС на расчётную плоскость (линии уровня) средствами АЩУ или 2-х и 3-х мерных графиков с использованием графического пакета АТОМ.

3. Результаты расчётов

Расчёты проводились для двух рядов ТВС, окружающих аварийную сборку (рис. 1,4). Учитывая симметрию и для удобства постановки граничных условий рассмотрен I-й квадрант активной зоны.

Геометрические параметры расчётной схемы: размер ТВС "под ключ" - 96 мм, толщина чехла - 2,5 мм. Ориентировочные параметры импульса давления взяты в соответствии с /1,2/ и показаны на рис. 7. Температура в аварийной области принята постоянной ($T = 873$ К), что оправдано малой величиной рассматриваемого временного интервала.

В расчётах приняты следующие значения кратковременных механических свойств материала чехла (сталь Х16Н1М3Б):
 $E = 20000$ кг/мм², $E_D = 1000$ кг/мм², $\mu = 0.3$, $\sigma_T = 200$ кг/мм².
Модуль упругости внутренней, однородной среды ориентировочно принят равным 200 кг/мм².

На рис. 4 показана конечноэлементная сетка (треугольные симплекс-элементы), используемая в расчётах; количество элементов - 1365, количество узлов - 745.

Расчёты, проведенные с помощью программного комплекса **FEMINA**, показали, что при рассматриваемых параметрах импульса давления реализуются обе стадии деформирования (см. п. 1.1, 1.2). Вначале вся конструкция деформируется упруго; расчётное поле интенсивности упругих напряжений показано на рис. 5. Видно, что максимальный уровень напряжений достигается в центральной части внутренних граней внутреннего ряда ТВС. Кроме того, на этих гранях

сосредоточен и основной градиент нагрузки: противоположные грани имеют уже на порядок меньший уровень напряжений, а на внешних гранях наружного ряда $\sigma_i \approx 0$.

Начиная с момента $t \approx 6$ мс в двух наиболее нагруженных гранях возникает пластическое течение. Расчётные поля интенсивностей напряжений и деформаций при упруго-пластическом деформировании ТВС приведены на рис.6,7. Видно, что несущая способность граней, деформирующихся пластически, резко снижается. Однако подкрепляющее действие внутренней среды оказывает положительное влияние на несущую способность конструкции в целом: хотя напряжения сосредоточены теперь практически во всех гранях ТВС (за исключением самых наружных), максимальный уровень напряжений ≈ 6 кг/мм² сравнительно невысок. Анализ поля $\epsilon_i(x, y)$, рис.7, также показывает, что, хотя $\max \epsilon_i \approx 1\%$, уровень деформаций на наружных гранях внешнего ряда приблизительно в 20 раз ниже и, следовательно, рассмотренный импульс давления не приводит к необратимым формоизменениям второго ряда ТВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение МКЭ (программный комплекс LMINA) для расчёта аварийного нагружения ТВС импульсом давления позволяет получать качественно новый уровень информации о характере и кинетике параметров напряжённо-деформируемого состояния активной зоны.

Проведенные модельные расчёты показали, что при соответствующей экспериментальной верификации с их помощью возможен полномасштабный анализ влияния различных параметров аварийного нагружения на степень распространения аварии по активной зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bratis J.C. et al. Reactor structural response to molten-fuel-coolant interaction. 2nd Conference on structural mechanics in reactor technology, 2E, 1/4, September, 1973.
2. Belytchko T. et al. Dynamic Response of fast-reactor core sub-assemblies. Nuclear Eng. & Design, 28, pp. 31-34, 1974.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.

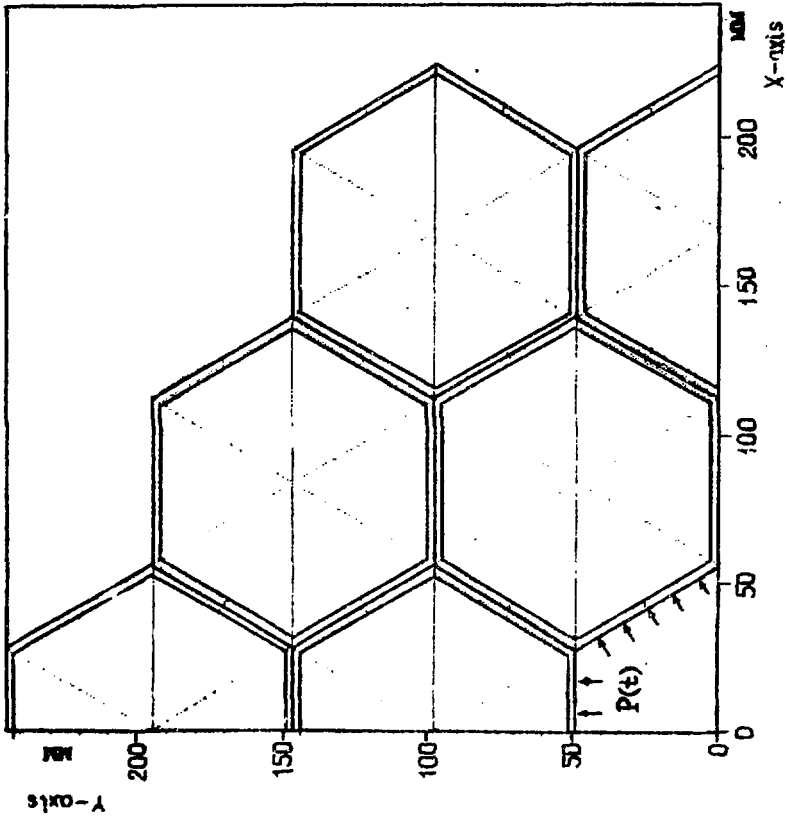


Рис. I. Расчетная схема

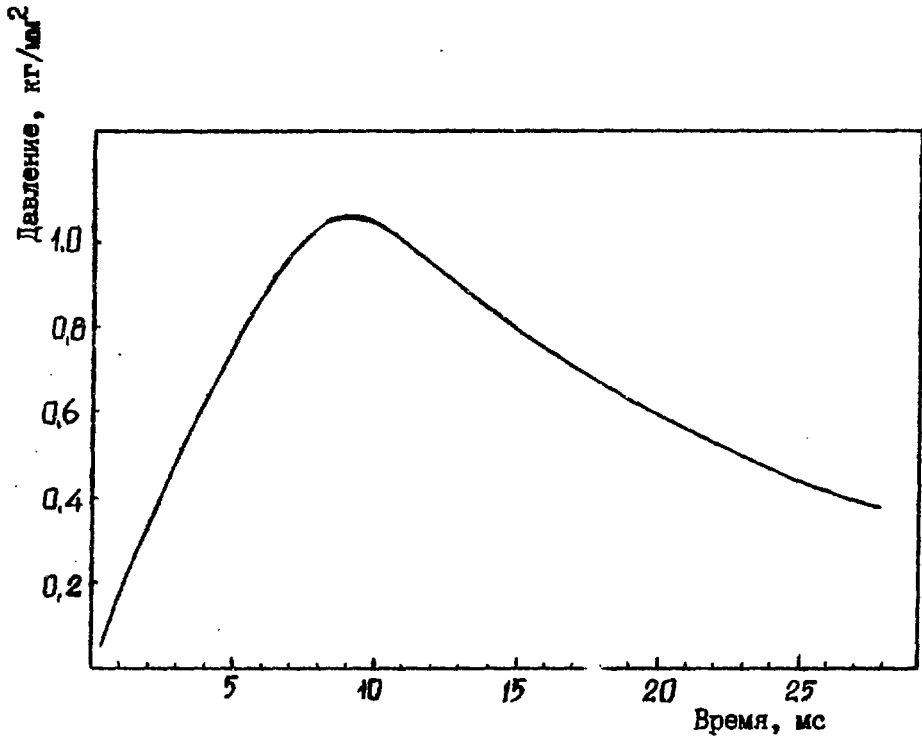


Рис.2. Принятый в расчётах вид импульса давления

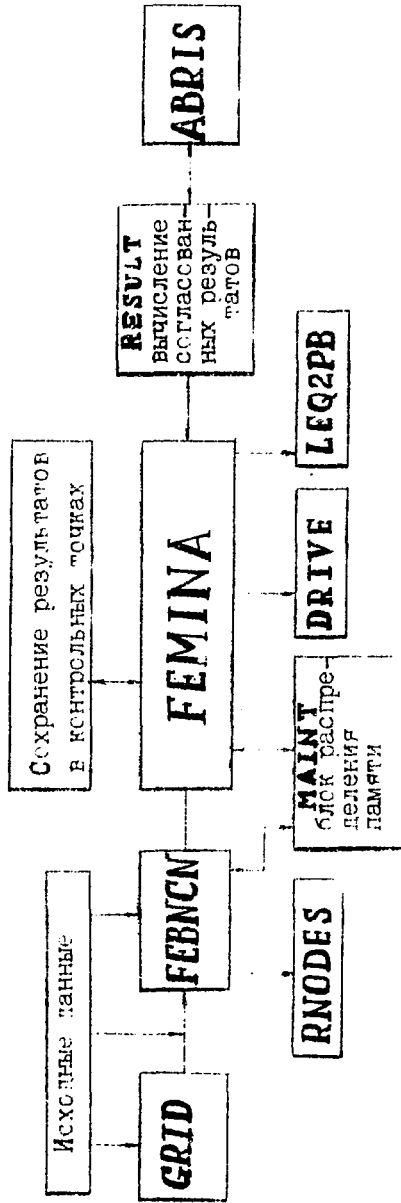


Рис. 3. Принципиальная блок-схема программного комплекса FEMINA

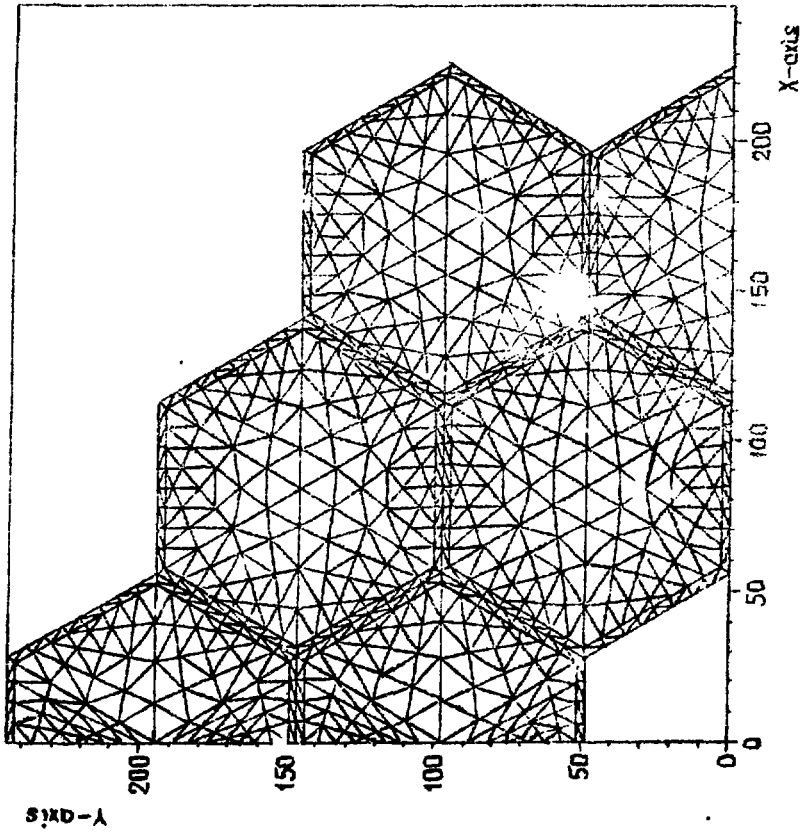


Рис. 4. Дискретизация расчетной области на конечные элементы

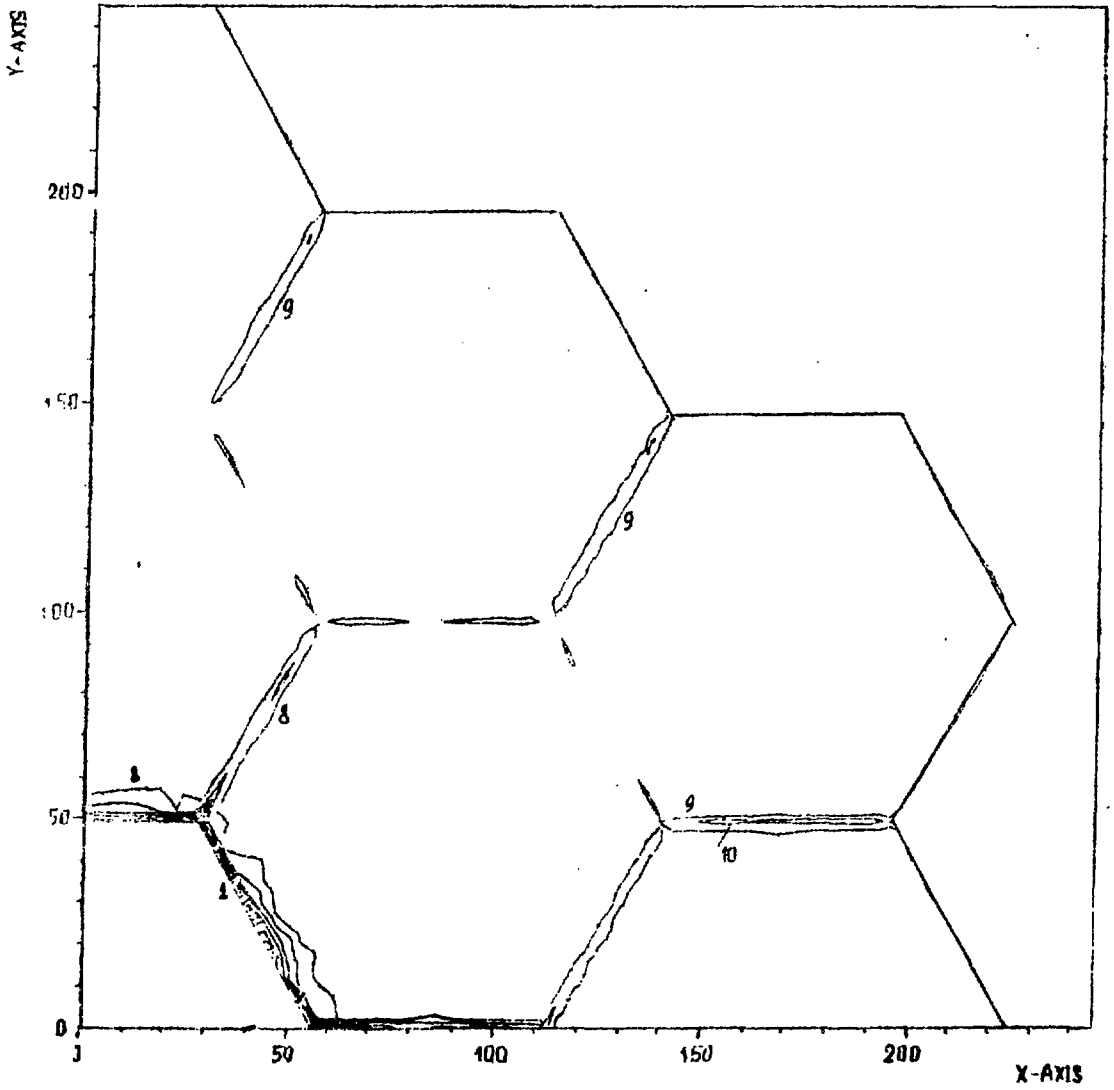


Рис. 5. Изолины интенсивности упругих напряжений в чехлах ТБС,
($t \approx 5$ мс) 10 линий уровня: 1 - 17 кг/мм^2 , ...,
10 - $1,7 \text{ кг/мм}^2$.

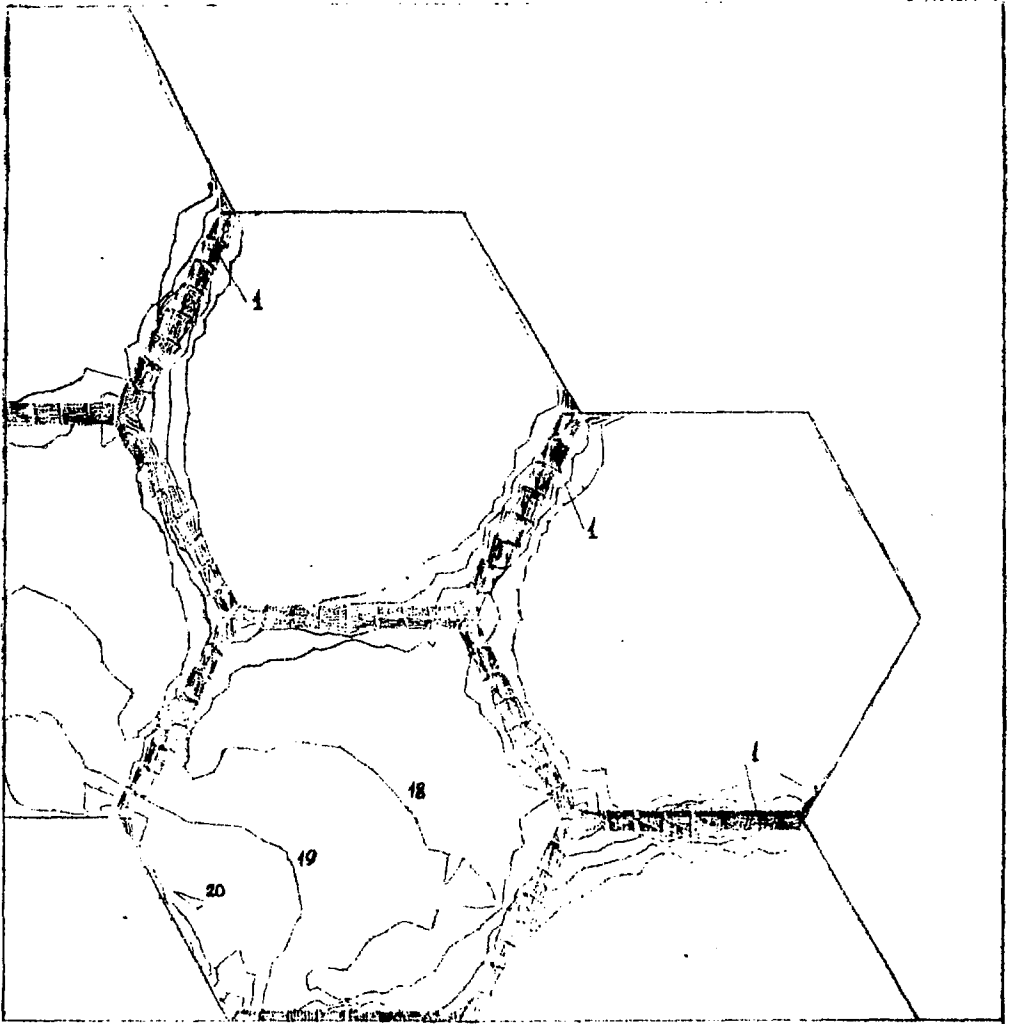


Рис. 6. Изолинии интенсивности напряжений при упруго-пластическом деформировании ТВС, ($t \approx 9$ мс), 20 линий уровня: 1 - 6 кг/мм², 20 - 0,3 кг/мм².

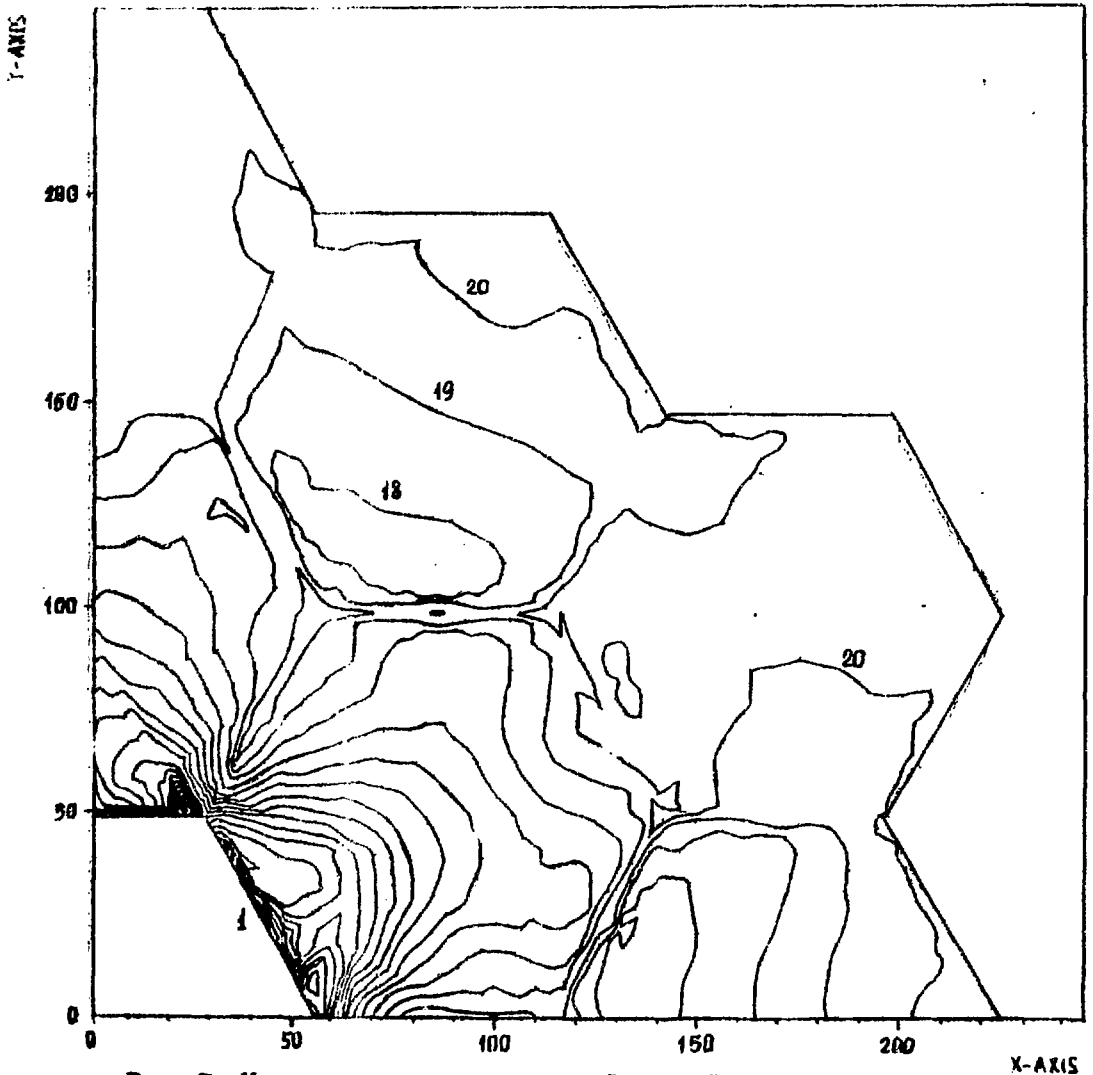


Рис. 7. Изолинии интенсивности деформаций при упруго-пластическом деформировании ТВС, ($t \approx 9$ мс), 20 линий уровня: 1 \approx 1% , ..., 20 - 005%.

Технический редактор Н.П.Герасимова

Подписано к печати 17.05.1989 г. Т-10107 Бумага писчая № 1
Формат 60x90 1/16 Усл.п.л. I Уч.-изд.л.0,7 Тираж 90 экз.
Цена 14 коп. Индекс 3624 ФЭИ-1983 79.5 з.

Отпечатано на рогапринтере.

249020 г.Обнинск Калужской обл., ФЭИ

14 коп.

Индекс 3624

**Применение МКЭ для расчета деформирования тепловыделяющих сборок при импульсном аварийном нагружении.
ФЭИ-1983. 1989. 1-15.**