

Разработка технологии изготовления фильтров для очистки органического теплоносителя и исследование их гидравлического сопротивления

Ю. И. Токарев, Ф. Ф. Богданов, Е. И. Павловская, А. П. Чернопятова

Приведены результаты экспериментального исследования гидравлических сопротивлений металлокерамических дисковых фильтров для фильтрации органических теплоносителей при их рабочих параметрах. Описан способ изготовления фильтров, а также опыт применения их в условиях эксплуатации. Показано, что зависимость $\xi = f(Re)$ в капиллярах исследованных фильтров описывается эмпирической зависимостью

$$\xi = \frac{C}{Re^n}$$

Установлено, что исследованные фильтры можно регенерировать (восстанавливать их фильтрующую способность) обратным потоком необходимого количества теплоносителя (5–8 л) со сбросом загрязненного теплоносителя в сливной атмосферный сосуд.

Трубопроводы и оборудование первого контура атомных энергетических установок с органическим теплоносителем изготавливаются, как правило, из углеродистых сталей и вследствие отсутствия наведенной активности теплоносителя (при условии поддержания его достаточной чистоты) могут применяться без биологической защиты. Следовательно, одним из основных требований, предъявляемых к теплоносителю, является отсутствие в нем активизирующихся примесей.

При эксплуатации реакторов с органическим теплоносителем как в США (реактор OMRE), так и в СССР (реактор «Арбус») было замечено, что в теплоносителе первого контура, несмотря на его тщательную предпусковую очистку, постоянно находится некоторое количество неорганических примесей. В теплоносителе первого контура установки «Арбус» (гидростабильлизированный газойль) эти примеси представляют собой кристаллы магнетита. В реакторе OMRE (теплоноситель — смесь полифенилов) неорганические включения состоят в основном из перкарбида железа $Fe_{20}C_9$, хотя обнаруживалось также и некоторое количество магнетита. Сухой остаток теплоносителя реактора OMRE состоит из кристаллов перкарбида или окисла железа (размерами от нескольких микрон до долей микрона), окруженных нерастворимой сильно запolyмеризованной органической пленкой. Состав пленки характеризуется высоким отношением числа атомов

углерода к числу атомов водорода. Установлено, что кислород катализирует термическое разложение полифенилов, сопровождающееся образованием смол и осадков.

Источниками образования неорганических примесей в теплоносителе могут быть:

1) металлические опилки, грат или стружки, попавшие в контур извне при монтаже или ремонте;

2) продукты коррозии углеродистой стали, образующиеся вследствие попадания в контур некоторого количества воды или кислорода, в результате контакта теплоносителя с атмосферным воздухом во время вскрытия контура при ремонте. На реакторе OMRE неоднократно наблюдалась прямая зависимость между содержанием в теплоносителе неорганических примесей и временем контакта его с атмосферным воздухом [1]. Однако при существующей технологии перегрузочных работ невозможно полностью избежать этого контакта. Высокая температура теплоносителя способствует быстрому смыву окалины со стенок контура;

3) продукты коррозии углеродистой стали при ее контакте с горячим теплоносителем. Скорость коррозии в данном случае незначительна и составляет за месяц: для терфенила $\sim 0,05$ мг/см² при 315° С, для газойля $\sim 0,15$ мг/см². Кроме того, коррозию вызывает вода, содержащаяся в незначительном количестве (несколько сотых долей процента) в органическом теплоносителе.

Фильтры (пористая нержавеющая сталь, размер пор 5 и 40 мк), установленные во вспомогательном контуре реактора OMRE, работали недостаточно хорошо, быстро забивались, что вызвало необходимость применять более сложные методы очистки теплоносителя: электростатическая и электромагнитная сепарация, циклонная сепарация и центрифугирование [1]. Забивание пористых фильтров объясняется, по-видимому, осаждением на них неорганических частиц, содержащихся в теплоносителе, с оболочкой из органического вещества.

Разработка технологии изготовления фильтров для очистки органического теплоносителя и исследование их гидравлического сопротивления

Ю. И. Токарев, Ф. Ф. Богданов, Е. И. Павловская, А. П. Чернопятова

Приведены результаты экспериментального исследования гидравлических сопротивлений металлокерамических дисковых фильтров для фильтрации органических теплоносителей при их рабочих параметрах. Описан способ изготовления фильтров, а также опыт применения их в условиях эксплуатации. Показано, что зависимость $\xi = f(Re)$ в капиллярах исследованных фильтров описывается эмпирической зависимостью

$$\xi = \frac{C}{Re^n}$$

Установлено, что исследованные фильтры можно регенерировать (восстанавливать их фильтрующую способность) обратным потоком необходимого количества теплоносителя (5—8 л) со сбросом загрязненного теплоносителя в сливной атмосферный сосуд.

Трубопроводы и оборудование первого контура атомных энергетических установок с органическим теплоносителем изготавливаются, как правило, из углеродистых сталей и вследствие отсутствия наведенной активности теплоносителя (при условии поддержания его достаточной чистоты) могут применяться без биологической защиты. Следовательно, одним из основных требований, предъявляемых к теплоносителю, является отсутствие в нем активирующихся примесей.

При эксплуатации реакторов с органическим теплоносителем как в США (реактор OMRE), так и в СССР (реактор «Арбус») было замечено, что в теплоносителе первого контура, несмотря на его тщательную предпусковую очистку, постоянно находится некоторое количество неорганических примесей. В теплоносителе первого контура установки «Арбус» (гидростабилизированный газойль) эти примеси представляют собой кристаллы магнетита. В реакторе OMRE (теплоноситель — смесь полифенилов) неорганические включения состоят в основном из перкарбида железа $Fe_{20}C_9$, хотя обнаруживалось также и некоторое количество магнетита. Сухой остаток теплоносителя реактора OMRE состоит из кристаллов перкарбида или окисла железа (размерами от нескольких микрон до долей микрона), окруженных нерастворимой сильно заподимеризованной органической пленкой. Состав пленки характеризуется высоким отношением числа атомов

углерода к числу атомов водорода. Установлено, что кислород катализирует термическое разложение полифенилов, сопровождающееся образованием смол и осадков.

Источниками образования неорганических примесей в теплоносителе могут быть:

1) металлические опилки, грат или стружки, попавшие в контур извне при монтаже или ремонте;

2) продукты коррозии углеродистой стали, образующиеся вследствие попадания в контур некоторого количества воды или кислорода, в результате контакта теплоносителя с атмосферным воздухом во время вскрытия контура при ремонте. На реакторе OMRE неоднократно наблюдалась прямая зависимость между содержанием в теплоносителе неорганических примесей и временем контакта его с атмосферным воздухом [1]. Однако при существующей технологии перегрузочных работ невозможно полностью избежать этого контакта. Высокая температура теплоносителя способствует быстрому смыву окалина со стенок контура;

3) продукты коррозии углеродистой стали при ее контакте с горячим теплоносителем. Скорость коррозии в данном случае незначительна и составляет за месяц: для терфенила $\sim 0,05$ мг/см² при 315° С, для газойля $\sim 0,15$ мг/см². Кроме того, коррозию вызывает вода, содержащаяся в незначительном количестве (несколько сотых долей процента) в органическом теплоносителе.

Фильтры (пористая нержавеющая сталь, размер пор 5 и 40 мк), установленные во вспомогательном контуре реактора OMRE, работали недостаточно хорошо, быстро забивались, что вызвало необходимость применять более сложные методы очистки теплоносителя: электростатическая и электромагнитная сепарация, циклонная сепарация и центрифугирование [1]. Забивание пористых фильтров объясняется, по-видимому, осаждением на них неорганических частиц, содержащихся в теплоносителе, с оболочкой из органического вещества.

Таблица 1

Свойства фильтрующих элементов

Фракция порошка, мм	Давление прессования, т/см ²	Проводимость по воздуху (при $p=600$ мм вод. ст.), м ³ /мин	Проводимость по газойлю (при $p=1$ атм), л/мин	Толщина фильтрации, мм	Давление разрушения, атм
0,063	2	0,20	10	15	18
0,1	2	0,25	16	20	16
0,2	2	0,35	20	25	10
0,3	2	0,50	24	30	8

ратуре 300° С. Испытывали четыре пакета (рис. 2), каждый из которых содержал 12—13 элементов, изготовленных из определенной фракции порошка: $d_1 = 0,063$ мм (12 элементов), $d_2 = 0,1$ мм, $d_3 = 0,2$ мм и $d_4 = 0,3$ мм (по 13 элементов). Опыты проводились на экспериментальном стенде, который представлял

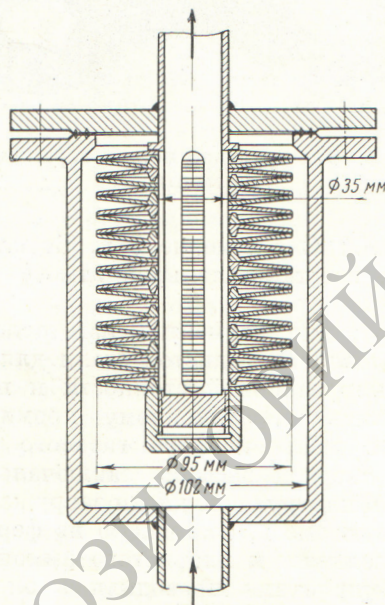


Рис. 2. Сборка фильтрующих элементов для проведения испытания.

собой замкнутый контур с принудительной циркуляцией и с электрическим обогревом теплоносителя на экономайзерном участке контура.

В процессе проведения опытов были измерены: перепад давления в фильтре; расход жидкости через фильтр расходомерной диафрагмой и дифманометром с ртутным запол-

нением (погрешность в том и другом случае не превышала 4%); температура рабочей жидкости перед фильтром (по хромель-алюмелевым термопарам и потенциометру ППТВ); фракционный состав взвеси до и после фильтрации в каждой серии опытов (с помощью медицинского микроскопа).

Опытные материалы по гидравлическому сопротивлению обрабатывались в форме

$$\Delta p = f(Q); \zeta = f(Re),$$

где Δp — перепад давления в фильтрах, кг/м²; Q — расход теплоносителя, м³/ч; $\zeta = \frac{2g\Delta p}{\gamma w^2}$ — коэффициент местного сопротивления; $Re = \frac{wd_{экр}}{v}$. Скорость теплоносителя в капиллярах фильтра определялась по соотношению

$$w = \frac{Q}{F_1},$$

где F_1 — проходное сечение фильтра, м². Для шахматного расположения сферических частиц в слое $F_1 = 0,0931F$, где F — полная площадь фильтра, м².

При вычислении Re в качестве определяющего размера принимали гидравлический диаметр $d_{экр} = 0,423 \frac{\varepsilon^{1,25}}{1-\varepsilon}$ [2, 3]. Для шахматного расположения сферических частиц в слое $\varepsilon = 0,256$, тогда для фильтра с частицами $d = 0,063$ мм $d_{экр} = 0,0066 \cdot 10^{-3}$ м, а для фильтра с частицами $d = 0,1$ мм $d_{экр} = 0,0105 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 3 приведен график зависимости $\Delta p = f(Q)$ для фильтров, изготовленных из порошка фракции 0,063; 0,1 и 0,2 мм. На рис. 4 представлен график зависимости $\zeta = f(Re)$ для фильтров, изготовленных из порошка фракции 0,063 и 0,1 мм с общей фильтрующей площадью, состоящей из 12 элементов ($F = 0,1074$ м²). Опытные точки аппроксимируются общей наклонной линией, описываемой соотношением

$$\zeta = 262Re^{-0,785}. \quad (1)$$

Из рис. 4 следует, что обобщенная формула справедлива при $Re < 4$; при $Re > 4$ величина коэффициента сопротивления ζ для этих фильтров почти не изменяется с увеличением Re : для фильтра фракции 0,063 мм $\zeta = 84,0$, а для фильтра фракции 0,1 мм $\zeta = 94,5$. Соотношение (1) существенно отличается от опубликованных ранее выражений как по вели-

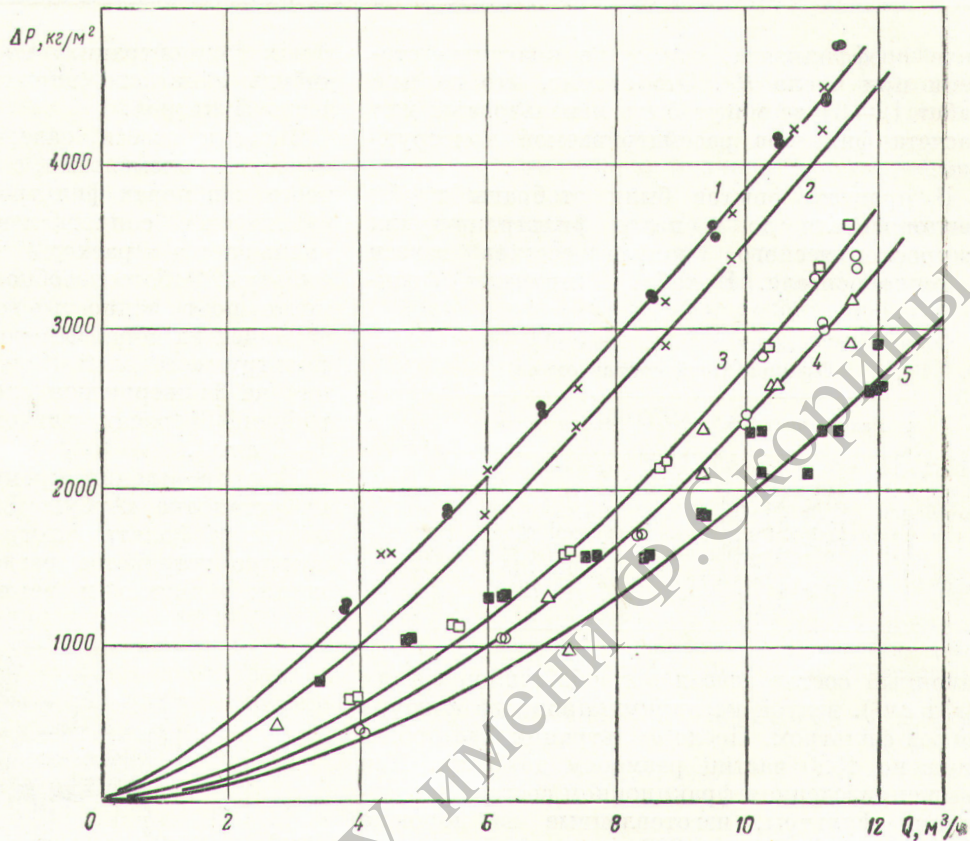


Рис. 3. Зависимость $\Delta P = f(Q)$ для металлокерамических фильтрующих элементов:

1 (●) — фракция 0,063 мм, $t = 170^\circ \text{C}$; 2 (×) — фракция 0,2 мм, $t = 100^\circ \text{C}$; 3 (□) — фракция 0,1 мм, $t = 150^\circ \text{C}$; 4 (○) — фракция 0,063 мм, $t = 300^\circ \text{C}$; 5 (■) — фракция 0,2 мм, $t = 300^\circ \text{C}$; Δ — фракция 0,2 мм, $t = 170^\circ \text{C}$.

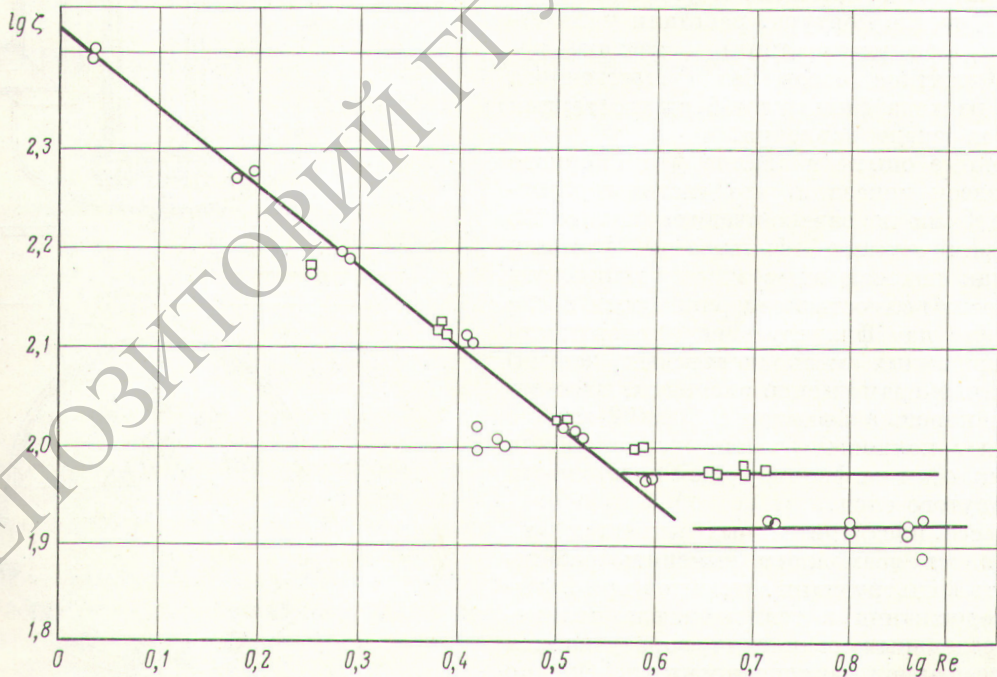


Рис. 4. Обобщенный график зависимости $\zeta = f(Re)$ для металлокерамических фильтрующих элементов: ○, □ — опытные данные для фракций 0,063 и 0,1 мм соответственно.

чине коэффициента, так и по значению степени при числе Re . Это значит, что данные работ [2—6] не могут быть использованы для расчета фильтров рассматриваемой конструкции.

В процессе опытов были отобраны пробы теплоносителя до и после фильтрации для микроскопического анализа состава взвеси в теплоносителе. В табл. 2 приведен фрак-

Таблица 2
Фракционный состав смеси

Размер частицы, $мк$	Число частиц
$20 < \delta < 30$	До 35
$15 < \delta < 20$	До 35
$10 < \delta < 15$	До 140
$5 < \delta < 10$	До 315
$\delta < 5$	До 7200

ционный состав взвеси в пробе теплоносителя (в 1 см^3), взятой из циркуляционного контура перед фильтром. После фильтрации было обнаружено 1380 частиц размером до 5 мк . При вышеприведенном фракционном составе загрязнений фильтры, изготовленные из порошка фракции $0,3$; $0,1$ и $0,063 \text{ мм}$ и установленные в рабочем участке контура, работали удовлетворительно (без регенерации) в течение нескольких десятков часов без существенного снижения расхода фильтруемой жидкости при заданном перепаде давления.

Проведенные опыты и анализ фракционного состава взвеси показали, что частицы размером менее 5 мк не задерживаются полностью металлокерамическими фильтрами фракции $0,1 \text{ мм}$ (как показал опыт эксплуатации, эти частицы почти полностью задерживаются после образования на фильтрующей поверхности слоя задержанных мелкодисперсных частиц) и что металлокерамические элементы, изготовленные из порошка фракции $0,3$ и $0,2 \text{ мм}$, не задерживают полностью частиц величиной до $10 - 15 \text{ мк}$, если на фильтрующей поверхности нет упомянутого слоя.

В процессе предварительных испытаний не представлялось возможным выяснить работоспособность фильтрующих элементов при повышенном содержании в теплоносителе полимеров и непредельных соединений, образующихся в процессе радиолитического разложения теплоносителя. Однако во время опытной эксплуатации повышение содержания этих соединений до $9 - 10\%$ (допус-

тимая концентрация) не оказывало сколько-нибудь заметного влияния на работоспособность фильтров.

Частицы взвеси, задержанные металлокерамическими элементами, скапливаясь на поверхности и в порах фильтров, повышают их гидравлическое сопротивление, вследствие чего уменьшается расход теплоносителя через фильтры. Работоспособность фильтрующих элементов почти полностью восстанавливается регенерацией их обратным потоком жидкости через фильтрующий слой (при этом перепад давления на фильтрующем слое должен превышать рабочий перепад давления на фильтре на $1 - 2 \text{ атм}$).

Для проведения промышленных испытаний на установке «Арбус» была разработана конструкция фильтрующего устройства (рис. 5). Корпус устройства разделен фланцем на две части: нижнюю и верхнюю. Нижняя часть

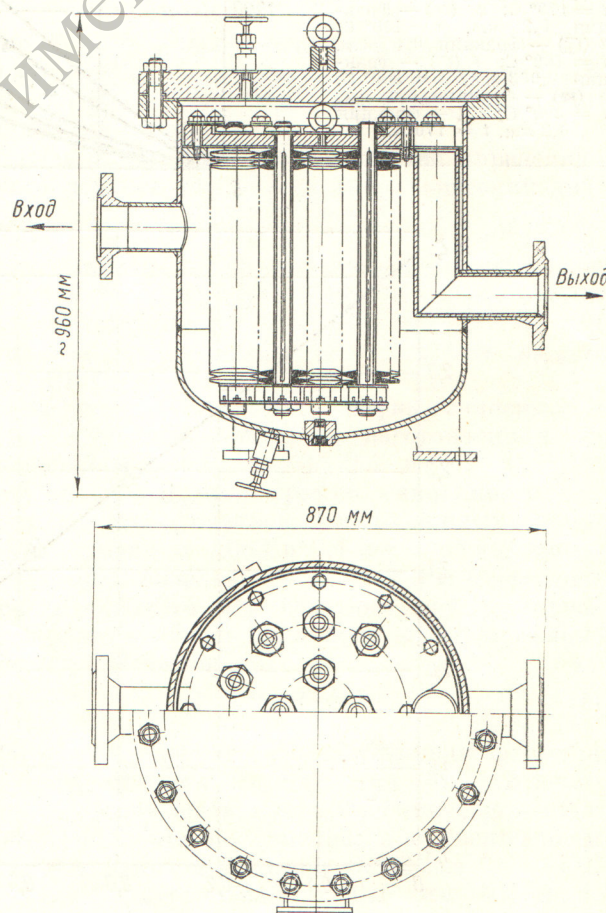


Рис. 5. Фильтрующее устройство установки «Арбус».

соединена с входным патрубком, верхняя — с выходным. На фланце монтируются 12 пакетов с фильтрами. Каждый пакет состоит из стержня, на который надевается 48—50 чечевицеобразных фильтрующих элементов размером 95×36 мм. Загрязненная жидкость поступает в нижнюю часть корпуса, затем, пройдя через фильтрующие элементы, очищается и по коленообразному патрубку поступает в систему. Сверху корпус закрыт крышкой. В установке «Арбус» два фильтрующих устройства установлены параллельно на байпасе главных циркуляционных насосов первого контура. Расход теплоносителя через них составляет ~10% от общего расхода.

Для сокращения продолжительности испытания в корпусе одного из фильтрующих устройств были вмонтированы только два фильтрующих пакета. Испытания, проведенные во время опытной эксплуатации, показали, что фильтры достаточно надежно задерживают взвешенные частицы. Концентрация железа в теплоносителе не превышает $0,4$ мг/л, что обеспечивает достаточно низкий уровень γ -активности первого контура.

Необходимыми условиями для успешной эксплуатации металлокерамических фильтров, применяемых при очистке органических теплоносителей АЭС, являются:

- а) хорошая предварительная очистка теплоносителя;
- б) применение теплоносителей с малым образованием коксующихся пленок;
- в) принятие всех мер для предотвращения попадания в контур кислорода и воды.

Поступила в Редакцию 28/IV 1964 г.
В окончательной редакции 5/IX 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Trilling. Nucl. Engng, 6, No. 67 (1961).
2. Р. С. Бернштейн, С. Л. Шагалова, В. В. Померанцев. В сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котлопочных процессах». Под ред. Кнорре. М., Госэнергоиздат, 1958.
3. И. Е. Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Госэнергоиздат, 1960.
4. Т. М. Башта. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. М., Оборонгиз, 1961.
5. Г. Ф. Денисенко. Бюллетень «Кислород», № 6 (1962).
6. Н. П. Ишкин, М. Г. Каганер. Бюллетень «Кислород», № 3 (1952).

УДК 621.039.542:621.039.548

Внутренние напряжения, вызванные неравномерным распуханием делящегося материала

Ю. И. Лидачев, В. П. Звонарев, В. Я. Пупко

Рассматривается новая причина появления в твэлах макронапряжений первого рода — неравномерное распухание делящегося материала, вызванное тем, что из-за «выедания» нейтронного потока количество образующихся продуктов деления по сечению твэла является неодинаковым. Указаны методы вычисления величин этих напряжений. Отмечены случаи, когда влияние этих напряжений на работоспособность твэла существенно.

Внутренние напряжения в телах, как известно, могут быть вызваны различными причинами (механическими нагрузками, неравномерным нагреванием, действием электромагнитных полей и т. д.). Однако в твэлах ядерных реакторов внутренние напряжения могут быть связаны также и с неравномерным распуханием делящейся композиции из-за образования продуктов деления.

В гетерогенных реакторах на медленных нейтронах поток нейтронов, вызывающих деле-

ние, уменьшается от поверхности твэла к центру, в связи с чем количество разделившихся ядер (и количество появившихся продуктов деления) будет также уменьшаться от поверхности твэла к центру. Изменение плотности делений по сечению твэла существенным образом зависит от параметров реактора (вида замедлителя, обогащения делящегося материала, состава делящейся композиции и т. д.) и может быть определено либо экспериментально, либо достаточно точными расчетами [1].

Экспериментально и теоретически показано [2, 3], что суммарный объем продуктов деления превышает объем разделившегося урана, что приводит к увеличению (по сравнению с первоначальным) объема делящейся композиции — распуханию (свеллингу). Поэтому различное число делений должно приводить