



Ордена Ленина

ИАЭ-1968

1 А Е -

**Институт атомной энергии**

им. И.В. Курчатова

*А.М. Лузанова, Б.Г. Пологих*

**Методика расчета  
осколочной активности воды  
в первом контуре  
водо-водяного  
энергетического реактора**

**Москва 1970**

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В.КУРЧАТОВА

Л.М.Лузанова, Б.Г.Пологих

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСКОЛОЧНОЙ АКТИВНОСТИ ВОДЫ  
В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

М о с к в а  
1970

## А Н Н О Т А Ц И Я

Представлен вариант схемы, описывающий выход продуктов деления из спеченной двуокиси урана в воду при работе реактора с негерметичными оболочками твэлов. Схема базируется на описании переноса продуктов деления внутри твэлов и из твэлов в воду с помощью двух постоянных коэффициентов, характеризующих скорости перемещения летучих и газообразных элементов. Построенные на основе этих двух коэффициентов расчетные скорости утечки продуктов деления в воду сопоставляются со значениями скоростей утечек, полученными из экспериментальных данных. Предложенная схема иллюстрируется расчетом состава активности воды первого контура АЭС с водо-водяным реактором при определенных предположениях о масштабе негерметичности твэлов.

## В В Е Д Е Н И Е

В ИАЭ им. И.В.Курчатова разработана методика определения состояния оболочек твэлов водо-водяных реакторов с использованием в качестве ядерного топлива спеченных таблеток из  $^{40}\text{Zr}$ . Методика проверена на большом экспериментальном материале и зарекомендовала себя как достаточно хороший инструмент контроля. Сущность её состоит в анализе активности продуктов деления, выделяемых с помощью радиохимии из проб воды первого контура. Методика базируется на конкретной интерпретации механизмов выхода продуктов деления из матрицы твэла. На основе этой интерпретации составлены балансовые уравнения для накопления отдельных радиоактивных изотопов и получены решения, из которых определяется состав активности воды, омывающей твэлы, в функции степени негерметичности оболочек твэлов. Таким образом, каждому состоянию по негерметичности оболочек твэлов приписан характерный состав активных ядер в воде. Сравнение экспериментальных данных по составу активности ядер в воде с характерными табличными составами позволяет сделать заключение о состоянии оболочек твэлов эксплуатируемого ядерного реактора. Табличные составы активностей в воде могут служить исходными данными для проектирования средств радиационной защиты атомной электростанции (АЭС) в период разработки её проекта. При этом требуется на стадии проектирования АЭС выбрать в качестве предельно-допустимой определенную степень

негерметичности твэлов. Этот выбор основывается, обычно, на статистическом материале, заимствованном из опыта эксплуатации других АЭС.

В ряде зарубежных работ, например [1, 2], для определения состава активности в воде ядерного реактора при работе его с негерметичными твэлами (на основе  $\text{UO}_2$ ) предлагается решение балансных уравнений для накопления продуктов деления с постоянными коэффициентами  $\lambda$ , характеризующими выход их из матрицы твэлов без отображения деталей механизма выхода. Из общих физических соображений следует, что такой подход к решению задачи может быть правомерен только для вполне определенного, и вероятно узкого, интервала значений параметров, отображающих состояние оболочек твэлов. Более общее описание явлений должно включать зависимость выхода радиоактивных изотопов от ряда параметров, в том числе от постоянной распада  $\lambda$ . В зарубежных работах эта мысль подчеркивается и имеется достаточно большое количество экспериментальных данных, демонстрирующих зависимость  $\lambda$  от  $\lambda$ . Однако конкретной взаимосвязи между этими параметрами и параметрами, характеризующими дефекты в оболочках и матрицах твэлов, не получено.

Из наших представлений о механизмах выходов продуктов деления в воду следует, что описание кинетики переноса продуктов деления с помощью одного коэффициента типа  $\lambda$ , затруднительно, даже при введении какой-то зависимости его от  $\lambda$ . По нашему мнению более удачным является описание явления с введением по крайней мере двух коэффициентов, характеризующих скорости перемещения продуктов деления  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Можно показать, что решение с одним коэффициентом  $\lambda$  является частным случаем этого общего решения.

Ниже изложено предлагаемое нами общее решение, рассмотрены частные случаи и оценен на основе общего решения состав активности воды в первом контуре АЭС с водо-водяным реактором типа ВВЭР тепловой мощностью 1400 Мвт.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Рассматриваемая нами методика выхода продуктов деления из  $UO_2$  базируется на учете следующих возможных механизмов переноса.

1. Выход осколков деления с поверхностей таблеток спеченной двуокиси урана за счет кинетической энергии отдачи при делении. При этом осколки деления поступают непосредственно в воду, омывающую твэлы, при большой герметичности оболочки твэлов, или в зазор между таблетками и оболочкой, если оболочка не имеет дефектов или они сравнительно малы. Во втором случае рассматривается накопление дочерних элементов под оболочкой твэлов и дальнейший перенос летучих материнских и дочерних продуктов деления в воду через микродефекты в оболочке. Скорость переноса принимается пропорциональной коэффициенту  $\mu_1$ , не зависящему от химической природы элементов и от постоянной их радиоактивного распада. Это означает, что основным процессом транспортировки ядер является конвективный массообмен.

Выходом нелетучих элементов из-под оболочки твэлов через микродефекты в ней пренебрегается ввиду их большой способности осаждения на поверхности. В качестве летучих элементов рассматриваются радиоактивные благородные газы (РБГ), галогены, рубидий и цезий.

2. Выход осколков деления внутрь открытых пор в таблетках за счет кинетической энергии отдачи при делении. При этом внутри пор происходит накопление дочерних радиоактивных продуктов деления и газообразные и летучие элементы перемещаются отсюда в пространство под оболочкой или непосредственно в воду, если оболочка имеет значительные нарушения. Процесс переноса происходит с постоянной скоростью, характеризуемой коэффициентом  $\mu_2$ , не зависящим от химической природы элементов и постоянной радиоактивного распада. Т.е. транспортировка ядер происходит за счет общего массообмена. Продукты деления из зазора под оболочкой поступают в воду через микродефекты в оболочке с постоянной скоростью  $\mu_1$ .

3. Выход осколочных продуктов внутрь открытых пор в таблетках за счет объемной диффузии. Этот процесс зависит от температуры и физических свойств продуктов деления. Он будет играть существенную роль по сравнению с выходом за счет энергии отдачи только для летучих элементов с  $\lambda \leq 10^{-6}$  сек<sup>-1</sup> при температуре выше 1400°C. Такие температуры могут иметь место только в районе оси твэла, в то время как открытые поры при высоких плотностях  $UO_2$  (> 93% от т.п.) находятся вблизи поверхности твэла.

При глубоких выгораниях и высоких температурах (выше 1700°C) в  $UO_2$  появляются многочисленные трещины и не исключается поступление продуктов деления под оболочку твэлов за счет объемной диффузии из зерен в центральной части таблеток. Дальнейшая транспортировка продуктов деления происходит аналогично вышеизложенному. Из анализа экспериментальных данных следует, что величины скоростей выходов  $\mu_1$  лежат в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  I/сек, а  $\mu_2$  - в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-6}$  I/сек, являясь экспоненциальной функцией температуры (см. рис. I).

С учетом изложенных механизмов переноса продуктов деления определим коэффициенты скоростей утечки их в воду следующим образом.

I. Для твэлов с малыми дефектами, когда имеется задержка продуктов под оболочкой.

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{\text{выход } i\text{-го изотопа из твэла в воду за счет трех механизмов}}{\text{количество } i\text{-го изотопа в твэле}} \\ &= \frac{\Delta_{1i} + \Delta_{2i} + \Delta_{3i}}{\sum_{q=1}^i \alpha_q / \lambda_i + V_i} \end{aligned} \quad (I)$$

Отсюда

$$V_i = \frac{(\Delta_{1i} + \Delta_{2i} + \Delta_{3i}) \cdot \lambda_i}{\sum_{q=1}^i \alpha_q - (\Delta_{1i} + \Delta_{2i} + \Delta_{3i})} \quad (2)$$

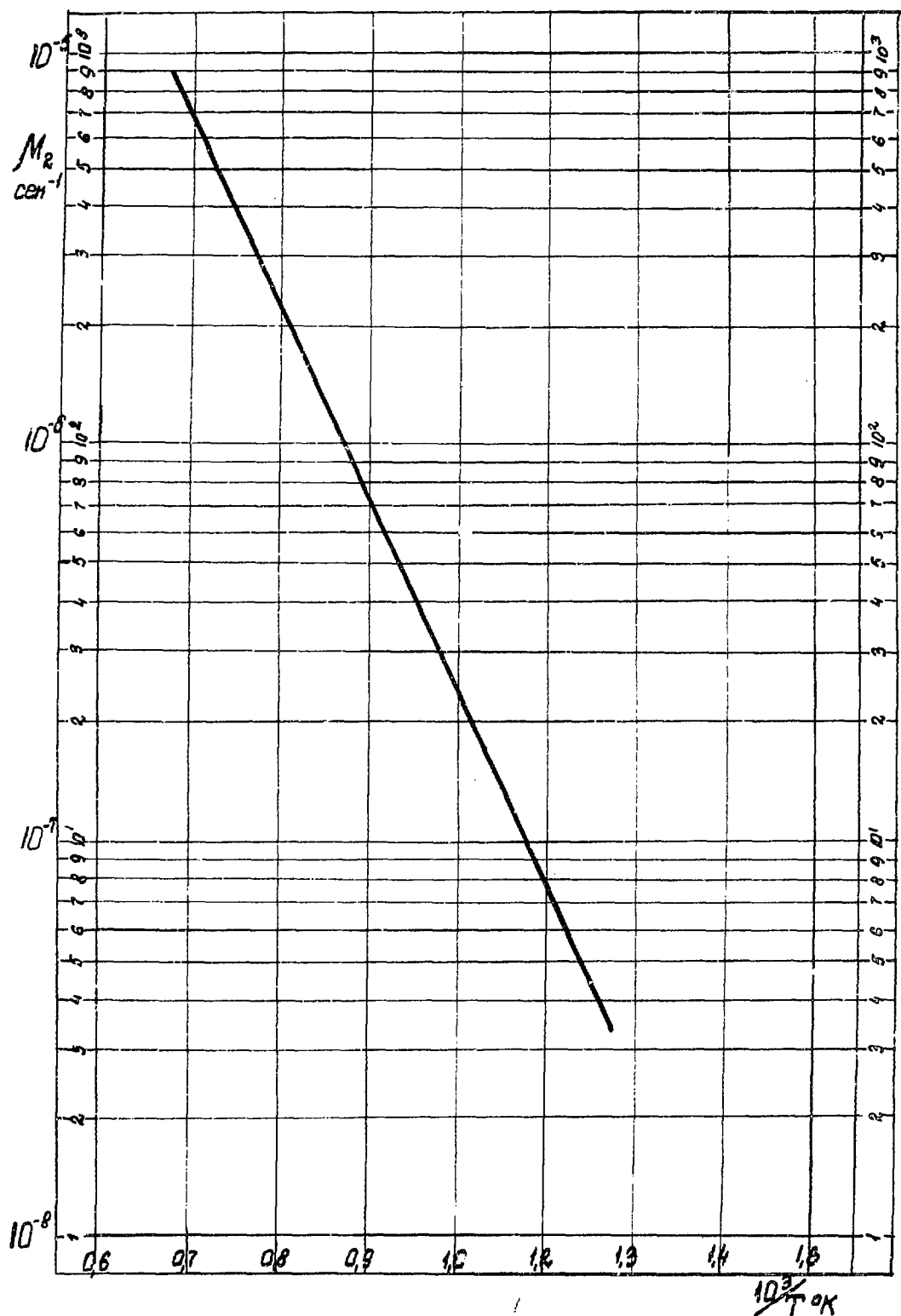


Рис. 1. Коэффициент скорости утечки продуктов деления из пар.



В этих формулах  $\sum_{q=1}^i \alpha_q$  суммарный (или кумулятивный) выход  $i$ -го изотопа на деление урана-235;  $\alpha_q$  - независимый выход изотопа.

$$\Delta_{1i} = \frac{\rho}{\alpha} \cdot \frac{\mu_1}{\lambda_i} \sum_{q=1}^i \left( \alpha_q \prod_{j=q}^i \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_1} \right) \cdot (1 + f_1(t)) \quad (3)$$

где  $\rho$  - длина пробега осколка в  $UO_2$  ;

$\alpha$  - диаметр таблетки  $UO_2$  ;

$f_1(t)$  - функция, зависящая от времени; эта функция превращается в нуль по достижении радиоактивного равновесия при  $t \rightarrow \infty$  .

$$\Delta_{2i} = \frac{F \cdot \rho}{4V} \cdot \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{\lambda_i} \sum_{n=1}^i \left\{ \left[ \frac{1}{\lambda_n} \sum_{q=1}^n \left( \alpha_q \prod_{k=q}^n \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_2} \right) \right] \prod_{m=n}^i \frac{\lambda_m}{\lambda_m + \mu_1} \right\} \times (4)$$

$$\times (1 + f_2(t))$$

где  $\frac{F \cdot \rho}{4V}$  - доля  $UO_2$  , из которого осколки деления попадают в открытые поры (  $F$  - поверхность пор,  $V$  - объем  $UO_2$  ).

$$\Delta_{3i} = \frac{F}{2V} \cdot \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{\lambda_i} \sum_{n=1}^i \left\{ \left( \frac{1}{\lambda_n} \sum_{q=1}^n \left[ \Psi_q \cdot \sqrt{\frac{D_q}{\lambda_q}} \sum_{l=1}^q \alpha_l \right] \prod_{k=q}^n \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_2} \right) \prod_{m=n}^i \frac{\lambda_m}{\lambda_m + \mu_1} \right\} \times (5)$$

$$\times (1 + f_3(t))$$

где  $D_q$  - коэффициент диффузии в  $UO_2$  ;

$\Psi_q = \Psi(\rho, D, \lambda)$  - функция, зависящая от  $\rho$  ,  $D$  ,  $\lambda$  и геометрии среды, в которой происходит диффузия.

Мы будем рассматривать границы зерен, ограничивающих открытые поры, плоскими и соответственно этому использовать решение диффузионного уравнения для пластины. В этом случае

$$\Psi_1 = 1 + \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \left( 1 - e^{-\rho \sqrt{\frac{\lambda_1}{D_1}}} \right) \quad (6)$$

Легко показать, что  $1 \leq \Psi_1 \leq 2$

Функция  $\Psi_q(P, D_q, \lambda_q)$  рассчитывается по формуле (6), если диффузионным смещением предшественников ядра с индексом  $q$  можно пренебречь. В противном случае вид функции  $\Psi_q$  много сложнее, чем (6).

2. Для ТВЭЛов с большими дефектами, когда вода находится в непосредственном контакте с  $UO_2$ .

$\lambda'_i = \frac{\text{выход } i\text{-го изотопа из ТВЭЛов в воду за счет трех механизмов}}{\text{количество } i\text{-го изотопа в ТВЭЛх}}$

$$= \frac{\Delta'_{1i} + \Delta'_{2i} + \Delta'_{3i}}{\sum_{q=1}^i \alpha_q / \lambda_i + \lambda'_i} \quad (7)$$

Или 
$$\lambda'_i = \frac{(\Delta'_{1i} + \Delta'_{2i} + \Delta'_{3i}) \lambda_i}{\sum_{q=1}^i \alpha_q - (\Delta'_{1i} + \Delta'_{2i} + \Delta'_{3i})} \quad (8)$$

$$\Delta'_{1i} = \frac{\alpha_i P}{d} (1 + f'_1(t)) \quad (9)$$

$$\Delta'_{2i} = \frac{F \cdot P}{4V} \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_i} \sum_{q=1}^i \left( \alpha_q \prod_{k=q}^i \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_2} \right) (1 + f'_2(t)) \quad (10)$$

$$\Delta'_{3i} = \frac{F}{2V} \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_i} \sum_{q=1}^i \left[ \left( \Psi_q \sqrt{\frac{D_q}{\lambda_q}} \cdot \sum_{l=1}^q \alpha_l \right) \prod_{k=q}^i \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_2} \right] (1 + f'_3(t)) \quad (11)$$

Исследование коэффициентов  $\lambda'_i$  и  $\lambda'_i$  проще производить для случая, когда по радиоактивности ядер достигнуто насыщение, т.е. все временные функции  $f(t)$  и  $f'(t)$  превращаются в ноль. Именно этот случай будет рассмотрен ниже.

Анализируя формулы (3, 4, 5) и (10, 11), важно иметь в виду, что для нелетучих элементов  $\mu_1 - \mu_2 = 0$  и в произведениях

$\prod_j \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_2}$  и  $\prod_j \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_2}$  соответствующие сомножители превращаются в единицы. То же самое можно сказать о ядрах с малыми периодами

распада, у которых  $\lambda_1 \gg \mu_1$  и  $\lambda_2 \gg \mu_2$ . Для этих ядер можно пренебречь вкладом от диффузии.

Учитывая эти обстоятельства, можно в цепочках радиоактивных превращений производить "сокращение" числа членов и в подавляющем большинстве случаев иметь дело всего лишь с одним или двумя членами. При "сокращении" членов цепочки радиоактивных превращений независимый выход на деление "сокращенного" члена в формулах (3, 4) и (9) приписывается к выходу последующего члена цепочки.

Для первого радиоактивного изотопа

$$V_1 = \frac{\mu_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\frac{\rho}{\alpha} + \frac{\mu_2 F}{2V(\lambda_1 + \mu_2)} \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right)}{1 - \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left[ \frac{\rho}{\alpha} + \frac{\mu_2 F}{2V(\lambda_1 + \mu_2)} \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right) \right]} \quad (I2)$$

$$V_1' = \lambda_1 \cdot \frac{\frac{\rho}{\alpha} + \frac{\mu_2 F}{2V(\lambda_1 + \mu_2)} \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right)}{1 - \left[ \frac{\rho}{\alpha} + \frac{\mu_2 F}{2V(\lambda_1 + \mu_2)} \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right) \right]} \quad (I3)$$

Для второго радиоактивного изотопа

$$V_2 = \frac{\frac{\mu_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left\{ \frac{\rho}{\alpha} \left( \frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \alpha_2 \right) + \frac{\mu_2 F}{2V} \left[ \frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left( \frac{1}{\lambda_2 + \mu_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1} \right) \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right) + \frac{\rho}{2} \frac{\alpha_2}{\lambda_2 + \mu_2} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\lambda_1 + \mu_1} \psi_2 \sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}} \right] \right\}}{(\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left\{ \frac{\rho}{\alpha} \left( \frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \alpha_2 \right) + \frac{\mu_2 F}{2V} \left[ \frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left( \frac{1}{\lambda_2 + \mu_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1} \right) \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right) + \frac{\rho}{2} \frac{\alpha_2}{\lambda_2 + \mu_2} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\lambda_1 + \mu_1} \psi_2 \sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}} \right] \right\}} \quad (I4)$$

$$V_2' = \frac{\lambda_2 \left\{ \frac{\alpha_2 \rho}{\alpha} + \frac{\mu_2 F}{2V(\lambda_2 + \mu_2)} \left[ \frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right) + \frac{\alpha_2 \rho}{2} + (\alpha_1 + \alpha_2) \psi_2 \sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}} \right] \right\}}{(\alpha_1 + \alpha_2) - \left\{ \frac{\alpha_2 \rho}{\alpha} + \frac{\mu_2 F}{2V(\lambda_2 + \mu_2)} \left[ \frac{\alpha_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left( \frac{\rho}{2} + \psi_1 \sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} \right) + \frac{\alpha_2 \rho}{2} + (\alpha_1 + \alpha_2) \psi_2 \sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}} \right] \right\}} \quad (I5)$$

Исследование формул (I2–I5) показывает, что для короткоживущих ядер с  $\lambda \gg \mu_1$  и  $\mu_2$  коэффициенты  $V_1$  и  $V_2$  стремятся к величине, пропорциональной  $\mu_1$ , а коэффициенты  $V_1'$  и  $V_2'$  — к величине, пропорциональной  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$ . В случае больших периодов полураспада и высоких температур внутри твэлов оказывается существенной роль выхода из открытых пор и в том числе диффузии. При наличии преимущественного выхода за счет диффузии коэффициенты скоростей утечки оказываются пропорциональными  $\sqrt{\lambda}$ .

Как видно из формул, коэффициенты  $\lambda$  зависят от ряда параметров, характеризующих конкретную конструкцию твэлов и условия ее работы (температура).

Ниже выполнены расчеты коэффициентов  $\lambda$  для активных зон ряда АЭС и топливной сборки, испытываемой в экспериментальной петле реактора МР. Значения  $\lambda$  для АЭС с водо-водяным реактором ВВР-440 использованы для расчета возможного состава активных продуктов деления в воде первого контура этой АЭС. Расчеты базировались на решении стандартных балансных уравнений с коэффициентами скоростей утечек  $\lambda$ .

В объеме внутри твэлов

$$\begin{aligned}\frac{dQ_1}{dt} &= C\alpha_1 - (\lambda_1 + \nu_1)Q_1 \\ \frac{dQ_2}{dt} &= C\alpha_2 - (\lambda_2 + \nu_2)Q_2 + \lambda_1 Q_1 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dQ_i}{dt} &= C\alpha_i - (\lambda_i + \nu_i)Q_i + \lambda_{i-1} Q_{i-1}\end{aligned}\tag{I6}$$

В воде первого контура

$$\begin{aligned}\frac{dQ'_1}{dt} &= \nu_1 Q_1 - (\lambda_1 + \eta_1)Q'_1 \\ \frac{dQ'_2}{dt} &= \nu_2 Q_2 - (\lambda_2 + \eta_2)Q'_2 + \lambda_1 Q'_1 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dQ'_i}{dt} &= \nu_i Q_i - (\lambda_i + \eta_i)Q'_i + \lambda_{i-1} Q'_{i-1}\end{aligned}\tag{I7}$$

В этих уравнениях

- $Q_i$  — количество радиоактивных ядер  $i$ -го сорта внутри твэлов;
- $Q'_i$  — количество радиоактивных ядер  $i$ -го сорта в воде I-го контура;
- $C$  — постоянная, зависящая от мощности, выделяемой внутри твэлов;
- $\eta_i$  — коэффициент, характеризующий скорость очистки воды от  $i$ -го радиоактивного ядра.

Решения уравнений (I6) и (I7) при нулевых начальных условиях имеют вид

$$Q_i = \frac{C}{\lambda_i} \sum_{j=1}^i \left( \alpha_j \prod_{k=j}^i \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \nu_k} \right) \quad (I8)$$

$$Q'_i = \frac{C}{\lambda_i} \sum_{n=1}^i \left\{ \left[ \frac{\nu_n}{\lambda_n} \sum_{j=1}^n \left( \alpha_j \prod_{k=j}^n \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \nu_k} \right) \right] \prod_{m=n}^i \frac{\lambda_m}{\lambda_m + \nu_m} \right\} \quad (I9)$$

Состав воды I-го контура по активности определяется с помощью формул

$$a_i = \lambda_i Q'_i \cdot \frac{1}{V_1} \quad (20)$$

где  $V_1$  - объем воды в первом контуре.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунках 2-4 представлены рассчитанные по формулам (I2-I3) зависимости  $\nu$  от  $\lambda$  для твэлов реакторов Ново-Воронежской АЭС, АЭС г. Райксберг и опытной петли реактора МР. Для сравнения с расчетными данными на этих же рисунках нанесены величины  $\nu$ , полученные из данных по активности воды первого контура. Для твэлов Ново-Воронежской АЭС наблюдается независимость  $\nu$  от  $\lambda$ . Аналогичные результаты получены для летучих элементов на Шипингпортском реакторе [2].

$\nu = 1,3 \cdot 10^{-8}$  I/сек, и в петлевых испытаниях образца X-I-I (см. таблицу I).

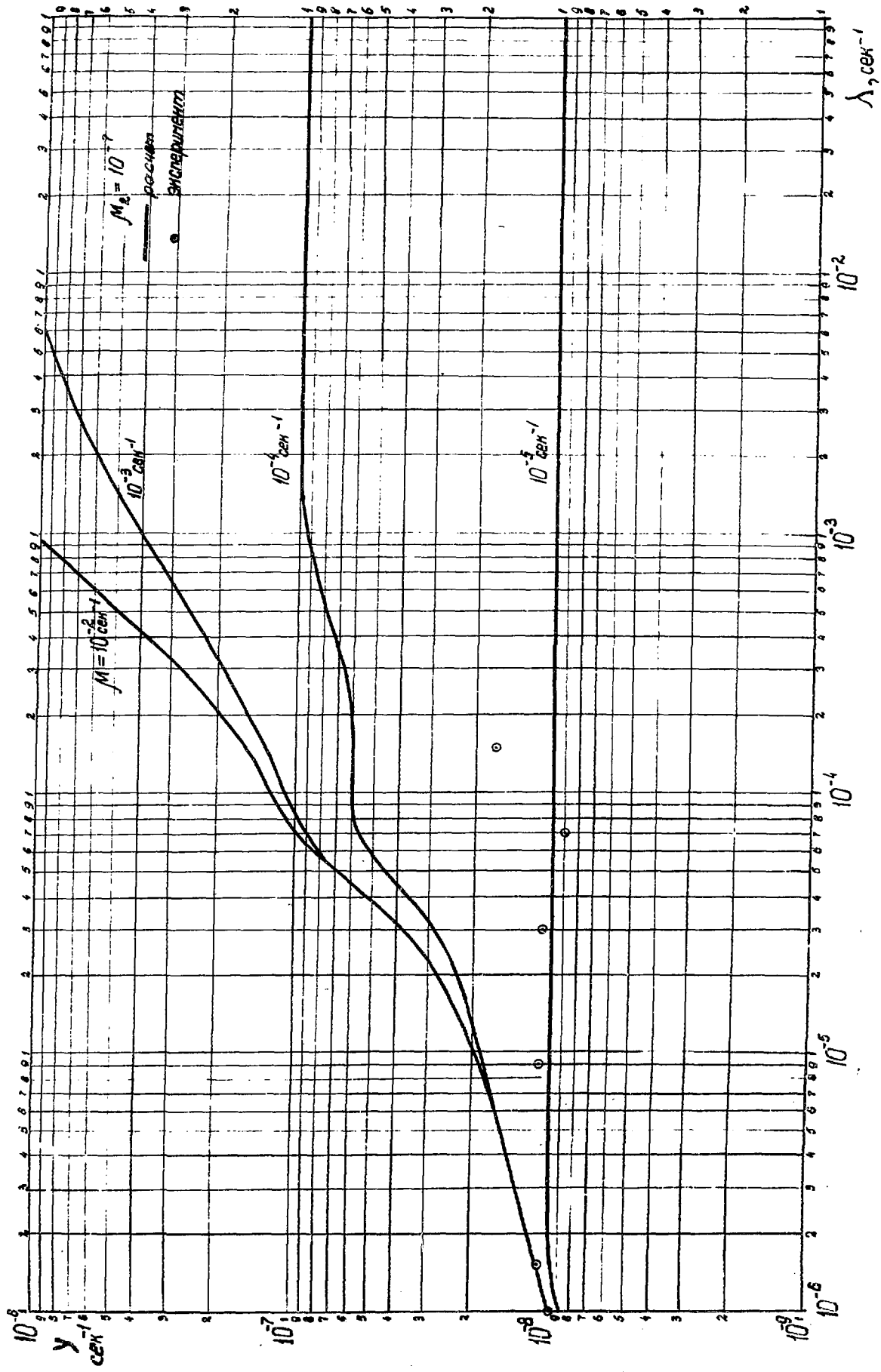


Рис.2. Коэффициент скорости утечи продуктов деления из ТВЭ Ново-Воронежской АЭС

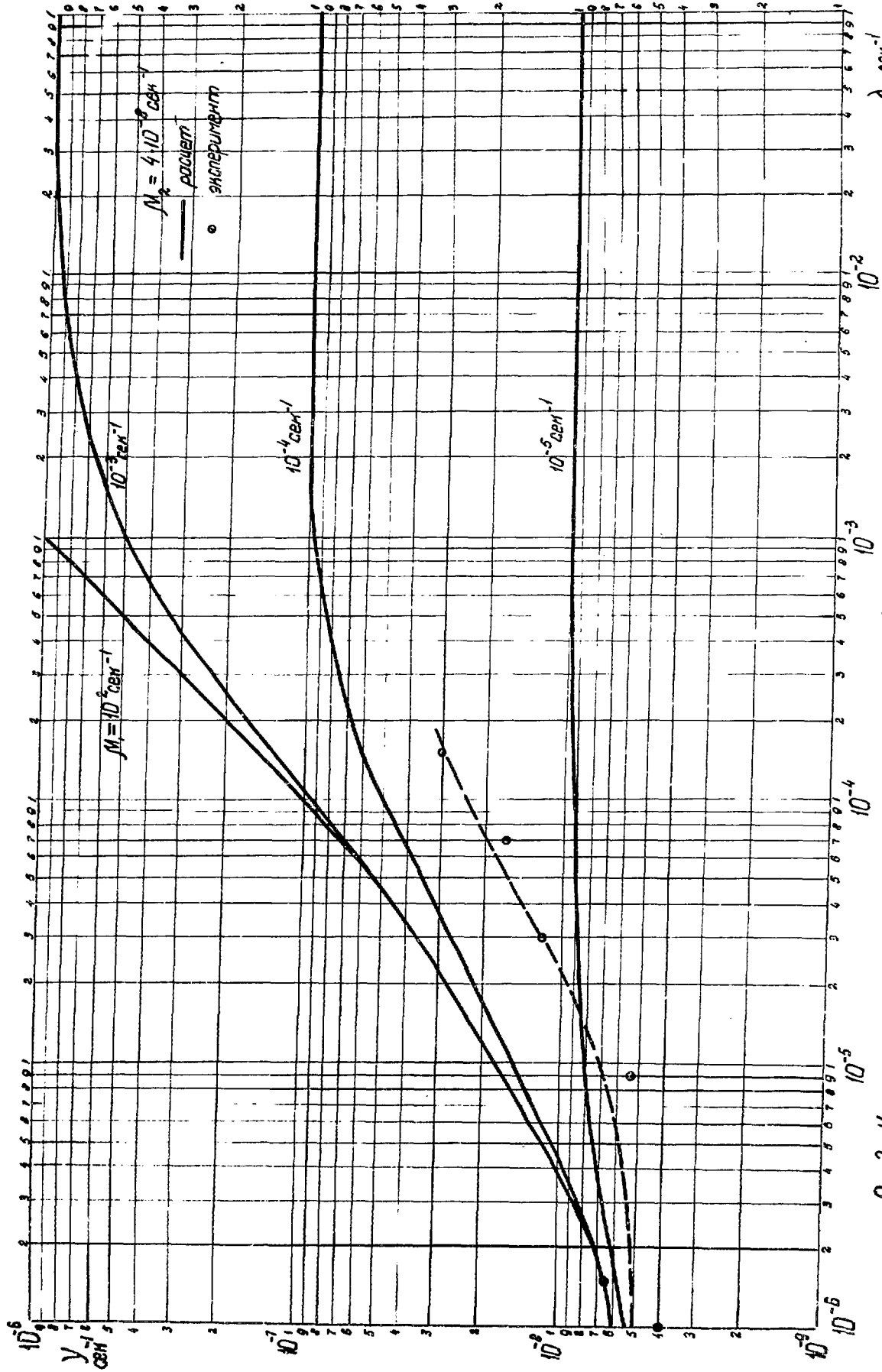


Рис. 3 Коэффициент скорости утечки продуктов давления из ТВЭ реактора АЭС в Райнсберг.

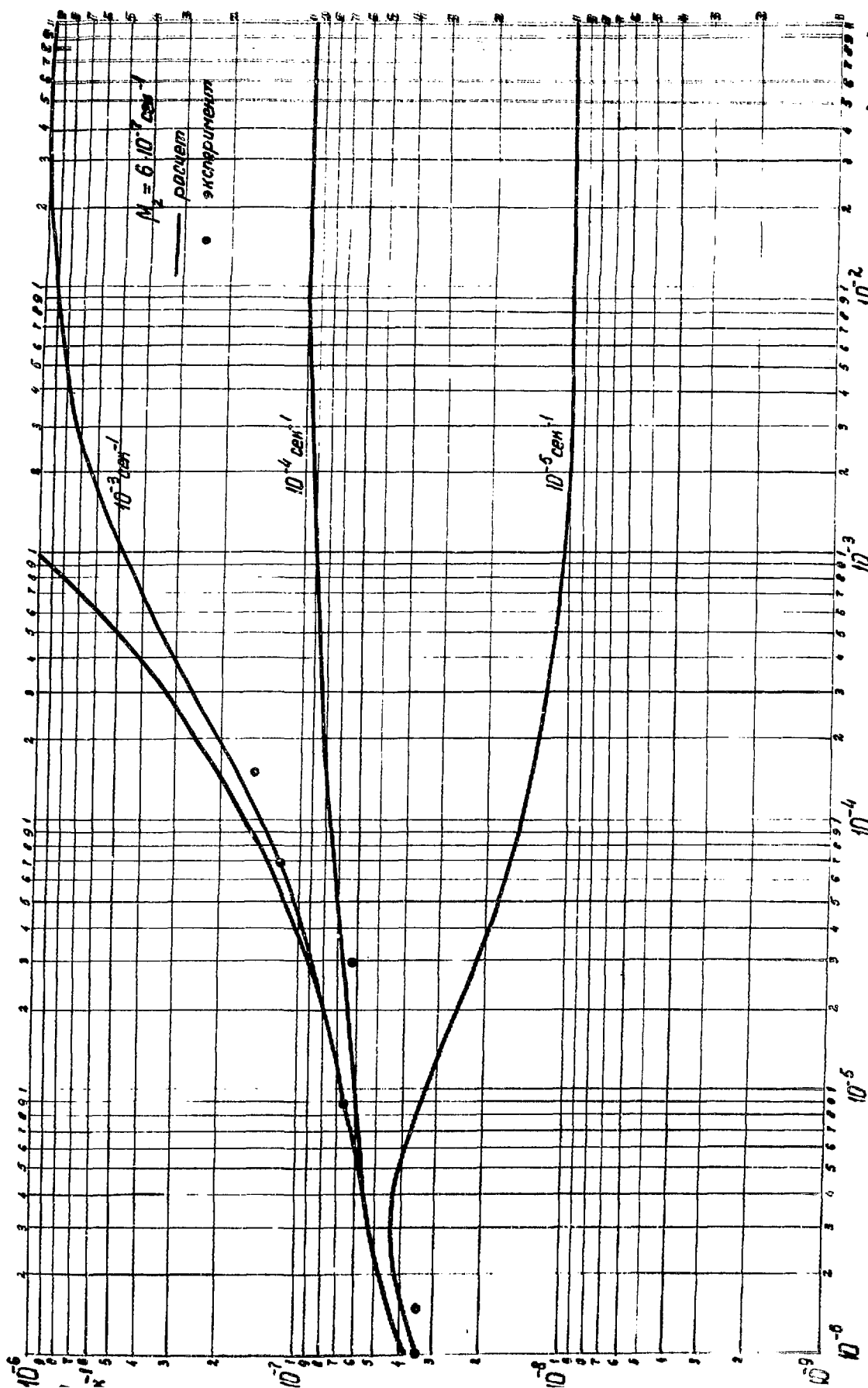


Рис. 4 Коэффициент скорости утечи продуктов деления из ТВЭ петлевой сборки реактора ПР  
 $\lambda, \text{ cm}^{-1}$



Таблица I

## Результаты испытаний твэлов с дефектами 2

	WAPD -29-1	WAPD-29-2	X-I-1	X-I-1
Плотность, % от теоре- тической	33,4	37,4	93	95
Температура центра, °C	1260	1530	1700	> 2750
Коэффициенты скоростей утечек, $\lambda$ I/сек				
Kr - 88	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$4,65 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
Xe - I33	-	-	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-8}$
Xe - I38	$1,78 \cdot 10^{-7}$	-	$3,0 \cdot 10^{-8}$	-
Cs - I38	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$
J - I31	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$
J - I33	-	-	$4,9 \cdot 10^{-8}$	-

Наряду с этим для АЭС г. Райнсберг, опытной сборки петли реактора МР и петлевого образца X-I-X,  $\lambda$  зависит от  $\lambda$ . При испытаниях в петлях образцов WAPD -29-1 и WAPD -29-2 выявлена зависимость утечки от физико-химической природы элемента ( $\lambda$  для иода много меньше, чем для РБГ).

Таким образом  $\lambda = \text{const}$  является частным случаем. Представление  $\lambda$  формулами (12-13) с двумя коэффициентами скоростей утечек  $\mu_1$  и  $\mu_2$  дает более общее решение.

Из рисунков 2, 3 видно, что для реакторов АЭС  $\mu_1 = 10^{-5}$  I/сек. Воспользуемся этим значением  $\mu_1$  для оценки возможного состава активности в воде первого контура АЭС с воде-водяным реактором ВВР-440. Исходные данные для расчета представлены в таблице 2.

Твэлы этого реактора выполнены из спеченной  $UO_2$  с плотностью 95% от теоретической в виде цилиндрических таблеток с внутренними отверстиями ( $d_{\text{вн}} = 1,5$  мм,  $d_{\text{нар}} = 7,5$  мм). Соответственно этому в расчетах используются два значения коэффициента  $\mu_2$ . Один из них относится к выходу с внешней поверхности таблеток, а другой — к выходу с внутренней поверхности таблетки.

Результаты расчетов возможной активности воды I-го контура при определенном масштабе негерметичности твэлов представлены в таблице 3. Расчеты выполнены с учетом 32 цепочек радиоактивных превращений осколков деления. В таблицу внесены активности, превосходящие  $10^{-5}$  к/л. Осколки деления с периодами менее 1 минуты не учитывались. Активность  $Xe^{135}$  рассчитана без учета поглощения в нем нейтронов. Предварительный анализ показал, что в подавляющем большинстве цепочки радиоактивных превращений "сокращаются" (с точки зрения расчета) до одного члена, предшественниками которого являются относительно короткоживущие радиоактивные ядра или нелетучие элементы. Необходимые для расчетов значения  $\lambda$  определялись по формуле (12). Результаты расчетов  $\lambda$  в функции  $A$  представлены на рис. 5. Всего лишь в 4-х случаях представилось необходимым рассчитывать активность ядер с учетом предшественников ( $Rb^{88}$ ,  $Xe^{133}$ ,  $Xe^{135}$ ,  $Cs^{138}$ ). При этом для расчета  $\lambda$  использовалась формула (14). В этих четырех случаях  $\lambda_1$  отличается от  $\lambda_2$  не более, чем на  $\pm 20\%$ . Для расчета выхода продуктов деления в по-ры величина комплекса  $\frac{F_p}{\lambda \cdot V}$  принималась равной 0,026, что согласуется с литературными данными [2] для плотности таблетки  $UO_2$  95%. Роль диффузии оказалась существенной лишь для ядер с постоянными распада более  $10^{-7}$  1/сек ( $Kr^{85}$ ,  $Cs^{137}$  и др.). Вклад их в общую активность воды незначителен.

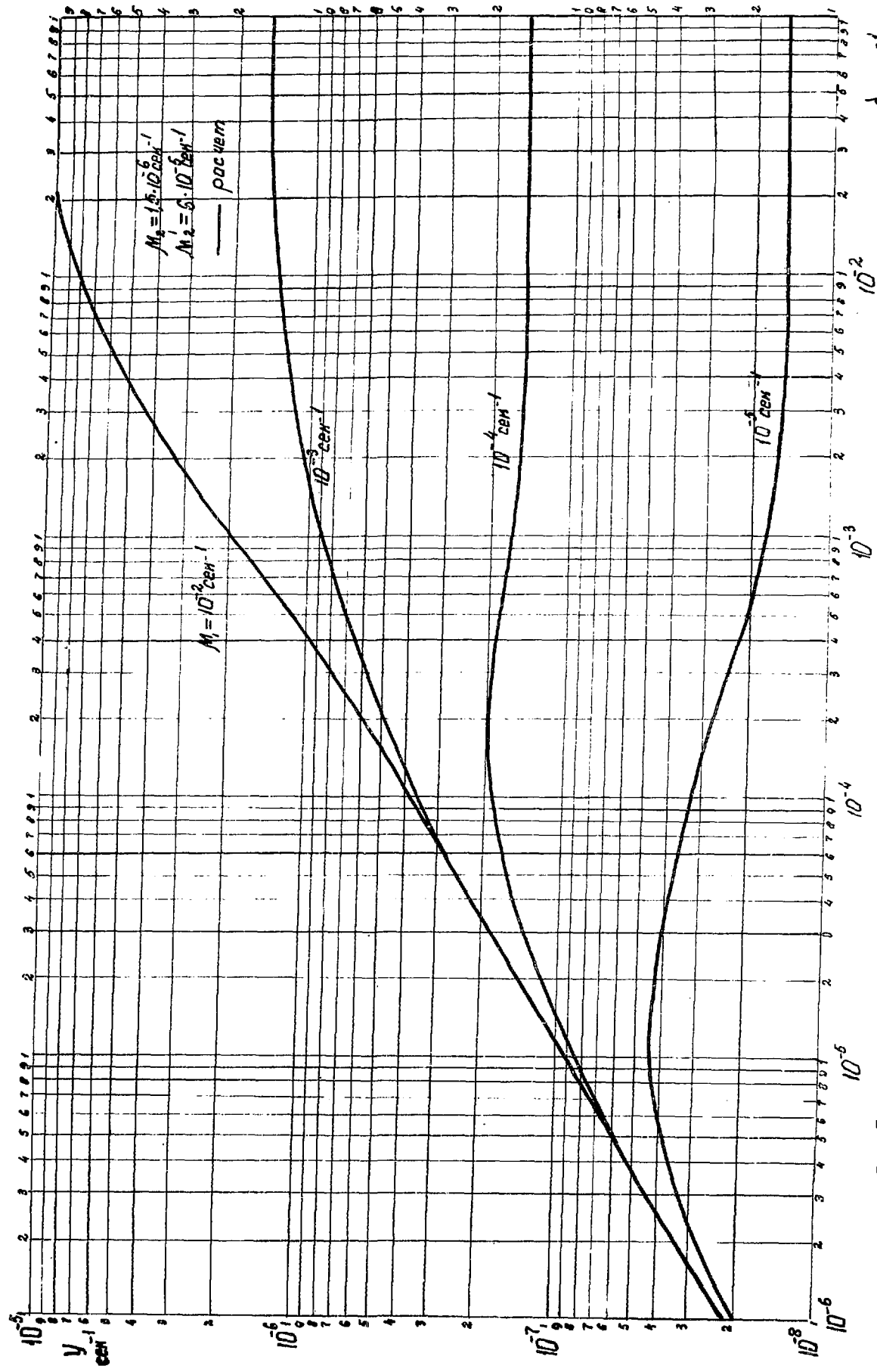


Рис. 5 Коэффициент скорости учета продуктов деления из ТВЭ реактора ВВР-440

Таблица 2

Исходные данные для расчета 3

П а р а м е т р	Величина	П р и м е ч а н и я
Мощность тепловая	1100 Мвт	Учитывалась диффузия с коэффициентом $D = 10^{-13} \text{ см}^2/\text{сек}$
Время работы	200 суток	
Количество твэлов с малыми дефектами	1%	
Количество твэлов с большими дефектами	0,1%	
Для урана с температурой более 1800°C	$7,7 \cdot 10^{-4}$	
$\mu_1$	$10^{-5} \text{ сек}^{-1}$	Из рис. I для $t = 930^\circ\text{C}$ на внешней поверхности
$\mu_2$	$1,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$	
$\mu_2'$	$6 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$	Из рис. I для $t = 1700^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности (экстраполяция)
Объем воды в I-м контуре	200 м <sup>3</sup>	
Постоянная очистки воды		
а) для РБГ	0	
б) для прочих элементов	$4 \cdot 10^{-5} \text{ л/сек}$	

Таблица 3

## Расчетная активность воды I-го контура

Изотопы	к/л . $10^4$	Изотопы	к/л . $10^4$
Kr - 85	2,0	Te - I32	0,2
Kr - 87	5,4	J - I32	8,3
Kr - 88	21,2	Sb - I33	3,5
Rb - 88	21,0	Te - I33	3,5
Kr - 89	4,0	J - I33	43,0
Rb - 89	4,0	Xe - I33	930,0
Rb - 90	5,0	Te - I34	5,2
Rb - 91	4,5	J - I34	17,0
Sr - 91	1,7	J - I35	33,3
Sr - 92	3,0	Xe - I35	123,0
Y - 92	2,1	J - I36	2,7
Sr - 93	5,6	Xe - I37	5,6
Y - 93	1,8	Xe - I38	8,3
Sr - 94	4,7	Cs - I38	12,3
Y - 94	4,4	Cs - I39	5,7
Zr - 97	1,2	Ba - I39	5,7
Nb - 97	1,1	Ba - I40	0,1
Zr - 99	5,3	Ba - I41	5,2
Nb - 99	5,3	La - I41	3,0
Mo - 99	0,4	Ba - I42	5,0
Mo - I01	4,1	La - I42	4,1
Tc - I01	3,9	La - I43	4,6
Mo - I02	3,5	Ce - I43	0,1
Tc - I02	3,5	Ce - I45	3,6
Tc - I03	2,6	Pr - I45	1,6
Tc - I04	1,4	Ce - I46	2,6
Sn - I30	1,7	Pr - I46	2,4
Sb - I30	1,7		
Sb - I31	2,1	Итого:	0,1388 к/л
Te - I31	2,1	в том числе: РБГ	0,1100 к/л
J - I31	17,5	воды	0,0114 к/л
Sn - I32	3,8	прочие	0,0174 к/л
Sb - I32	3,8		

## ВЫВОДЫ

Наблюдения за активностью воды первых контуров водо-водяных реакторов АЭС и воды петель с испытываемыми твэлами на основе спеченной двуокиси урана показывают, что при наличии дефектов у оболочек твэлов в составе активности воды проявляются определенные закономерности. Изучение их позволяет выявить некоторый минимум параметров, с помощью которых можно достаточно успешно предсказывать возможный состав активности воды АЭС с ядерным реактором в случае нарушения герметичности оболочек твэлов. В состав минимума параметров входят геометрические размеры твэлов, плотность таблеток  $UO_2$ , температуры внутри  $UO_2$ , постоянная очистки воды в контуре и коэффициенты скоростей утечек. В качестве последних предлагается рассматривать два коэффициента, определяющих скорость утечки продуктов деления из зазора между оболочкой твэлов и таблетками  $UO_2$  (коэффициент  $\mu_1$ ) и из открытых пор в  $UO_2$  в зазор под оболочкой твэлов (коэффициент  $\mu_2$ ). Обработка экспериментальных данных при малых дефектах в твэлах позволяет рекомендовать для летучих и газообразных элементов наиболее вероятное значение  $\mu_1 = 10^{-5}$  л/сек. Величина коэффициента  $\mu_2$  определяется температурной зависимостью, представленной на рис. 1. В случае больших дефектов в оболочках твэлов (прямой контакт воды с таблетками  $UO_2$ )  $\mu_1 = 1$ . В реальных условиях можно ожидать наличие в оболочках твэлов реакторов АЭС как малых, так и больших дефектов. Исходя из имеющейся статистики для топливных сборок с  $UO_2$  можно ориентироваться для проектных оценок на соотношение между ними 10:1 в пользу малых дефектов и на общее количество малых дефектов не более, чем у 1% всех твэлов. Для оценки вопросов безопасности атомной электростанции целесообразно ориентироваться на характерный для АЭС состав активности воды в соответствии с данными таблицы 3. При суммарной удельной активности воды примерно 0,1 к/л около 80% активности приходится на РБГ и около 8% на изотопы йода.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Поликарпов В.И. и др. "Контроль герметичности тепловыделяющих элементов", М., Госатомиздат, 1962.
2. Ластман Б. "Радиационные явления в двуокиси урана", перевод с англ., М., Атомиздат, 1964.
3. Стекольников В.В. и др. "Атомная электрическая станция с двумя реакторными блоками мощностью по 440 Мвт (АЭС 2x440 Мвт)", доклад на 7-й мировой энергетич. конф., М., 1968.

Т-00036.13.04.1970г. ИАЭ - 1968. Тир. 150 экз.

