

лении и даже не воспринимаются им как неустойчивость распределения нейтронов.

Распространение систем регулирования на субгармоники весьма полезно при проектировании СУЗ реакторов. Эффективность рассмотренных систем регулирования применительно к РБМК и ВВЭР подтверждена моделированием на ЭВМ.

Автор выражает признательность Е. В. Филиппчуку за обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Randall D., Jhon D. «Nucleonics», 1958, v. 16, N 3, p. 82.
2. Афанасьев А. М., Торлин Б. З. Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 4, с. 243.

3. Будников В. И. и др. Атомная энергия, 1978, т. 45, вып. 5, с. 331.
4. Доллежаль Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М., Атомиздат, 1980.
5. Потапенко П. Т. В кн.: Управление ядерными энергетическими установками. Вып. 4. М., Атомиздат, 1970, с. 5.
6. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 6, с. 483.
7. Потапенко П. Т., Дунаев В. Г., Тимохин Е. С. Атомная техника за рубежом, 1979, № 5, с. 3.
8. Емельянов И. Я. и др. Атомная техника за рубежом, 1978, № 10, с. 3.
9. Stark K. Automatica, 1976, v. 12, p. 613.

Поступила в Редакцию 14.03.80

УДК 621.039.534.23

Анализ экспериментальных данных об изменении формы ТВС быстрых реакторов

ПРОШКИН А. А., ЛИХАЧЕВ Ю. И., ТУЗОВ А. Н., ЗАБУДЬКО Л. М., БОНДАРЕНКО В. В., КАРАУЛОВ В. Н.

Изучение отдельных свойств конструкционных и делящихся материалов и общих закономерностей поведения ТВС быстрых реакторов может происходить по двум направлениям.

1. Постановка внутриреакторных экспериментов по исследованию необходимых свойств материалов на опытных образцах (так называемые «чистые» эксперименты). Это направление обеспечивает наиболее глубокое изучение различных физических процессов и механизмов явлений в материалах, но связано со значительными экспериментальными трудностями при достижении флюенса более 10^{23} нейтр./см² и выгорания свыше 5% тяжелых атомов. Кроме того, этот путь не позволяет, как правило, проследить взаимное влияние многих факторов, действующих в реальных конструкциях ТВС.

2. Обработка результатов радиационных испытаний экспериментальных ТВС, а также данных об изменении формы штатных ТВС быстрых энергетических реакторов. Этот подход основывается на использовании аппарата математической статистики для высокоэффективной обработки результатов массовых наблюдений, например методом максимального правдоподобия, методом моментов и т. п.

Оба направления, разумеется, не являются взаимоисключающими, а дополняют друг друга.

Обработка экспериментальных данных по работоспособности твэлов. Методика интерпретации экспериментов основана на известном статистическом методе максимального правдоподобия [1]. Сущность метода состоит в подборе исходных параметров, минимизирующих расхождение экспе-

риментальных и расчетных полей; при этом максимизируется эффективность такой интерпретации с учетом случайного компонента.

Результаты наблюдений U_k представляют собой сумму расчетного компонента $f_k(\rho)$ (который предполагается известным с точностью до неизвестных параметров) и случайного компонента n_k . Вся совокупность наблюдений разбита на k групп ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm K$); наблюдения в пределах k -й группы нумеруются индексом i ($i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, I_k$). При этом принимается, что случайные векторы n_k модели экспериментального материала распределены нормально. Так как функциональные зависимости $f_k(\rho)$ предполагаются известными, задача состоит в нахождении по экспериментальным данным U_k параметров ρ_s ($s = 1, 2, \dots, S$). На практике обычно максимизируют логарифм функции правдоподобия:

$$\ln L(\rho) = \lambda(\rho) = -\frac{1}{2} \sum_{k=-K}^K \{ [U_k - f_k(\rho)] R_k^{-1} \times \\ \times [U_k - f_k(\rho)] + \ln |R_k| + (2I_k + 1) \ln 2\pi \}, \quad (1)$$

где R_k — матрица вторых моментов распределения вероятностей вектора n_k ; $|R_k|$ — определитель этой матрицы; R_k^{-1} — обратная матрица вторых моментов; $[U_k - f_k(\rho)]$, $[U_k - f_k(\rho)]$ — вектор-строка, вектор-столбец значений случайного компонента модели соответственно. При з-оцениваемых параметрах определение «истинных» оценок

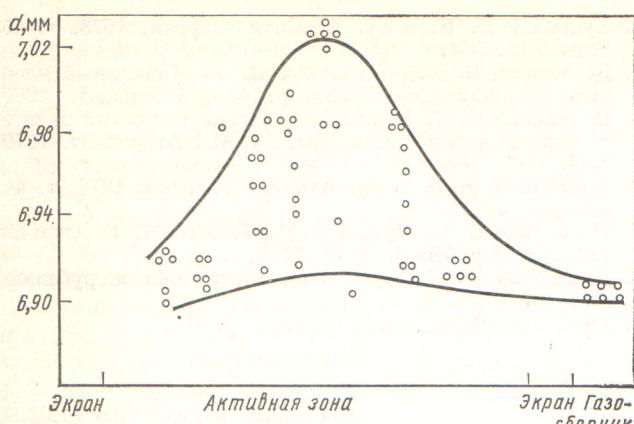


Рис. 1. Экспериментальные значения диаметра по длине твэла

\hat{p}_s сводится к решению s уравнений правдоподобия

$$\partial \lambda(\rho) / \partial p_s = 0, \quad s = 1, 2, \dots, S,$$

$$\text{или} \quad \sum_k \overline{[U_k - f_k(\rho)] R_k^{-1}} \frac{\partial f_k(\rho)}{\partial p_s} = 0. \quad (2)$$

Разработанные [2] методы решения системы уравнения (2) позволяют провести статистическую интерпретацию расчетных и экспериментальных данных о деформированном состоянии твэлов. Следует отметить, что при совместном поиске нескольких параметров предъявляются определенные требования к информативности самого эксперимента.

При вариации геометрических параметров, моделирующих твэл, обогащения топлива и температурного режима оболочки и сердечника можно выполнить эти требования. Надежность интерпретации повышается при более точном задании исходных характеристик твэла, увеличении числа исследуемых твэлов и сокращении числа одновременно исследуемых параметров.

Необходимо отметить, что статистическая интерпретация данных может оказаться неэффективной при минимизации расхождения экспериментальных и расчетных полей. Причинами этого расхождения могут быть значительные погрешности в вводимых в расчеты свойствах и рабочих характеристиках твэлов или влияние совершенно нового и не учитываемого в модели параметра, или неправильная формулировка расчетной модели при обработке экспериментальных данных.

Поэтому при анализе необходимо основываться на соответствующих «чистых» экспериментах по изучению того или иного явления или свойств материалов и предусматривать дополнительные радиационные испытания по облучению твэлов для выяснения причин расхождения экспериментальных и расчетных полей. Вышеизложенный метод был использован для интерпретации экспериментальных данных об изменении формы твэлов-

прототипов, облученных в БОР-60 до выгорания 8 и 10,3% тяжелых атомов [3].

Экспериментально полученные значения диаметра облученных твэлов с оболочкой из стали 0X16H15M3Б приведены на рис. 1 с указанием границ статистического разброса. Остаточная механическая деформация оболочек оценена как разность между измеренной общей деформацией и деформацией, вызванной распусканием стали. Распускание оболочки твэла рассчитывалось по эмпирической зависимости [4]

$$\Delta V/V = 5,6 \cdot 10^{-7} (F)^{0,19-1,63 \cdot 10^{-3} T} \times \exp \left(0,024T - \frac{82,5}{T-650} - \frac{1782}{980-T} \right), \quad (3)$$

где F — радиационное повреждение, смец./атом; T — температура, К.

Экспериментальные и найденные на основании расчетных методов [5, 6] значения деформации оболочки по длине твэлов при выгорании 10,3% тяжелых атомов приведены на рис. 2.

Анализ экспериментальных данных о деформациях твэлов был использован в качестве иллюстрации для оценки некоторых параметров, входящих в расчетную модель. Одновременно проводили корректировку значений скорости радиационной ползучести стали и топлива, а также проводимости зазора топливо — оболочка. Обработка проведена для трех сечений твэла (соответственно $K = 3$, число измерений в каждой группе $I = 22, S = 3$). При оценке были приняты следующие исходные значения этих параметров.

Скорость радиационной ползучести стали

$$\dot{\xi}_{\text{ст}} = 2 \cdot 10^{-12} \sigma F, \text{ ч}^{-1}, \quad (4)$$

где σ — напряжение, Па, F — скорость радиационного повреждения по модели TRN — стандарт [7].

Скорость радиационной ползучести топлива

$$\dot{\xi}_t = 10^{-26} \sigma \Phi, \text{ ч}^{-1}, \quad (5)$$

где Φ — интенсивность делений, дел./($\text{см}^3 \cdot \text{с}$).

Проводимость зазора ($\text{Вт}/\text{см}^2$)

$$\alpha_h = 0,45 + 1,84 \cdot 10^{-4} p + 6,3 \cdot 10^{-7} p^2 + 0,035 \exp(0,9 \cdot 10^{-3} T), \quad (6)$$

где p — контактное давление на границе топливо — оболочка, Па, T — средняя температура в зазоре, К.

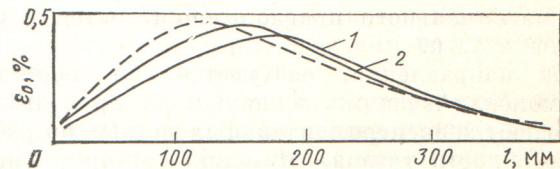


Рис. 2. Сравнение экспериментальной (— — —) и расчетной (—) механической деформации оболочки твэла для первоначально принятых значений параметров (1) и для уточненных (2)

После нескольких итераций уточненные значения этих параметров и средние квадратические отклонения составили $\xi_t = 1,44 \xi_{ct}^{\text{исх}}$; $\xi_t = 0,88 \xi_{ct}^{\text{исх}}$; $\alpha_k = 1,08 \alpha_k^{\text{исх}}$; $\sigma_{\xi_{ct}} = 30\%$; $\sigma_{\xi_t} = 25\%$; $\sigma_{\alpha_k} = 15\%$. Результаты расчета механической деформации оболочек при исходных и уточненных значениях параметров приведены на рис. 2.

Таким образом, использование критерия максимального правдоподобия при интерпретации имеющихся данных дало увеличенное в 1,44 раза значение скорости радиационной ползучести стали, тогда как значения ξ_t и α_k лишь незначительно отличаются от принятых. При отсутствии механического взаимодействия топлива и оболочки в процессе работы твэлов рассмотренная интерпретация экспериментальных данных существенно упрощается. Кроме того, статистическая обработка данных об изменениях формы и давления газов в твэлах, а также данных послереакторных исследований распухания материала оболочки позволяет получить эмпирическую зависимость, характеризующую радиационную ползучесть материала оболочки.

Обработка экспериментальных данных об изменении формы шестиграных чехлов. Обмеры шестиграных чехлов дают возможность получить зависимости, описывающие распухание и ползучесть материала чехла. На шестигранные чехлы ТВС быстрых реакторов действуют внутреннее давление теплоносителя, нейтронный поток и температура, изменяющиеся по высоте сборки. Изменение размера «под ключ», как правило, вызвано совместным воздействием распухания и радиационной ползучести, причем выгиб грани чехла возникает вследствие ползучести материала под действием равномерного давления по длине грани, а равномерное и симметричное возрастание размера «под ключ» — в результате распухания стали и радиационной ползучести под действием нормальной силы.

Эта особенность деформирования чехла позволяет разделить составляющие деформаций, вызванные распуханием и радиационной ползучестью. Статистическая обработка результатов изменений геометрических размеров чехлов различных групп ТВС дает возможность установить зависимость, связывающую изменение размера «под ключ» ΔS вследствие радиационной ползучести материала с уровнем радиационного повреждения F , внутренним давлением теплоносителя P и T , т. е.

$$\Delta S = f(F, P, T). \quad (7)$$

После экспериментального установления зависимости (7) можно, используя решение [8] для изменения формы шестиграных чехлов в случае ползучести упруговязкого материала под воздействием внутреннего давления, определить как функциональный вид уравнения, описывающего ползучесть, так и модуль ползучести. Такой подход является правомочным в предположении, что

основные гипотезы теории течения [9] сохраняются в случае облучения материала.

Соотношение для распухания материала чехлов можно получить путем непосредственной статистической обработки экспериментальных данных о геометрически подобных изменениях размера «под ключ», вычитая значение деформации ползучести от действия нормальной силы. Этот подход был использован при обработке данных об изменениях формы у двух групп шестигранных чехлов БН-350, проработавших при температуре 300—420° С до максимального радиационного повреждения 50 смеш./атом (10 ТВС) и 35 смеш./атом (10 ТВС). Было показано, что изменение размера «под ключ» вследствие радиационной ползучести пропорционально изменению внутреннего давления теплоносителя и уровню радиационного повреждения:

$$\Delta S \sim FP. \quad (8)$$

Влияние температуры на изменение ΔS в данном эксперименте не было выявлено. Многочисленные экспериментальные данные [10, 11] подтверждают отсутствие или практически незначительное влияние температуры на радиационную ползучесть сталей аустенитного класса в диапазоне 300—400° С. На основании этого было принято, что в данном эксперименте скорость радиационной ползучести не зависела от температуры.

Как было установлено [8], изменение размера «под ключ» вследствие радиационной ползучести описывается зависимостью

$$\Delta S = BPFK, \quad (9)$$

если уравнение для скорости радиационной ползучести имеет вид

$$\dot{\xi} = B \dot{F} \sigma,$$

где B — модуль ползучести; \dot{F} — скорость накопления радиационных повреждений; σ — напряжение;

$K = \frac{S^2}{2\delta} \left(1 + \frac{S^2}{72\delta^2} \right)$ — геометрический параметр; δ — толщина чехла.

В результате статистической обработки данных был найден модуль ползучести и получено соотношение для скорости радиационной ползучести стали 0X18H10T

$$\dot{\xi}_{ct} = B \dot{F} \sigma, \text{ ч}^{-1}, \quad (10)$$

где $B = 0,82 \cdot 10^{-7}$ см²/(смеш./атом)⁻¹·ч⁻¹·кг; при этом среднее квадратическое отклонение $B \sigma_B = 0,1 \cdot 10^{-7}$.

Данные о радиационной ползучести стали 0X18H10T и стали 316 сопоставлены на рис. 3. Зависимость распухания стали 0X18H10T от температуры и радиационного повреждения может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta V/V = a_0 \exp \left(\frac{a_1}{T} - \frac{a_2}{T^2} \right) F^{n(T)}, \quad (11)$$

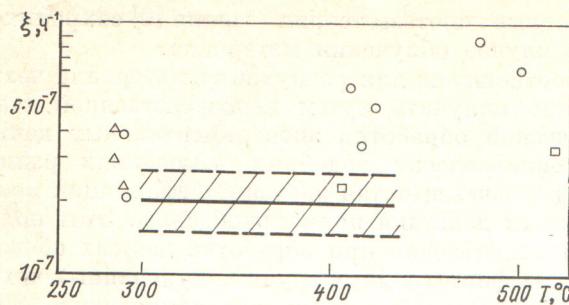


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных о радиационной ползучести стали 0X18H10T и стали 316 AISI в холодно-деформированном состоянии (20 %): Δ , \square , \circ — нормированные данные на $\sigma = 50$ МПа, $F = 7 \cdot 10^{-3}$ с^{-1} (по данным [9], [10], [12]).

где

$$n(T) = a_3 - \exp[a_4(T_0 - T)];$$

$$a_0 = 3,91 \cdot 10^{-7}; a_1 = 8,1 \cdot 10^3; a_2 = 1,74 \cdot 10^6; a_3 = 1,98; a_4 = 0,042; T_0 = 350^\circ\text{C}.$$

Экстраполированная эмпирическая зависимость (11) для температуры от 320 до 420°C удовлетворительно согласуется с полученными в БР-5 экспериментальными данными [4] для температуры 400 — 500°C (рис. 4).

Следует особо отметить, что при нахождении зависимостей (10), (11) предполагалось аддитивное суммирование влияния различных режимов работы реактора на радиационную ползучесть и распухание стали, хотя это предположение еще не получило экспериментального подтверждения и при исследованиях не учитывалась кинетика процессов. Все это затрудняет установление корректного соотношения, описывающего радиационную ползучесть. Поэтому получаемые статистические результаты являются предварительными и должны уточняться по мере накопления данных об изменении формы чехлов и при проведении детальных металловедческих исследований распухания сталей.

Исследование свойств материалов на трубчатых образцах. Другим важным направлением работ, которое широко используется в настоящее время и позволяет более корректно изучить влияние отдельных факторов на радиационную ползучесть и распухание сталей, являются исследования деформации трубчатых образцов в напряженном и ненапряженном состояниях на различных стадиях облучения. Такие эксперименты в заданном интервале температуры и при различном флюенсе нейтронов дают возможность изучить ползучесть и распухание сталей, а также выявить влияние напряженного состояния на дополнительное увеличение объема материала. Обычно при этих экспериментах удается разделить только два эффекта — радиационную ползучесть и распухание материала. Если же измерять не только диаметр,

но и длину образцов, то можно определить все три эффекта. Эта возможность основывается на предположении, что изменение объема тела в результате ползучести вызвано только упругой деформацией, т. е. ползучесть не приводит к изменению объема.

В случае изотропности объемных изменений стали можно легко получить соотношения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{D_\xi} &= \left[\frac{\Delta D}{D} - \left(\frac{\Delta D}{D} \right)' \right] - \left[\frac{\Delta l}{l} - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)' \right] = \\ &= \frac{\Delta D}{D} - \frac{\Delta l}{l}; \\ \varepsilon_{l_\sigma} &= \varepsilon_{D_\sigma} = \frac{\Delta l}{l} - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)', \end{aligned} \quad (12)$$

где $(\Delta D/D)$, $(\Delta l/l)$ и $(\Delta D/D)'$, $(\Delta l/l)'$ — изменение диаметра и длины образца, нагруженного ($\sigma \neq 0$) и не нагруженного ($\sigma = 0$) давлением соответственно; ε_{D_ξ} — изменение диаметра, вызванное ползучестью материала; $\varepsilon_{l_\sigma} = \varepsilon_{D_\sigma}$ — изменение длины и диаметра образца вследствие влияния напряженного состояния на объемные изменения материала при облучении.

Используя экспериментальные данные и соотношения (12), можно проверить основные гипотезы используемой теории ползучести во внутриреакторных условиях при различных видах напряженного состояния и ступенчатом нагружении.

Таким образом, рассмотренные подходы к интерпретации экспериментальных данных об изменении формы чехлов и чехлов штатных ТВС позволяют оценивать свойства материалов, в первую очередь — радиационную ползучесть и распухание, благодаря чему можно оперативно и бо-

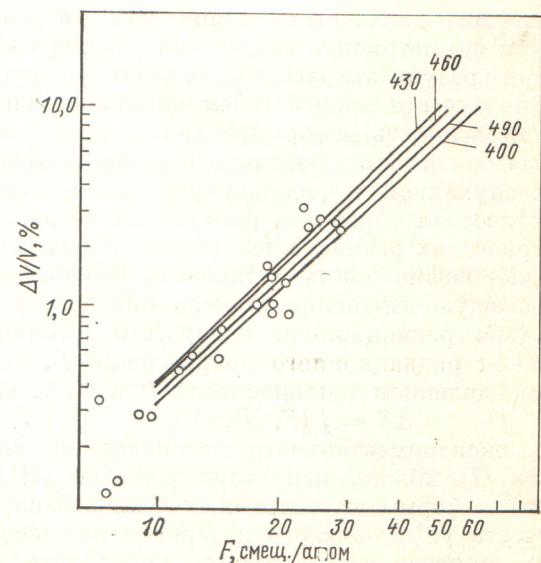


Рис. 4. Зависимость распухания стали чехла от радиационного повреждения: \circ — данные БР-5; — — согласно зависимости (12); цифры у кривых — температура, $^\circ\text{C}$

лее надежно прогнозировать работоспособность активных зон действующих и проектируемых реакторов. В целях более корректного изучения влияния отдельных факторов на радиационную ползучесть и распухание, в том числе и влияния напряженного состояния на изменения объема конструкционного материала, целесообразно проводить радиационные испытания трубчатых образцов под давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольцман Ф. М. Статистические модели интерпретации. М., Наука, 1971.
2. Березин И. С., Жидков И. А. Методы вычислений. М., Физматгиз, 1962.
3. Golovnin I. S., Lichatchov Ju. I. In: Proc. Conf. on Fuel Failure Mechanisms. Seattle, Washington, May 1975, p. 158.

4. Sheerbak V. I. e.a. J. Brit. Nucl. Soc., 1975, v. 14, N 2, p. 27.
5. Лихачев Ю. И., Прошкин А. А., Забудько Л. М. В кн.: Труды Симп. СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Т. 1. Обнинск, изд. ФЭИ, 1975, с. 52.
6. Лихачев Ю. И., Пуников В. Я. Прочность тепловыделяющих элементов. М., Атомиздат, 1978.
7. Bromman J.e.a. In: Proc. Conf on Irradiation Embrittlement and Creep. L., 1972, p. 171.
8. Прошкин А. А., Забудько Л. М. Препринт ФЭИ-701. Обнинск, 1976.
9. Качанов Л. М. Теория ползучести. М., Физматгиз, 1960.
10. Dupouy J. In: Proc. Conf. on Radiation Effects in Breeder Reactor Structural Materials. Arizona, 1977, p. 12.
11. Walters L.e.a. Ibid., p. 81.
12. Mosedale D.e.a. [10], p. 170.

Поступила в Редакцию 14.03.80

УДК 621. 039. 53; 621.039.531

Радиационное распухание и радиационная ползучесть металлов

БОНДАРЕНКО А. И., КОНОВЕЕВ Ю. В.

Известно, что при облучении быстрыми нейтронами холоднодеформированных аустенитных нержавеющих сталей плотность дислокаций в них уменьшается и при флюенсе $\sim 10^{22}$ нейтр./см² становится равной плотности дислокаций в отожженном материале того же состава, облученного при тех же условиях [1]. Такое состояние следует объяснить переползанием и аннигиляцией дислокаций разного знака. Согласно существующим представлениям, краевые дислокации переползают в результате поглощения избыточного диффузионного потока межузельных атомов, поскольку, как предполагается, они несколько эффективнее захватывают межузельные атомы, а не вакансии. Однако переползание возможно лишь при наличии в материале «нейтральных стоков», не обладающих такой асимметрией захвата и способных поглотить возникающий нескомпенсированный поток вакансий. В качестве нейтральных стоков для точечных дефектов обычно рассматривают вакансационные поры. Но при флюенсе $\sim 10^{22}$ нейтр./см² подавлено образование пор в холоднодеформированных сталях [1]. Поэтому для объяснения сравнительно быстрого восстановления дислокационной структуры в материале с высокой начальной плотностью дислокаций необходимо предположить существование достаточно интенсивных нейтральных стоков. Как представляется, такими стоками могут служить смешанные, геликоидальные дислокации, вводимые в материал при деформировании. Так как у геликоидальных дислокаций существует краевой компонент и, следовательно, их упругое взаимодействие с точечными дефектами как с дилатационными центрами

отлично от нуля, «нейтральность» этих стоков рассматриваем как постулат. Однако в отличие от существующих теорий радиационного распухания и радиационной ползучести металлов [2, 3] такой подход позволяет описать процесс уменьшения плотности дислокаций в холоднодеформированном материале при низком флюенсе и, следовательно, более правильно учесть влияние дислокационной структуры на распухание и ползучесть нержавеющих сталей. Сформулированные в настоящей работе уравнения описывают кинетику распухания и ползучести металла под облучением, а также радиационно-стимулированный отжиг геликоидальных и краевых дислокаций на основе предположения о геликоидальных дислокациях как о нейтральных стоках точечных дефектов.

Теория. Представим тензор деформации ε_{ik} в виде суммы:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{3} \delta_{ik} \varepsilon_{mm} + \left(\varepsilon_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \varepsilon_{mm} \right), \quad (1)$$

где δ_{ik} — символ Кронекера. Так как свертка ε_{mm} равна относительному изменению объема S , первое слагаемое в уравнении (1) описывает распухание материала под облучением. Второе слагаемое (девиаторная часть ε_{ik}) описывает деформацию, при которой объем металла не изменяется, т. е. радиационную ползучесть.

Будем исходить из следующих предположений.

1. Основной причиной радиационной ползучести является наведенная приложенным напряжением дополнительная асимметрия захвата точечных дефектов краевыми дислокациями и петлями межузельных атомов (механизм Хэлда и Спайта [4]).

