

Овчинников Илья Игоревич

OvchinnikovIlyaIgorovich

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

Доцент/docent

05. 23. 17 Строительная механика

E-Mail: bridgeart@mail. Ru

Овчинников Игорь Георгиевич

OvchinnikovIgorGeorgievich

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Профессор/professor

E-Mail: bridgesar@mail. Ru

Богина Маргарита Юрьевна

BoginaMargaritaYurievna

Балашовский институт (филиал)

Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского

Аспирант/aspirant

E-Mail: Boginam@mail. Ru

Матора Алексей Викторович

MatoraAlexeyVictorovich

НИИ имени Герсевича

Старший научный сотрудник

seniorresearchassociate

E-Mail: mts@forpost. ru

**Модели и методы, используемые при расчете и моделировании поведения
конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред**

**Models and the methods used at calculation and modelling of behaviour of
constructions, radiation environments exposed to influence**

Аннотация: В обзоре рассмотрены постановки и решения задач расчета кратковременной и длительной прочности различных элементов конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации совместному действию нагрузки, температуры и радиационному облучению. Учитывается, что радиационное воздействие приводит к необходимости учитывать его влияние на прочностные, пластические характеристики материалов и особенно на ползучесть. Обязательным элементом учета при расчетном анализе является радиационное распухание. Отмечается, что материалы, предназначенные для конструкций, работающих в активных зонах, должны обладать радиационной прочностью, то есть способностью противостоять возникновению и развитию разрушения в процессе эксплуатации в условиях воздействия на материал радиационного облучения.

The Abstract: In the review statements and solutions of problems of calculation of short-term and long durability of various elements of the designs which are treating in use to joint action of loading, temperature and to radiation exposure are considered. It is considered that radiation influence results in need to consider its influence on strength, plastic characteristics of materials and especially on creep. Obligatory element of the account in the settlement analysis is radiation swelling. It is noted that the materials intended for designs, working in active zones, have to possess

radiation durability, that is ability to resist to emergence and destruction development in use in the conditions of impact on a material of radiation exposure.

Ключевые слова: Радиационная прочность, ползучесть, длительная прочность, долговечность, радиационное распухание, нелинейные уравнения, идентификация

Keywords: Radiation durability, creep, long durability, durability, radiation swelling, nonlinear equations, identification.

Как известно, с точки зрения механики деформированного твёрдого тела можно сформулировать ряд задач, решение которых необходимо при исследовании поведения конструкций и их элементов при воздействии радиационных полей:

- нахождение законов распределения эффектов воздействия радиационных сред по объёму рассчитываемых конструкций;
- экспериментальное исследование влияния радиационных сред на кратковременные и длительные механические характеристики материалов конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред.
- построение моделей деформирования и разрушения материалов в условиях воздействия радиационных сред с учетом эффектов, сопровождающих это воздействие;
- построение моделей деформирования и разрушения конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред и применение их для прогнозирования напряжённо-деформированного состояния и долговечности конструкций в условиях воздействия радиационных сред при одновременном учёте влияния других эффектов.

Предварительный анализ показывает, что в настоящее время практически не удается найти достаточно полный набор экспериментальных данных по кратковременным и длительным механическим характеристикам для определенного материала при различных температурных и силовых воздействиях, и, тем более, достаточно полных экспериментальных данных по поведению конкретных элементов конструкций в определенных радиационных условиях при известных историях изменения напряжений, деформаций и их долговечности.

Поэтому формулируем ряд задач, решение которых представляет интерес для задачи прогнозирования поведения конструкций в радиационных условиях:

- анализ экспериментальных данных и построение моделей деформирования и разрушения материалов в условиях воздействия радиационного облучения и сопровождающих эффектов;
- разработка методик идентификации и параметрическая идентификация этих моделей с использованием имеющихся экспериментальных данных;
- построение моделей деформирования и разрушения конструкций из этих материалов с учётом воздействия радиационных факторов и других эффектов;
- разработка методик расчёта конструкций с учётом неоднородности, вызванной действием радиационных факторов;
- разработка и отладка либо самостоятельных программных комплексов, либо привязка к конкретным задачам существующих промышленных конечно-

элементных программных комплексов для прогнозирования поведения конструкций с учётом воздействия радиационных факторов и определения напряженно-деформированного и поврежденного состояния с целью оценки долговечности конструкций в рассматриваемых условиях.

Обзор основных моделей и методов расчёта конструкций, подвергающихся радиационному облучению

Так как сначала экспериментально было установлено, что под влиянием радиационного облучения изменялись упругие характеристики материала - модуль упругости и коэффициент поперечной деформации, а также появлялись дополнительные радиационные деформации, то самые первые методы расчёта конструкций с учётом радиационного облучения сводились к расчёту конструкций с переменными и изменяющимися под влиянием облучения упругими характеристиками с добавлением объёмных радиационных деформаций по примеру тепловых деформаций.

И до настоящего времени, несмотря на то, что проблемой расчета конструкций с учетом радиационных воздействий занимаются уже довольно длительное время, общепринятой методологии расчета напряженно-деформированного состояния и долговечности конструкций с учетом воздействия радиационных сред не существует. Поэтому далее рассмотрим различные подходы и модели, используемые различными исследователями для решения поставленных задач.

Анализ доступной литературы показал, что одной из первых публикаций в которых начал рассматриваться учёт влияния радиационных воздействий на поведение деформируемых тел, была статья Dienes G. J. [1].

Дальнейшие исследования, посвященные анализу напряжений в металлах, вызванных объёмными изменениями при нейтронном облучении, проводились Ю. И. Ремнёвым [2,3,4].

В статье В. С. Ленского [5] отмечено, что существенное изменение механических свойств с учётом неравномерного распределения по объёму требует уточнения существующих и разработки новых теорий и методов расчёта элементов конструкций, особенно если они в процессе эксплуатации испытывают воздействие радиационных потоков. Также отмечалось, что изменение механических свойств, вызванное радиационным облучением в большинстве случаев является стойким, сохраняется в течение длительного времени, а поэтому необходим их корректный учёт. В [5] также отмечалось, что в расчётном отношении облученное тело аналогично телу с неравномерным распределением температуры с таким градиентом, когда нельзя не считаться с изменением физико-механических свойств. Там же приводятся соображения о методах статического расчёта тел, облученных радиационными потоками, в частности нейтронами. Вводится гипотеза о том, что интенсивность потока нейтронов убывает по мере удаления на расстояние z от поверхности тела по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-\mu z}, \quad (1)$$

где I_0 - интенсивность потока проходящего через единицу площади поверхность, μ - константа материала, зависящая от температуры.

Вторая гипотеза представляет собой предположение, что изменения механических свойств материала в каждой точке зависят только от дозы облучения в этой точке (и от температуры) и не зависят от изменений в других точках.

В этом случае соотношения теории малых упругопластических деформаций для облучаемого тела принимают вид[5]:

$$\sigma_{mn} - \delta_{mn}\sigma = \frac{2\sigma_i}{2\varepsilon_i}(\varepsilon_{mn} - \delta_{mn}\varepsilon); \quad (2)$$

$$\sigma_i = 3G_o\varepsilon_i[1 - \Omega(N, \varepsilon_i)]; \quad (3)$$

$$\sigma = 3K\varepsilon + \varphi(N), \quad (4)$$

где σ_{mn} и $\varepsilon_{mn}(m, n = x, y, z)$ - компоненты тензора напряжений и деформаций, δ_{mn} - символ Кронекера, σ, ε - среднее нормальное напряжение и деформация, σ_i, ε_i - интенсивности напряжений и деформаций, $N(x, y, z, t) = t \cdot I(x, y, z)$ - доза облучения в точке (x, y, z) в момент времени t , G_o - некоторое фиксированное значение модуля сдвига в теле, например, начальное, K - модуль объёмной упругости.

Функции Ω, φ - определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \Omega(0, \varepsilon_i) &= \omega(\varepsilon_i) \\ \Omega(N, \varepsilon_i) &= \frac{G_0 - G(x, y, z, t)}{G_0} \text{ при } \varepsilon_i < \varepsilon_s(x, y, z, t) \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

$$\varphi(0) = 0. \quad (6)$$

В выражениях (5), $\omega(\varepsilon_i)$ - функция, определяющая упрочнение в необлучённом материале, $G(x, y, z, t)$ - значение модуля сдвига в точке (x, y, z) облучённого тела в момент t . $\varepsilon_s(x, y, z, t)$ - предел упругих деформаций в той же точке облучённого тела.

Функции $N, G, \Omega, \varphi, \varepsilon_s$ - полагаются известными для конкретного материала. Время t входит во все выражения в качестве параметра, определяющего дозу облучения и сопутствующее ей изменение механических свойств. Функция Ω имеет такой же смысл, как функция $\omega(\varepsilon_i)$ в теории малых упруго-пластических деформаций.

Кроме того, в [5] отмечается, что в случае, если радиоактивное облучение сопровождается неравномерным нагревом, как это имеет место в ряде элементов реакторов, функции Ω и φ учитывают как прямое влияние температуры, так и отжиг радиационных эффектов. При отсутствии радиационных потоков эти функции учитывают только воздействие температуры.

В статье А. А. Ильюшина и П. М. Огибалова [6 42] рассматривается метод расчёта толстостенных цилиндрических оболочек с учётом радиационного облучения. Здесь, по аналогии с [5] принято, что закон распределения потока нейтронов по толщине стенки оболочки имеет вид:

$$I(z) = I_o e^{-\mu z}, \quad (7)$$

где μ - константа материала (макроскопическое эффективное материала элемента конструкции)

В случае, если I_o не зависит от времени, то к моменту t через сечение z пройдёт поток, равный:

$$t \cdot I(z) = I_0 t e^{-\mu z}. \quad (8)$$

Приближенно можно предположить, что изменение объема материала, т. е. объемное расширение θ , прямо пропорционально потоку $t \cdot I(z)$, то есть:

$$\theta = B I_0 e^{-\mu z} t, \quad (9)$$

где B – константа.

В [6] также приводится модель, описывающая объемные изменения:

$$\theta = B n v t e^{-\mu z}. \quad (10)$$

Зависимости модуля упругости, предела текучести и прочности и всей диаграммы деформирования от суммарного потока nvt различных энергий была экспериментально исследована после облучения образцов в ядерных реакторах. Результаты этих экспериментов показывают [6], что модуль упругости при радиационном облучении обычно изменяется слабо (возрастает на 1,5-5% относительно необлученного образца), а вот пределы прочности и текучести весьма чувствительны к облучению – особенно предел текучести.

Для массивных тел с плоской границей число проходящих на глубине z под этой границей нейтронов за время t можно записать через поток nvt на плоской границе в виде выражения:

$$(nvt)_z = nvt \cdot e^{-\mu z}, \quad (11)$$

и поэтому предел текучести σ_s модуль сдвига G , будут переменными по глубине z .

В [6] также предполагается, что свойства материала, возникающие на глубине z , совпадают со свойствами при однородном радиационном облучении мощностью $(nvt)_z$.

Выражения $G = G(nvt)$, $\sigma_s = \sigma_s(nvt)_z$ дают кривые изменения G и σ_s по глубине z при заданном $nvt = N$ на поверхности

$$G = G(N e^{-\mu z}), \sigma_s = \sigma_s(N e^{-\mu z}). \quad (12)$$

В [6] отмечается также что, если облучению мощности nvt подвергается тело с плоскими границами, толстостенная труба или сфера, причём объемные изменения являются незначительными, то распределение напряжений и деформаций в них можно найти по формулам теории упруго-пластических деформаций неоднородного тела [7, 8].

В [6] приводятся следующие зависимости модуля упругости:

$$\text{для трубы } G = G\left[N \frac{a}{r} e^{-\mu(r-a)}\right], \sigma_s = \sigma_s\left[N \frac{a}{r} e^{-\mu(r-a)}\right]; \quad (13)$$

$$\text{для сферы } G = G\left[N \frac{a^2}{r^2} e^{-\mu(r-a)}\right], \sigma_s = \sigma_s\left[N \frac{a^2}{r^2} e^{-\mu(r-a)}\right]. \quad (14)$$

Усилие в оболочке определяется выражением:

$$T = \sigma_s(N_z) - 3G l_i = \left[N e^{-\mu\left(\frac{h}{2} - z\right)} \right] - 2\sqrt{3}G \sqrt{P_\varepsilon - 2zP_{\varepsilon\chi} + z^2P_\chi}, \quad (15)$$

где $P_\varepsilon = p^2 \tilde{P}$, $P_\chi = p^2 \bar{P}$, $P_{\varepsilon\chi} = p^2 \tilde{P}_{\varepsilon\chi}$.

Через p обозначается параметр, характеризующий нагрузку на оболочку, причём вследствие линейности задачи величины ε и χ пропорциональны p , а форма P пропорциональна квадрату p .

Отмечается, что если упругие свойства металлов при облучении изменяются слабо, а предел текучести сильно, то для расчёта напряжений и деформации различного рода оболочек, подвергнутых облучению с наружной или внутренней поверхности, можно применить обычную теорию упругих оболочек. Специфика будет состоять в определении нагрузок, при которых впервые возникают пластические деформации, т. е. в критериях прочности.

В [9], описаны результаты исследования времени до разрушения при внутриреакторной ползучести холоднодеформированной нержавеющей стали 316, причем время до разрушения при послерадиационной и внутриреакторной ползучести оценивалось на основе модели, объясняющей разрушение образца высокой плотностью повреждённых зон; для этого использовалась следующая модель, оценивающая время до разрушения при внутриреакторной ползучести:

$$\int_0^{T_R} \dot{\omega} dt + \int_0^{T_R} \left\{ \left[\frac{dE(\Phi t, \theta)}{dt} \right] \left[\int_t^{T_R} \dot{\omega} dt \right] \right\} dt = 1, \quad (16)$$

где Φ – нейтронный поток, $\dot{\omega}$ - скорость накопления повреждений, $E(\Phi t, \theta)$ – плотность зон повреждения. Первый член левой части уравнения описывает рост повреждений в необлучённом состоянии, а второй - увеличение плотности зон повреждения в ядерных реакторах за время между 0 и T_R .

Разрушение изоляционного покрытия цилиндрических оболочек элементов реакторов исследовалось в [10], причем покрытие рассматривалось как длинная цилиндрическая оболочка, слабо овальная в поперечном сечении. Использовались обычные для технической теории тонких оболочек предположения: материал считался упруго-пластическим (использовались уравнения Прандтля - Рейсса), условие пластичности принималось в форме Мизеса. Рассматривалась квазистатическая задача из-за медленного (без инерционных эффектов) изменения нагрузок во времени. Модель ползучести материала после достижения нагрузками максимальных значений принималась в виде:

$$\dot{\varepsilon} = f(\sigma, t, T, \Phi), \quad (17)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформаций ползучести, t - время, T - температура, Φ - плотность потока нейтронов. Вследствие аддитивности составляющих ползучести в выражении полной деформации и линейности уравнений равновесия, все эффекты ползучести представляются в виде некоторых фиктивных нагрузок. Решение уравнений равновесия ведётся шаговым методом.

В [11] рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния ТВЭЛов (тепловыделяющих элементов) в условиях ползучести и длительного облучения, сводящаяся к решению системы дифференциальных уравнений, что можно сделать только численными методами. Поэтому результаты расчета с использованием схем матричной прогонки сравниваются с результатами расчетов по трехточечной схеме. Делается вывод о том, что при определении напряженно-деформированного состояния слоистых ТВЭЛов метод матричной прогонки является более удобным. В свою очередь, из различных вариантов матричной прогонки наиболее удовлетворительна квазидиагональная схема, так как в этом случае коэффициенты прогонки меньше единицы, что исключает возможность накопления ошибок округления.

Достаточно эффективный подход к моделированию и прогнозированию напряженно-деформированного состояния оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) предложен в работах [13, 15, 16], где отмечается, что ТВЭЛы работают в жестких условиях (испытывают большие тепловые и радиационные нагрузки). Эти условия предъявляют повышенные требования к ТВЭЛам, которые можно сформулировать так [17]:

- конструкция и материалы должны обеспечивать устойчивость формы и размеров ТВЭЛов за весь период работы их в реакторе;
- конструкция ТВЭЛа должна обеспечивать прочность всех его узлов в рабочих условиях эксплуатации;
- материалы, входящие в состав ТВЭЛа, должны быть совместимы между собой и обладать достаточно хорошей коррозионной и эрозионной стойкостью в движущемся с проектными скоростями потоке разогретого теплоносителя.

В монографии [16] указывается, что до настоящего времени напряженно-деформированное состояние ТВЭЛов быстрых реакторов на основе матричных композиций изучено значительно меньше по сравнению с ТВЭЛами на основе окислого горючего. В [16] предлагаются математические модели для определения напряженно-деформированного состояния ТВЭЛов быстрых газоохлаждаемых реакторов; с использованием которых получены расчётные данные по работоспособности твэлов быстрого реактора на диссоциирующем газе.

Укажем также работы [12,13,14,15] И. С. Куликова с сотрудниками, в которых рассматриваются: теоретическое исследование работоспособности ТВЭЛов быстрого реактора БРИГ-300, распухание цилиндрического сердечника ТВЭЛа быстрого реактора, прочностной расчёт ТВЭЛа быстрого реактора при жестком контакте топлива и оболочки. Например, в [15] исследуется напряженно-деформированное состояние оболочки, причем моделирования деформаций ползучести используется теории течения с учётом радиационной ползучести. Соотношения, учитывающие радиационную ползучесть, имеют вид:

$$\Delta_n \sigma_{11} = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\Delta_n \varepsilon_{11}^0 + \mu \Delta_n \varepsilon_{22}^0 - (1+\mu) \frac{\Delta_n S'}{3} - \mu \Delta_n \varepsilon_{22}^c - \Delta_n \varepsilon_{11}^c \right]; \quad (18)$$

$$\Delta_n \sigma_{22} = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\Delta_n \varepsilon_{22}^0 + \mu \Delta_n \varepsilon_{11}^0 - (1+\mu) \frac{\Delta_n S'}{3} - \mu \Delta_n \varepsilon_{11}^c - \Delta_n \varepsilon_{22}^c \right], \quad (19)$$

где $\Delta_n S' = S'_n - S'_{n-1}$ - приращения функции радиационного распухания оболочки, μ - коэффициент поперечной деформации; знак Δ означает приращение соответствующих величин.

К настоящему времени экспериментально установлено, что распухание сталеы зависит главным образом от спектра нейтронов в быстром реакторе, дозы облучения (флюенса нейтронов) и температуры [18 -34]. С точки зрения механики деформируемого твердого тела в условиях облучения полезно иметь аналитические зависимости для функции радиационного распухания. Для прочностных расчетов интерес представляет зависимость распухания от температуры, которая в оболочке обычно распределена неравномерно. Поэтому к термическим напряжениям, вызванным неравномерностью температурного поля, добавляются еще напряжения, обусловленные неравномерностью радиационного распухания [15].

В работах [20, 22, 26, 31] на основе обработки экспериментальных данных предложен ряд эмпирических зависимостей для моделирования кинетики набухания материалов оболочки.

В [26] набухание стали 304 предлагается описывать моделью:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = A(\Phi t)^m + B, \quad (20)$$

где A и m - параметры, зависящие от температуры; B - функция флюенса нейтронов и температуры; Φt - флюенс нейтронов ($E > 0.1$ МэВ), V - объём

В [31] предложено описывать набухание сталей 304 и 316 выражением:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = 4,9 \cdot 10^{-49} (\Phi t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{1,549 \cdot 10^4}{T} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{T^2}}, \quad (21)$$

А набухание холоднодеформированной на 20% стали 316 выражением:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = 10^{-36} (\Phi t)^{1,69} \left(e^{-\frac{3930}{T}} - 5480 e^{-\frac{12740}{T}} \right). \quad (22)$$

где T - температура, °К.

Кинетику набухания стали ОХ16Н15МЗБ предложено определять следующим выражением [20]:

$$S' = \frac{\Delta V}{V} = 5,33 \cdot 10^{-7} (\alpha kt)^{0,19+1,63 \cdot 10^{-3} T} \exp\left(0,0235T - \frac{8,35}{T-630} - \frac{17,82 \cdot 10^2}{980-T}\right), \quad (23)$$

где kt - число смещений атомов, соответствующих данному флюенсу нейтронов; α - коэффициент, зависящий от выбора модели для расчета kt .

В [22] набухание закаленной нержавеющей стали 316 моделируется выражением:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \Phi_{\max}^{1,665} t^{2,096} \exp\left(\Phi / \Phi_{\max}\right)^7 f(T), \quad (24)$$

где $f(T) = 0,04123 - 5,87 \times 10^5 (T - 417,5) + 1,742 \times 10^{-4} (T - 427)^{1,787}$, если $T > 427$.

В случае, если $T < 427$, в выражении для $f(T)$ сохраняются только два первых члена. В соотношении (24) T измеряется в °С, потока A - в 10^{-6} дефект/(атомс).

В [15] указывается, что в настоящее время пока трудно предсказывать поведение конструкционных материалов при больших дозах облучения быстрыми нейтронами ($E > 0.1$ МэВ).

Значительный объем исследований по развитию теории напряженно-деформированного состояния оболочек стержневых ТВЭЛов, определения критерия их работоспособности, а также в развитие расчёта ТВЭЛов быстрых реакторов был проделан Ю. И. Лихачёвым с сотрудниками [35 -]. Согласно работам [38, 45] в оболочках ТВЭЛов в процессе работы быстрого реактора могут возникать три типа напряжений:

- вызываемые давлением теплоносителя и давлением газов в зазоре, а также давлением набухающего топлива, находящегося в контакте с оболочкой;
- обусловленные стационарными и нестационарными температурными полями;
- от неравномерного набухания материала оболочки.

В работе [16] отмечается, что существует две модели оценки работоспособности оболочек ТВЭЛов: «газового зазора», когда топливо и оболочка в течение всей работы разделены между собой газовым зазором, и «жесткого контакта», когда оболочка и сердечник жестко связаны друг с другом с самого начала работы реактора или когда такой контакт возникает в процессе его эксплуатации. Наиболее подробный обзор работ по расчетным методам оценки работоспособности ТВЭЛов даётся в [42], где приводятся основные системы уравнений, описывающие напряженно-деформированное состояние оболочек ТВЭЛов для модели «газового зазора» и «жесткого контакта». Напряженно-деформированное состояние оболочек ТВЭЛов быстрых реакторов было рассмотрено также в [46, 47, 48, 6, 49, 36, 38-42, 50, 51, 52, 53-58].

Следует отметить, что исследования Ю. И. Лихачёва и всего научного коллектива [47, 36-43] имеют практическую направленность, что позволяет пользоваться ими для расчетов ТВЭЛов быстрых реакторов.

Большой вклад в разработку моделей твёрдого деформируемого тела в условиях облучения внесён А. А. Тутновым с сотрудниками [59-63]. В [59] рассмотрены основы теории расчетного определения напряженно-деформированного состояния и работоспособности элементов конструкций активной зоны ядерного реактора. Рассмотрены методы расчета ТВЭЛов различной геометрии, графитовых блоков, технологических труб, переходников и приведены решения задач по определению напряжений и деформаций в конструкциях, работающих в неравномерных по высоте полях температуры и излучений.

В рассматриваемых работах [59-63] отмечается важность проблемы построения математических моделей и программ для расчетного исследования термомеханического поведения элементов конструкций активных зон, поскольку испытания элементов узлов активных зон трудоёмки и требуют больших материальных затрат, а в ряде случаев даже они не дают достаточно полного представления о влиянии различных факторов на надёжность и долговечность испытываемых конструкций. А расчетные исследования термомеханического поведения конструкций дают возможность оценить долговечность различных вариантов конструкций на стадии проектирования, выбрать наиболее перспективные варианты этих конструкций для дальнейших исследований и испытаний в реакторе, определить допустимые границы изменения эксплуатационных параметров активных зон и тем самым сократить время их проектирования и отработки.

Задача определения напряженно-деформированного состояния и долговечности реакторных конструкций осложняется необходимостью учета и длительного воздействия изменяющихся во времени силовых нагрузок, и изменяющихся полей и температуры, и излучений, а также влиянием коррозионной среды. Поэтому разумно в зависимости от поставленных задач создавать как инженерные (технические), так и уточненные (исследовательские) методики расчета на прочность элементов активных зон, используя при этом различные по сложности математические модели облучаемых материалов.

Согласно [59] приращения объёмных деформаций $d\varepsilon_{kk}^o$, линейных деформаций $d\varepsilon_{ij}^o$, а также девиаторов e_{ij}^o вследствие температурного расширения и радиационного распухания (усадки) можно представить в виде:

для изотропного (1) и анизотропного (2) материала

$$\left. \begin{aligned}
 &(1) \\
 &d\varepsilon_{kk}^o = 3\alpha(t, q^\alpha)dt + \dot{\chi}(t, q^\chi, \dot{q}^\chi, \chi, \tau, \sigma_{kk}, \dots)dt; \\
 &d\varepsilon_{ij}^o = \frac{1}{3}d\varepsilon_{kk}^o \delta_{ij}; \\
 &d\varepsilon_{ij}^o = 0; \\
 &(2) \\
 &d\varepsilon_{kk}^o = \sum_1^3 \alpha_i(t, q^\alpha)dt + \dot{\chi}d\tau; \\
 &d\varepsilon_{ij}^o = \left[\alpha_i(t, q^\alpha)dt + \alpha_{i\chi}^\chi d\tau \right] \delta_{ij} \\
 &d\varepsilon_{ij}^o = \left[\alpha_i(t, q^\alpha)dt - \frac{1}{3} \left(\sum_1^3 \alpha_i(t, q^\alpha)dt \right) + \left(\alpha_{i\chi}^\chi - \frac{1}{3} \right) \dot{\chi}d\tau \right] \delta_{ij}
 \end{aligned} \right\}, \quad (25)$$

причём $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 3\alpha_{cp}$; $\alpha_1^\chi + \alpha_2^\chi + \alpha_3^\chi = 1$,

Здесь α , α_i - дифференциальные коэффициенты температурного расширения для изотропного и анизотропного материалов; α_i^χ - коэффициенты анизотропии распухания; χ - радиационное распухание; t - текущая температура; q^α и q^χ - параметры, характеризующие влияние нейтронного излучения на α и χ ; σ_{kk} - гидростатическая составляющая тензора напряжений; τ - время.

При этом приращения деформаций за счет радиационного роста задаются экспериментально определяемыми функциями вида

$$d\varepsilon_{ij}^l = de_{ij}^l = \alpha_{ij}^l f^l(t, q^l) dq^l \delta_{ij}, \quad (26)$$

причём $\alpha_{11}^l + \alpha_{22}^l + \alpha_{33}^l = 0$ где $\alpha_{ij}^l(t, q^l)$ - коэффициенты анизотропии радиационного роста; q^l - параметр, характеризующий влияние облучения на скорость радиационного роста.

В качестве параметров q^l , q^α и q^χ обычно используется флюенс нейтронов в заданном интервале энергий. По мере накопления экспериментальных данных по изменению α и χ под действием излучения в различных реакторах можно будет переходить к уточненным зависимостям α и χ от параметров излучения:

$$\left. \begin{aligned}
 &\alpha = \alpha(t, \eta); \\
 &\dot{\chi} = \dot{\chi}(t, \eta, \dot{\eta}, \chi, \tau, \sigma_{kk}, \dots),
 \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

где $\eta = \sum_{q_i} \int_0^T K_i(t, \frac{\partial \dot{q}_i}{\partial E}) \dot{q}_i dt$ - доза радиационных повреждений, ответственных за изменение α ; K_i - передаточная функция, характеризующая влияние потока нейтронов i -го

интервала энергии при заданной температуре на интенсивность накопления радиационных повреждений.

Наиболее полное изложение методов расчета на прочность ТВЭЛов простой геометрии дано в работе [64].

Приращения упругих деформаций в силу однозначной их связи с напряжениями можно записать в виде [63]:

$$d\varepsilon_{ij}^E = \frac{1}{E} \left[d\sigma_{ij} - \nu (\delta_{ij} d\sigma_{kk} - d\sigma_{ij}) \right] - \frac{1}{E} (\delta_{ij} \sigma_{kk} - \sigma_{ij}) \left(\frac{\partial \nu}{\partial t} dt + \frac{\partial \nu}{\partial t^E} dq^E \right) - \frac{1}{E^2} \left[\sigma_{ij} - \nu (\delta_{ij} d\sigma_{kk} - \sigma_{ij}) \right] \left(\frac{\partial E}{\partial t} dt + \frac{\partial E}{\partial q^E} dq^E \right); \quad (28)$$

$$de_{ij}^E = \frac{1}{2\mu} dS_{ij} - \frac{S_{ij}}{2\mu^2} \left(\frac{\partial \mu}{\partial t} dt + \frac{\partial \mu}{\partial q^E} dq^E \right); \quad (29)$$

$$d\varepsilon_{kk}^E = \frac{1}{K_y} d\sigma_{kk} - \frac{\sigma_{kk}}{K_y^2} \left(\frac{\partial K_y}{\partial t} dt + \frac{\partial K_y}{\partial q^E} dq^E \right). \quad (30)$$

Связь между напряжениями и упругими деформациями для анизотропного материала записывается в виде:

$$\varepsilon_{ij}^E = \sum_{k,l} \alpha_{ijkl}^E \sigma_{kl}, \quad (31)$$

где α_{ijkl}^E - упругие константы.

По предположению А. А. Тутнова интенсивность деформаций может быть связана с интенсивностью напряжений, температурой и параметрами, характеризующими радиационные повреждения в материале некоторой функциональной зависимостью:

$$\varepsilon_i^P = \Phi(\sigma_i, t, q_1^P, q_2^P, \dots), \quad (32)$$

Причем обычно используется следующий вид функции Φ :

$$\Phi = \Omega(t, q_1^P, q_2^P, \dots) \sigma_i^m. \quad (33)$$

В таком виде деформационная теория пластичности мало пригодна для расчетов реакторных конструкций, так как в силу изменения механических характеристик пластичности и ползучести по мере облучения возможны многократные переходы материала из упругого состояния в пластическое и обратно. Кроме того, такая теория совершенно не учитывает истории нагружения материала. В связи с этим эффективнее использовать дифференциальный вариант деформационной теории пластичности, когда зависимость (32) заменяется следующей:

$$\varepsilon_i^P = \int d\varepsilon_i^P. \quad (34)$$

В монографии [59] приводятся как инженерные, так и уточненные методики расчета напряжений и деформаций в элементах конструкций ядерных реакторов, подверженных интенсивному нейтронному излучению. Статья [63] посвящена расчётному моделированию распухания топливных материалов по модели квазистатических пор. В ней для определения напряжённо-деформированного состояния ТВЭЛа используется формула скорости распухания χ , полученная дифференцированием по времени τ эмпирических зависимостей

при фиксированных значениях p_0 и t . Наиболее полно вопросы изменения механических свойств конструкционных материалов с учётом радиационных эффектов рассмотрен в уже упоминавшихся работах [60,62, 63].

Вопросы конечно-элементного расчета корпусов ядерных реакторов на хрупкую прочность рассматривались Морозовым Е. М. и Никишковым Г. П. [65].

В статье[66] рассматривалась задача оценки работоспособности тепловыделяющих сборок (ТВС) быстрых реакторов. При этом отмечалось, что основными конструкционными элементами ТВС являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) и чехловые трубы, а одной из главных проблем разработки быстрых энергетических реакторов с глубоким выгоранием топлива является обеспечение надежной работы тепловыделяющих сборок. Тепловыделяющие сборки быстрых реакторов при эксплуатации находятся в очень жестких условиях: высокий уровень рабочих температур и облучения, длительное воздействие изменяющихся нагрузок, коррозионно-эрозионное воздействие среды теплоносителя. Эти условия в основном и определяют требования к материалам и к конструкциям ТВС, которые должны обеспечивать надежную работу внутри реактора.

В [66] рассматриваются и вопросы, связанные с расчетным определением работоспособности чехлов ТВС в стационарных и аварийных режимах работы реактора и особенности поведения активной зоны в целом с учетом механического взаимодействия между ТВС. На основании предложенных методов дается анализ напряженно-деформированного состояния и работоспособности чехлов реакторов типа БН-600 и "Супер-Феникс". Причем рассматриваются статистические методы оценки работоспособности и интерпретации экспериментальных данных по формоизменению ТВС, учитывающие случайный разброс в свойствах материалов и условиях работы ТВС и приводятся результаты статистической обработки экспериментальных данных по формоизменению ТВС реактора БН-350 и полученные на их основании зависимости радиационной ползучести и распухания материала чехлов ТВС.

На основании экспериментальных данных установлены основные закономерности радиационной ползучести и показано, что установившаяся скорость радиационной ползучести $\dot{\epsilon}$ является линейной функцией напряжений σ в материале и скорости радиационных повреждений k , то есть имеет вид:

$$\dot{\epsilon} = B(T, kt)k\sigma, \quad (35)$$

где $B(T, kt)$ - модуль ползучести, зависящий от температуры T и уровня радиационных повреждений kt , рассчитываемого в зависимости от спектра нейтронов.

Также в [66] отмечена корреляция между радиационной ползучестью и радиационным распуханием стали, что свидетельствует о влиянии дозы облучения и температуры на радиационное распухание. Предположение о подобной взаимосвязи впервые было выдвинуто в 1973г. Дж. Фостером на основании исследований оболочек ТВЭЛов [67] и газонаполненных трубок из стали AISI 304 SS [68]. Им была предложена эмпирическая зависимость для деформаций радиационной ползучести в виде:

$$\epsilon / \sigma = Bkt + D\epsilon_s(T, kt), \quad (36)$$

где $\epsilon_s(T, kt)$ - распухание стали; B и D - эмпирические коэффициенты.

В [69] отмечалось, что многочисленные результаты внутриреакторных испытаний, а также имитационные эксперименты на ускорителях показали линейную зависимость радиационной ползучести от напряжений в широком интервале температур вплоть до напряжений, равных пределу текучести материала σ_T . . При напряжениях, приближающихся

к пределу текучести, проявляется, как правило, нелинейный характер зависимости скорости деформаций от напряжений, а так как предел текучести материала является функцией температуры и дозы облучения, то этот эффект может проявляться при различных напряжениях в зависимости от условий работы материала.

Объемное изменение сталей аустенитного класса (радиационное распухание) описывается [69] зависимостью вида:

$$\Delta V / V = A(kt)^{n(T)} f(T), \quad (37)$$

где $f(T)$ и $n(T)$ - функции температуры, kt - уровень радиационных повреждений (или флюенс нейтронов).

Для описания возможного «инкубационного» периода (предусматриваемого теорией), после которого распухание резко меняется с дозой, предложены зависимости вида:

$$\Delta V / V = R(T) [F - \tau(T) \ln(F / \tau(T))];$$

$$\Delta V / V = R(T) \{ F - \tau(T) [1 - \exp(-F / \tau(T))] \}, \quad (38)$$

где $R(T), \tau(T)$ - экспериментальные функции. Функция $\tau(T)$ является «инкубационной» дозой.

Распухание как функция температуры обычно выражается через набор экспоненциальных множителей вида $\exp[-(A/RT^n)]$, описывающих некоторую колоколообразную кривую, на примере стали 316, с различной степенью холодной деформации [70]. Иногда для описания температурной зависимости радиационного распухания использовались полиномы вида $1 + AT + BT^2 + CT^3$ или степенные зависимости вида $\exp(A/T + B/T^2)$.

Вопросам работоспособности ТВЭЛов, их расчёту и анализу поведения различных элементов конструкций энергетических реакторов посвящен ряд зарубежных [71, 72, 73, 55, 74, 75 -78, 79, 80] и рассмотренных выше отечественных публикаций, достаточно полно освещающих особенности рассматриваемой проблемы.

В США разработана трехмерная модель, использующая метод конечного элемента [81], позволяющая моделировать термическую и радиационную ползучесть, распухание стали и все условия нагружения, связанные со взаимодействием контактирующих сборок, а также зазоры между ТВС и силы трения. Для расчета используются фиктивные конечные элементы для зазоров и балочные трехмерные элементы для моделирования сборки

Большой вклад в исследование и развитие моделей деформирования и разрушения облучаемых сталей внесли Г. С. Писаренко [82-92] и В. Н. Киселевский [93-101] с сотрудниками.

В работах Г. С. Писаренко и В. Н. Киселевского, указывается, что условия эксплуатации наиболее ответственных элементов активных зон реакторов, в частности тепловыделяющих сборок таковы, что, как правило, в процессе выгорания топлива изменяется абсолютный уровень действующих в них напряжений при сохранении вида напряженного состояния. Плавное перераспределение напряжений не вызывает существенного поворота главных осей. В этих же работах отмечалось, что в таких условиях учет анизотропии упрочнения сталей при переходе к пространственной системе не вносит заметных уточнений по сравнению с теорией изотропного, упрочнения, и, исходя из простоты и удобства, для получения технических решений достаточно использовать уравнение состояния (феноменологическую модель) изотропного тела.

В [92] отмечалось, что при расчетах элементов активных зон ядерных реакторов следует стремиться к максимальному использованию резервов материалов по их способности сопротивляться внешним нагрузкам, поскольку неоправданно завышенный объем неделящихся материалов, помещённых в активную зону, существенно снижает нейтронно-физические характеристики реакторов. Это обстоятельство требует разработки таких уравнений, которые могли бы достаточно надежно прогнозировать кинетику деформирования сталей при ползучести не только на участках начального и стационарного течения, но и на стадии, предшествующей разрушению, поскольку продолжительность ее иногда достигает 30—40% общего времени до разрушения и за этот период может быть и исчерпано до 50% и более общего ресурса пластичности сталей и сплавов.

Как следует из результатов экспериментальных исследований [83,93], нейтронное облучение, существенным образом воздействуя на структуру материала, изменяет кинетику его деформирования. Поэтому, если ползучесть происходила под облучением, то для полноты системы определяющих параметров в нее вводился параметр ζ , учитывающий влияние облучения на структуру материала; причем в общем случае он должен интегрально учитывать интенсивность облучения, его энергетический спектр и накопленную дозу облучения.

Уравнение состояния в общем виде записывалось следующим образом:

$$\dot{p} = \Phi(\sigma, T, p, \omega, \zeta), \quad (39)$$

где \dot{p} – скорость ползучести, T – температура, σ – напряжение, p – деформация ползучести, ω – параметр поврежденности.

Согласно [96] изменение кинетики деформирования материала происходит вследствие увеличения его поврежденности ω под воздействием облучения, изменение поврежденности можно представить следующим уравнением:

$$d\omega = q_1 d\sigma + q_2 dT + q_3 d\zeta + q_4 dt, \quad (40)$$

в котором q_1, q_2, q_3, q_4 зависят от σ, T, ω, ζ . В том случае, если напряжение σ температура T и параметр ζ сохраняют постоянное значение, уравнение (40) принимает вид [96]:

$$d\omega = q_4(\sigma, T, \omega, \zeta) dt. \quad (41)$$

Время до разрушения t_{**} при $\omega=1$ определялось из выражения:

$$t_{**} = \frac{1}{(m+l+1)C} \sigma^{-m} \quad (42)$$

Предполагалось, что зависимость скорости ползучести p от деформации ползучести такая же, как и для обычных условий без облучения, а зависимость p от $\sigma_* = \frac{\sigma}{1-\omega}$ при облучении изменяется, хотя и остаётся степенной.

Тогда, согласно выражению (39) имеем:

$$\dot{p} = D p^{-\alpha} \exp(\beta p) \left(\frac{\sigma}{1-\omega} \right)^\eta, \quad (43)$$

где D и η зависят от температуры T и параметра ζ , учитывающего характер облучения.

Уравнение представляющее собой зависимость деформации ползучести от времени $p_{\zeta} = f(t)$ с учётом фактора облучения имеет следующий вид:

$$\int_0^p p^{\alpha} \exp(-\beta p) dp = \frac{D\sigma^{\eta-m}}{C(m+l-\eta+1)} \left\{ 1 - \left[1 - (m+l+1)C\sigma^m t \right]^{1-\frac{\eta}{m+l+1}} \right\}, \quad (44)$$

При этом интеграл в левой части уравнения (44) $I(p, \alpha, \beta)$ находился численно. Если деформация ползучести к моменту разрушения мало зависела от уровня напряжений, то предполагалось $\eta = m$.

Согласно [96] при облучении рост повреждённости происходит интенсивнее, чем в обычных условиях, т. е. в каждый момент времени $\omega_{\zeta} > \omega$. Поэтому эффективное напряжение σ_{**} , определяющее процесс ползучести под облучением, представлялось в виде алгебраической суммы двух напряжений:

$$\sigma_{**} = \sigma_* + \Delta\sigma_{*\zeta} = \frac{\sigma + \Delta\sigma_{\zeta}}{1 - \omega}, \quad (45)$$

где $\Delta\sigma_{*\zeta} = f(\sigma, T, \zeta)$.

Окончательное уравнение, описывающее ползучесть при интенсивном облучении [96] имеет вид:

$$I(p, \alpha, \beta) = \frac{A}{2B} \left\{ 1 - \left[1 - (m+2)B(\sigma + \Delta\sigma_{\zeta})^n t \right]^{\frac{2}{n+2}} \right\}, \quad (46)$$

разрешающая функция которого $p_{\zeta}(t)$ представляет собой зависимость деформации ползучести при облучении от времени. В этом уравнении α, β, A, B, n – коэффициенты определяемые экспериментально. В этом случае экспериментальному определению подлежит и величина добавки напряжения $\Delta\sigma_{\zeta}$, действие которой эквивалентно влиянию облучения.

Следует иметь ввиду, что при любом подходе к описанию воздействия облучения на ползучесть для установления зависимостей коэффициентов уравнений от параметра облучения ζ в явном виде, а также для определения зависимости коэффициентов от температуры необходимо использовать экспериментальные данные, полученные при различных значениях ζ и T .

Исследования показали, что в обычных условиях ползучесть стали ОХ16Н15МЗБ на начальных участках в первом приближении описывается уравнением, соответствующим гипотезе упрочнения. Дифференциальное уравнение ползучести облучаемой стали в форме, соответствующей гипотезе упрочнения [102], с учётом замены в нем действующего напряжения суммой $\sigma_t + \sigma_t^{irr}$ принималось в виде:

$$\dot{p}^{\alpha} = B \left[\sigma_t + c\sigma_t^{-s} (\Phi_t t)^r \right]^k. \quad (47)$$

Интеграл этого уравнения при $\sigma = const$ имеет вид:

$$p = A \left\{ \int_0^t \left[\sigma_t + c\sigma_t^{-s} (\Phi_t t)^r \right]^k dt \right\}^{\frac{1}{1+\alpha}}. \quad (48)$$

По данным работы [102], в случае, если напряжение в некоторый момент времени $t = \tau > 0$ скачкообразно принимает новое значение σ_t и затем остаётся постоянным, то (48)

упрощается и деформация ползучести после изменения напряжения определялось выражением

$$p = p_{\tau} + A \left[\sigma_t + c \sigma_t^{-s} \varphi_{\tau}^r \right]^n t^m \quad (49)$$

где p_{τ}, φ_{τ} — соответственно деформация ползучести и интегральный поток в момент изменения напряжения.

Значительный вклад в развитие теории расчета радиационных напряжений, которые возникают в бетонных и железобетонных конструкциях вследствие облучения потоками нейтронов, внесён В. Б. Дубровским [103 - 105] и З. Аблевичем. Как отмечается в [105], причина возникновения радиационных напряжений в строительных конструкциях, находящихся под воздействием ионизирующих излучений, - радиационные деформации, развивающиеся в материале [106, 107] в результате облучения и зависящие от флюенса нейтронов. Расчет радиационных напряжений осложняется тем, что под воздействием потока нейтронов изменяются механические свойства материалов (деформативность, теплопроводность, температурная деформативность и др). Накопление радиационных дефектов приводит к глубокому изменению структуры материала и возникновению радиационных деформаций, развитие которых зависит от флюенса нейтронов и усиливается с его ростом.

В [105] указывается на то, что при проектировании ядерных установок флюенсы нейтронов ограничивают такими значениями, при которых не возникает радиационных деформаций материала в конструкциях. Это обусловлено отсутствием методов расчета напряжений, вызываемых радиационными деформациями, и ведет к удорожанию сооружений в целом. По данным [105], возможна эксплуатация строительных конструкций ядерных установок после воздействия на них больших флюенсов нейтронов, что может дать значительный экономический эффект. Для этого необходимо достаточно точно рассчитать радиационные напряжения, возникающие в конструкциях с учетом неравномерного распределения радиационных деформаций по объему конструкции и изменения деформативности материала в зависимости от флюенса нейтронов.

Представляется также интересным сравнить значения возникающих радиационных напряжений при выполнении конструкций ядерных установок с использованием различных расчетных схем. По данным той же работы, конструкция "сухой защиты" водо-водяного реактора может быть выполнена как в виде толстостенного свободно опертого цилиндра, так и системы вертикально стоящих балок на двух шарнирных опорах. Существенный интерес представляет собой расчет толстых пластин, свободно опертых по краям, которыми, как правило, служат верхние защиты тепловых реакторов. Наибольшую сложность представляет собой расчет железобетонного корпуса реактора, который может иметь цилиндрическую и сферическую формы.

В. Б. Дубровским и З. Аблевичем расчет конструкции производился по формулам теории упругости для чего необходимо знать распределение радиационных деформаций и изменение модуля упругости, материала по объему облучаемой конструкции. В их работе приводятся следующие расчётные модели.

Ослабление флюенса нейтронов при прохождении через слой материала конструкции [108] записывалось в виде:

$$\Phi_x = \Phi_0 e^{-\lambda x}, \quad (50)$$

где Φ_0 - величина начального флюенса нейтронов (нейтрон/см²);

Φ_x - величина флюенса нейтронов за слоем материала толщиной x (см);

x – толщина слоя материала, пройденного нейтронами, см;

λ - длина релаксации нейтронов (длина свободного пробега нейтронов между двумя столкновениями с атомами материала), см.

Эмпирическая зависимость, описывающая изменение радиационных деформаций от флюенса нейтронов имеет вид [106]:

$$\varepsilon_\phi = 0,01\alpha D_{\max} \left[e^{(\beta\Phi_x)} - 1 \right] / \left[D_{\max} + \alpha e^{(\beta\Phi_x)} \right], \quad (51)$$

где ε_ϕ - величина радиационных деформаций (в %); D_{\max} - максимальное значение радиационных деформаций для бетона данного состава, %; α, β - коэффициенты, зависящие от энергетического спектра нейтронов и гранулометрического состава заполнителя.

Вместо зависимости (51) иногда использовалось следующая:

$$\varepsilon_\phi = \frac{2}{\pi} D_{\max} \operatorname{arctg} \left(m\Phi_x^n \right), \quad (52)$$

где m, n – коэффициенты, зависящие от энергетического спектра нейтронов и гранулометрического состава заполнителя.

Эмпирическая зависимость модуля упругости бетона от флюенса нейтронов может быть представлена в виде [106]:

$$E_\phi = 0,01E_0(-\rho \lg b\Phi_x + C), \quad (53)$$

где E_ϕ - величина модуля упругости бетона после облучения флюенсом нейтронов Φ_x ; E_0 - начальное значение модуля упругости; ρ, b - коэффициенты, зависящие от энергетического спектра нейтронов и гранулометрического состава заполнителя.

В [106] отмечалось, что при определении радиационных деформаций и изменении модуля упругости по толщине конструкции необходимо учитывать кривизну конструкции и распределение флюенса нейтронов по облучаемой поверхности. В работе также приводятся несколько примеров по расчёту радиационных напряжений. Например, рассматривалась балка на двух опорах с равномерно распределённым по длине флюенсом нейтронов. Модуль упругости изменялся в зависимости от флюенса нейтронов. Было получено разрешающее дифференциальное уравнение, имеющее вид:

$$A\nabla^2\nabla^2\varphi + \nabla^2 \left[-B_0 \frac{\partial^3\varphi}{\partial y^3} + B_1 \frac{\partial^3\varphi}{\partial x^2\partial y} + B_2 \frac{\partial^3\varphi}{\partial x^3} + B_3 \frac{\partial^3\varphi}{\partial x\partial y^2} \right] + A^3 \cdot \left[C_0 \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} - C_1 \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + B_5 \frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y} \right] + \rho g y A^3 C_1 = -\frac{\partial^2\varepsilon_\phi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2\varepsilon_\phi}{\partial x^2}, \quad (54)$$

где $A = \frac{1}{E_\phi}$; $B_0 = 2K$; $B_1 = 2\mu K + \frac{2\rho(1+\mu)}{\ln} \cdot \frac{1}{x}$; $B_2 = \frac{2\rho}{\ln 10} \cdot \frac{1}{x}$; $B_3 = \frac{\rho(3\mu+2)}{\ln 10} \cdot \frac{1}{x}$;

$B_4 = \frac{2\rho}{\ln 10} - E_\phi$; $B_5 = \frac{2\rho(1+\mu)}{\ln 10} \cdot \frac{1}{x^2} B_4$; $C_0 = B_0 - \frac{\mu\rho}{\ln 10} \cdot \frac{1}{x^2} B_4$; $C_1 = B_0 - \frac{\rho(1-\mu)}{\ln 10} \cdot \frac{1}{x^2} B_4$.

Как утверждается в [106], решая уравнение (54) с помощью метода конечных разностей, можно получить практически любую точность для значений напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$.

В монографии В. И. Андреева [109] более подробно рассматривались подходы к расчёту напряжённо-деформированного состояния, которое возникает в бетонных конструкциях вследствие облучения потоками нейтронов. Эти подходы являются развитием работ В. Б. Дубровского. В [109] приводится решение квазистационарной осесимметричной задачи о радиационных напряжениях в толстостенном бетонном цилиндре, когда на его внутренней поверхности задан интегральный поток нейтронов (флюенс) равный Φ_0 . Задача решается в плоской постановке (плоское деформированное состояние) с учетом изменения модуля упругости материала в процессе облучения.

Как отмечается в [110], при радиационном воздействии на конструкцию для построения функций неоднородности, т. е. зависимостей механических характеристик материала от координат, необходимо решить задачу о распределении флюенса нейтронов в конструкции. Для решения этой задачи в работе приемлемым может быть диффузионное приближение. В предположении, что в теле нет генерации нейтронов (т. е. отсутствуют ядерные реакции), соответствующее дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\nabla^2 \Phi - \frac{\Phi}{L} = 0, \quad (55)$$

где L – длина диффузии, зависящая от энергии нейтронов.

Определённый вклад в развитие расчёта напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, подвергающихся воздействию радиационного облучения внесён И. Г. Овчинниковым и В. В. Петровым [111].

В работе [111] на основе проведённого анализа экспериментальных данных отмечается, что радиационное облучение приводит к интенсификации процессов деформирования и разрушения. Причем ускорение этих процессов зависит от уровня напряжений, температуры, характеристик радиационного облучения.

Рассматривается феноменологическая модель деформирования и разрушения облучаемого материала, при построении которой используется теория структурных параметров Ю. И. Работнова, причем в качестве определяющих параметров принимается напряжение, деформация, температура, а также параметр поврежденности Π интегрально отражающий процесс развития разрушения, характеризующийся образованием пор, трещин и других несовершенств, ослабляющих силы сцепления в материале. Так как деформирование и разрушение происходит под облучением, и для полноты системы определяющих параметров, согласно вводится в нее некоторый параметр Φ , интегрально учитывающий влияние интенсивности облучения, энергетического спектра и дозы облучения на структуру материала.

Процесс разрушения описывается кинетическим уравнением:

$$d\Pi = a \left(\frac{\sigma_s}{1-\Pi} \right)^a dt + m \left(\frac{\sigma_s}{1-\Pi} \right)^b d\sigma_s + \alpha e^{\beta\sigma_s} \left(\frac{T-T_0}{1-\Pi} \right)^\gamma dT + \lambda \sigma_s^\mu (1+k \exp(-g\Phi)) d\Phi, \quad (56)$$

где t – время, σ_s – эквивалентное напряжение, T – температура, T_0 – базовая температура, $a, b, m, \alpha, \beta, \gamma, \lambda, \mu, k, g$ – параметры. Первый член в этом уравнении описывает повреждаемость при неизменных σ_s , T , Φ и предсказывает разрушение через некоторое время. Второй член описывает мгновенную повреждаемость, вызванную приложенным напряжением и мгновенное разрушение при некотором конечном напряжении σ_p . Остальные члены характеризуют влияние изменения интенсивности облучения и температуры на накопление повреждений.

В качестве модели материала в [111] принимается вязкоупругая среда наследственного типа, уравнение состояния которой представлено в виде:

$$\frac{S_{ij}(t)}{2G_0} = \mathcal{E}_{ij}(t) \cdot \varphi(\Pi) - \varphi(\Pi) \int_0^R R(t-\tau) \mathcal{E}_{ij}(\tau) d\tau, \quad (57)$$
$$\sigma_0 = K\theta$$

где $\mathcal{E}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{\theta}{3} \delta_{ij}$ - девиаторы тензора напряжений и деформаций, $R(t-\tau)$

экспериментально определяемая функция, характеризующая реологические свойства материала, K - объемный модуль, G_0 - мгновенный модуль сдвига, $\varphi(\Pi)$ - универсальная функция параметра поврежденности Π . Так как напряжение $\sigma_3(T)$ входит в выражение для $\Pi(t)$ то уравнения (57) описывают поведение физически нелинейной среды.

В качестве функции $\varphi(\Pi)$ а принимается выражение:

$$\varphi(\Pi) = \left((\Pi_p - \Pi) / \Pi_p \right)^n. \quad (58)$$

В [111] указывается, что эту зависимость следует рассматривать не как физическую закономерность, а как удобную для расчетов аппроксимацию. Функции $\varphi(\Pi)$ виде (58) позволяет отразить тот факт, что увеличение параметра поврежденности Π приводит в соответствии с (57) к увеличению деформаций в материале, что соответствует опытным данным. Авторами [111] приводится упрощенный вариант кинетического уравнения (56):

$$d\Pi = a \left(\frac{\sigma_3}{1-\Pi} \right)^6 dt + m \left(\frac{\sigma_3}{1-\Pi} \right)^6 d\sigma_3. \quad (59)$$

В статье [112] для толстостенной сферической оболочки защитного корпуса ядерного реактора из тяжелого армоцемента строится аналитическое решение задачи об определении напряжений при полярно- симметричном радиационном воздействии. Сжатая зона представлена трансверсально изотропным материалом, а в растянутой зоне учитывается только работа арматуры.

В статье [113], являющейся в определенной мере развитием работы [114] справедливо отмечается, что наиболее сильное влияние нейтронного облучения сказывается на пределах прочности и пластичности, других характеристиках пластичности, формоизменении вследствие радиационного распухания и характеристиках ползучести. Поэтому анализ кинетики изменения напряженно-деформированного состояния конструкций, подвергающихся терморadiационному воздействию, является сложной проблемой, требующей решения ряда взаимосвязанных задач:

- определение зависимостей, характеризующих влияние нейтронного облучения на механические характеристики материалов;
- построение математических моделей, описывающих деформирование материалов с учетом эффектов, вызываемых нейтронным облучением;
- разработку методик, алгоритмов и программ и использование их для исследования поведения конструкций с использованием построенных, идентифицированных и верифицированных моделей.

В рассматриваемой статье рассмотрен ряд экспериментальных зависимостей и основных положений математических моделей, описывающих процесс деформирования

нержавеющих сталей с учетом совместного действия высоких температур и нейтронного облучения, также рассмотрены основные методические положения, заложенные в программу расчетного анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, работающих в указанных выше условиях. Справедливо утверждается, что математические модели представляют собой сложные нелинейные системы интегро-дифференциальных разрешающих уравнений, для решения которых обычно используется инкрементальный подход, опирающийся на шаговую методику решения для движения по необходимым траекториям нагружения. Пространственная часть задачи решается с использованием метода конечных элементов с различными тапами конечных элементов (как двумерных, так и пространственных). С использованием описанных выше положений и методик был разработан программный комплекс [115] для численного моделирования поведения конструкций в условиях температурно-радиационных воздействий.

Верификация построенных моделей проводилась сравнением решений ряда тестовых задач с аналитическими решениями и результатами некоторых экспериментов. В заключении говорится, что разработанная методика расчета и программный комплекс предназначены для расчета конструкций из стали X18H9, работающих в условиях высоких температур и флюенсов быстрых нейтронов со сложным пространственным распределением.

В работах [116 - 123] установлено, что нейтронное облучение, кроме всего прочего, приводит к увеличению скорости ползучести, снижению длительной прочности и пластичности материала. На основании анализа экспериментальных данных предложена модель межзеренного разрушения аустенитных сталей, учитывающая влияние нейтронного облучения на длительную прочность и пластичность. Разработаны методики идентификации построенных моделей и на сталях X18H10T и X18H9 проведена их верификация. Также разработана методика прогнозирования циклической прочности аустенитных сталей при различных температурах, учитывающая влияние и скорости деформирования и нейтронного облучения и проведена ее верификация. Разработанные подходы применимы для прогнозирования кинетики развития трещин во времени при различных интенсивностях потока нейтронов и с учетом накопленного флюенса.

В работах [124 – 127] был разработан программный комплекс по расчету напряженно-деформированного состояния элементов графитовой кладки, учитывающий и анизотропию, и радиационный рост, и усадку и распухание, и радиационную ползучесть, и возможное растрескивание графита.

Разработана методика расчета растрескивания оболочечных конструкций твэлов, технологических каналов, трубопроводов, коллекторов парогенераторов с учетом влияния на рост трещин коррозии под напряжением, электрохимической коррозии, наводороживания, накопления квазистатических деформационных повреждений. Причем степень опасности напряженно-деформированного состояния с точки зрения возможности растрескивания определялась с помощью функции повреждений, отражающей как степень накопления в материале субмикротрещин деформационного и усталостного характера, так и физико-химические процессы, протекающие в устье трещины (коррозия, наводороживание, адсорбция, радиационное изменение объема включений инородной фазы). Была разработана методика расчета кинетики роста трещин в трубопроводах по механизму водородного охрупчивания.

В статье [128] рассматриваются вопросы влияния радиационного облучения на напряженное состояние сферической бетонной оболочки; приводится решение квазистационарной центральносимметричной задачи о радиационных напряжениях в толстостенной бетонной сферической оболочке, когда на ее внутренней поверхности задан

интегральный поток нейтронов(флюенс); задача решается с учетом изменения модуля упругости и вынужденных (радиационных) деформаций материала в процессе облучения, причем эффекты ползучести не рассматриваются.

Большая работа по разработке методических и программных средств исследования поведения элементов несущих конструкций ядерных энергетических установок проводится в ЦНИИ КМ «Прометей». В докладе «Обеспечение радиационной прочности корпусов и внутрикорпусных устройств атомных реакторов АЭС с ВВЭР» заместителя генерального директора д. т. н. , профессора Карзова Г. П. вводится понятие «радиационная прочность», под которой понимается «способность материала конструкции противостоять возникновению и развитию разрушения в процессе эксплуатации в условиях воздействия на материал радиационного облучения». Отмечается, что обеспечение радиационной прочности достигается путем создания системы противодействия возникновению и развитию разрушения на всех этапах жизни конструкции: проектирование, изготовление, эксплуатация. Причем основной характеристикой радиационной прочности является срок безопасной эксплуатации конструкции.

С научной точки зрения система обеспечения радиационной прочности - безопасного срока службы включает следующие виды исследований:

- изучение физики радиационных повреждений металлов;
- изучение механизмов и разработка моделей разрушения металлов;
- создание расчетных методик определения срока безопасной эксплуатации;
- расчетное определение срока безопасной эксплуатации при проектировании и в процессе эксплуатации.

Автором справедливо отмечается, что расчетный срок безопасной эксплуатации является единственной, хотя и косвенной оценкой, так как фактический срок безопасной эксплуатации не определяется прямыми экспериментами. Затем указываются причины, по которым необходимо большое внимание уделять прочности внутрикорпусных устройств реакторов, к которым относятся - сильное нейтронное облучение приводит к возникновению значительных напряжений из-за градиента распухания; недопустимым изменениям формы и размеров элементов; снижению трещиностойкости более чем в 10 раз; снижению сопротивлению усталостному разрушению и коррозионному растрескиванию. Отмечаются методические задачи, решение которых необходимо при создании методики расчета прочности внутрикорпусных (вку):

- расчет напряженно-деформированного состояния элементов ВКУ при термомеханическом нагружении с учетом нейтронного облучения;
- формулировка предельного состояния элемента ВКУ по критерию нестабильного развития трещины с учетом фазового превращения;
- разработка методологии расчета повреждений по механизмам коррозионного растрескивания при длительном статическом нагружении и усталости при циклическом нагружении.

В завершение автор формулирует в качестве одного из основных направлений исследовательских работ - совершенствование методов расчетного анализа повреждения конструкционных материалов в условиях работы атомных реакторов различного назначения и создание методов расчетного обеспечения их безопасного срока эксплуатации.

Выводы:

1. В приведенном обзоре рассмотрены возможные постановки и решения задач расчета кратковременной и длительной прочности различных конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации совместному действию нагрузки, температурному и радиационному воздействию.
2. Показано, что к настоящему времени существует определенное количество математических моделей, позволяющих достаточно корректно, в рамках сделанных допущений, описать основные эффекты, к которым приводит влияние облучения на конструкционные стали и элементы конструкций из них. Для этих моделей разработаны методики идентификации, в ряде случаев проведена их верификация с использованием имеющихся экспериментальных данных.
3. Отмечается, что расчет конструкций с учетом эффектов радиационного воздействия приводит к необходимости решать сложные нелинейные интегро-дифференциальные уравнения, поэтому основными методами их решения являются численные методы.
4. Для решения нелинейной и временной частей задачи расчета конструкций с учетом эффектов радиационного воздействия в основном применяются шаговые алгоритмы, сводящие решение сложной нелинейной задачи к решению последовательности линеаризованных задач относительно приращений анализируемых параметров. Для решения краевой части задачи применяются либо метод сеток, либо вариационно-разностные методы, но наиболее часто – метод конечных элементов в различных вариантах.
5. Наконец, следует отметить, что проблема расчетного моделирования поведения конструкций с учетом совместного действия нагрузок, температур и радиационных воздействий еще далека от своего окончательного решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dienes G. J. Effects of nuclear radiations on the mechanical properties of solids. J. Appl. Phys. Vol. 24. №6. 1953. – P. 315-319.
2. Ремнёв Ю. И. О напряжениях в металлах при облучении. Изв. Высш. школы, Физ. – мат. серия №4, 1958. –С. 91-98.
3. Ремнёв Ю. И. К расчёту объёмных изменений в металлах при нейтронном облучении. Вестник МГУ, №1, 1959. – С. 12-17.
4. Ремнёв Ю. И. О влиянии облучения на напряжения и малые деформации в твёрдом теле. ДАН СССР, т. 124, №3, 1959. – С. 210-217.
5. Ленский В. С. Влияние радиоактивных облучений на механические свойства твердых тел. Инж. сб. т. 28, 1960. – с97-133.
6. Ильюшин А. А. , Огибалов П. М. О прочности оболочек толстостенного цилиндра и полого шара, подвергнутых облучению // Инж. сб. т 28, 1960. – с. 134-144.
7. Ольшак В. Об основах и применениях теории неоднородных упруго пластических сред. Изв. АН. СССР, ОТН. №8, 1957 – 98с.
8. Ольшак В. Урбановский Б. Неоднородный толстостенный упруго-пластический цилиндр под действием внутреннего давления. Бюлл. Польск. Акад. Наук. Т. 4, №3, 1956. – 27с.

9. Vaidyanthian S. , Sim. R. G. Aphenomenological study of the time - to-repture in postirradiation and in-pile creep for 20% CW type 316 stainless stel. Trans. Amer. Nucl. Soc. 1973, N17. – p. 211-212.
10. Fisher H. D. , Longo R. Creep analysis of slightly oval cylindrical shells subjected to time-dependent loading, temperature and neutron flux. Nucl. Eng. and Res. 1978, 48, № 2-3. – p. 437—449.
11. Вахромеева В. В. Исследование устойчивости разностных схем матричной прогонки, используемой при решении о напряженно-деформированном состоянии твэлов // Физ. -энерг. ин-т. Обнинск. (Препр) 1978, № 812, - 12 с.
12. Куликов И. С. , Нестеренко В. Б. . Тверковкин Б. Е. Теоретическое исследование работоспособности твэлов быстрого реактора БРИГ-300 // Тез, док; V Всесоюз. конф. «Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела АЭС», Мн. , 1981 – с. 108.
13. Куликов И. С. , Нестеренко В. Б. , Тверкотин Б. Е. К вопросу о работоспособности твела газоохлаждаемого быстрого реактора при наличии газового зазора между топливом и оболочкой,— Весці АН БССР. Сер. фіз. -энерг. навук, 1981, №2. – С. 55—59.
14. Куликов И. С. , Тверковкин Б. Е. Распухание керметного цилиндрического сердечника твэла газоохлаждаемого и быстрого реактора. — Весці ЛИ БССР, Сер. фіз. -энерг. навук, 1978, № 2– с. 60-63.
15. Куликов И. С. , Тверковкин Б. Е. Прочностной расчет твэла газоохлаждаемого быстрого реактора при жестком контакте топлива и оболочки. — Весці ЛИ БССР, Сер. фіз. -энерг. навук , 1979, № 2 – с. 131.
16. Куликов И. С. , Тверковкин Б. Е. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / Под ред. В. Б. Нестеренко. – Мн. : Наука и техника. 1984. – 104с.
17. Займовский А. С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. – М. : Госатомиздат, 1962. – 370с.
18. Быков В. И. Исследование распухания конструкционных сталей карбидной зоны реактора БР-5. —Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 4, с. 247-250.
19. Быков В. Н. Радиационное распухание стали ОХ16Н15МЗБ,— Атомная энергия. 1974, т. 36, вып. 1, с. 24—26.
20. Быков В. Н. Эмпирическая зависимость распухания стали ОХ16Н15МЗБ от дозы и температуры облучения. — Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 4, с. 293—295.
21. Займовский А. С. , Быков В. Н. Влияние облучения на механические свойства, структуры и распухания стали Х18Н10Т и ОХ16Н15МЗБ. // В кн. : Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Обнинск, 1975, т. 2. с. 583—602.
22. Дюпуи Д. М. Свойства материалов, облученных в реакторе RAPSODIE // Топливо и твэлы для быстрых реакторов. — М. : Атомиздат, 1975, вып. 5, - с. 39—46.
23. Казачковский О. Д. Оценка радиационного распухания стали ОХ16Н15МЗБ из оболочек ТВЭ реактора БОР-60 — В кн. : Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Обнинск, 1975, т. 2, – с. 583—602.
24. Определениеработоспособности твэл быстрых реакторов с учетом распухания стали / Орлов В. В. , Лихачев Ю. И. , Прошкин А. Л. . Щербакова Ж. Н. // Доклад на советско-французском симпозиуме. —. Димитровград, 1972. – 18с.

25. Рыков В. Н. Исследование распухания конструкционных материалов. – В. кн. : Труды ФЭИ. М. : Атомиздат. , 1974. – С. 414-423.
26. Bates J. , Straalsand J. An empirical representation of irradiation induced swelling of solution treated type 304 stainless steel. — Nuclear Technology, 1972, vol. 14. N 3. – p. 292—298.
27. Boltax A. Void swelling and irradiation creep relationships,—Journal of Nuclear Materials, 1977, vol. 65, N 1. – p. 174— 183.
28. Flinn J. B. In-reactor deformation of solution annealed type 304 L, stainless steel,—Journal of Nuclear Materials, 1977, vol 65, N 1. – p. 210—223.
29. Gilbert E. R. Irradiation creep data in support of LMFBR core design. —Journal of Nuclear Materials, 1977, vol. 65, N 1. – p. 266—278.
30. Harbourne B. L. The development of CYGRO-F for fuel rod Behaviour analysis. — Nuclear Technology, 1972, vol. 16, N 1, p. 156—170.
31. Helbling W. Deformation of fuel element boxes gas-cooled fast breeder reactors due to neutron irradiation induced swelling of steel. —Nuclear Engineering and Design, 1971, vol. 16, N 1. – p. 59—66.
32. Kenfield T. A. Stress-free swelling in type 304 stainless steel at high fluences. — Transaction of the American Nuclear Society, 1976, v. 24. – p. 146-147.
33. Kenfield T. A. Stress-free swelling in type 304 stainless steel at high fluences. —Nuclear Technology, 1977, vol. 36, N 3. – p. 347-352.
34. Kenfield T. A. Swelling of type-316 stainless steel at high fluences in EBR-II,—Journal of Nuclear Materials, 1977, vol. 65, N 1. – p. 174—183.
35. Голована И. С. , Лихачев Ю. И. Прогнозирование работоспособности твэлов окислым горючим для быстрых натриевых реакторов. —Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 1, с. 27—37.
36. Лихачев Ю. И. , Вахромеева В. Н. Длительная прочность и ползучесть оболочек твэл быстрых реакторов. — В кн. : Сборник докладов I симпозиума стран членов СЭВ. Обнинск, 1967. — 158 с.
37. Лихачев Ю. И. , Попов В. В. К устойчивости оболочек цилиндрических твэлов с начальной эллипсностью, - Атомная энергия, 1972. т. 32, вып. I. – с. 3-9.
38. Лихачев Ю. И. . Прошкин А. А. , Забудько Л. М. Расчетные методы определения работоспособности твэл быстрых реакторов. Доклад на симпозиуме СЭВ. — Обнинск, 1973. – 23с.
39. Лихачев Ю. И. , Прошкин А. А. , Тузов А. Н. Основные задачи внутриреакторных исследований механических свойств конструкционных материалов, необходимых для определения работоспособности элементов активной зоны быстрых реакторов,— В кн. Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования, Киев: Наукова думка, 1976 – с. 3—13.
40. Лихачев Ю. И. , Прошкин А. А. , Щербакова Х. Н. Методы расчета работоспособности твэлов быстрых реакторов с учетом распухания стали. — Вкн. : Труды ФЭИ. М. : Атомиздат, 1974 – с. 374—388.
41. Лихачёв Ю. И. , Прошкин А. А. , Щербакова Ж. Н. Оценка работоспособности оболочек твэлов быстрых реакторов. —Атомная энергия, 1971, т. 30, вып. 2. – с. 206—211.

42. Лихачев Ю. И. , Пупко В. Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. — М.: Атомиздат. 1975 – 378 с.
43. Определениеработоспособности твэл быстрых реакторов с учетом распухания стали / Орлов В. В. , Лихачев Ю. И. , Прошкин А. Л. . Щербакова Ж. Н. // Доклад на советско-французском симпозиуме. — Димитровград, 1972. – 18с.
44. Guyette M. Cladding-strength analysis under the combined effect of creep and plastisity in fas reactor environments. — Nuclear Engineering and Design. 1972, vol. 18, N 1. – p. 53—68.
45. Gittus J. H. Theoretical analysis of the strain produced in nuclear fuel cladding tubes by the expansion of cracked cylindrical fuel pellets— Nuclear Engineering and Design, 1972, vol. 18, N 1. – p. 69—82.
46. Безухов Н. И. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур. — М. ; Машиностроение, 1965. —567 с.
47. Голована И. С. , Лихачев Ю. И. Прогнозирование работоспособности твелоов окислым горючим для быстрых натриевых реакторов. —Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 1, с. 27—37.
48. Григолюк Э. И. , Попович В. Е. Об одном энергетическом методе определения при облучении упругого тела // Механика твёрдого тела, 1976, № 2, с. 82—86.
49. Крамеров А. Я. , Шевелев Я. В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. – М. ; Атомиздат. 1964. -716 с.
50. Моусдейл Д. Оболочечные и конструкционные материалы для твелоов и сборок. Топливо и твелоы для быстрых реакторов. - М. : Атомиздат, 1975, вып. 5, - с. 3-11.
51. Fabian N. Zweidimensionale Brennstabrechnung nach der Finite-lementmethode — Atoirmiirtschaft-Atomtechnik, 1976, vol. 21, N 6. – p. 309-310.
52. FredrikssonB. , Rydholm G. Mechanical and temperature contact in fuel and cladding. — Nuclear Engineering and Design, 1978, v. 48, N 1. – p. 69—79.
53. Gittus J. H. Theoretical analysis of the strain produced in nuclear fuel cladding tubes by the expansion of cracked cylindrical fuel pellets— Nuclear Engineering and Design, 1972, vol. 18, N 1. – p. 69—82.
54. Gittus J. H. Theoretical analysis of stress, strain and fracture for fast reactor fuel cladding under constant power and power-cycling conditions: visco-elastic model of nuclear fuel pin behaviour. — Nuclear Engineering and Design. 1974, vol. 28, N 2. – p. 252—256.
55. Guyette M. Cladding-strength analysis under the combined effect of creep and plastisity in fas reactor environments. — Nuclear Engineering and Design. 1972, vol. 18, N 1. – p. 53—68.
56. HarbourneB. L. The development of CYGRO-F for fuel rod Behaviour analysis. — Nuclear Technology, 1972, vol. 16, N 1, p. 156—170.
57. MerckxK. R. . Calculational procedure for determining creep col-lapse of LWR fuel rods,- Nuclear Engineering and Design, 1974 vol. 31, N 1. – p. 95-101.
58. Rashid J. R. Mathematical modeling and analysis. of fuel rods. — Nuclear Engineering and Design. 1974, vol. 29, N 1. – p. 22—32.
59. Тутнов А. А. Методы расчета работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов- М. : Энергоатомиздат, 1987, – 184 с.

60. Тутнов А. А. Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования. Киев: Наукова Думка. Вып. 2. 1977. – С. 20.
61. Тутнов А. А. Кинетическое уравнение накопления повреждений в материалах при совместном действии на них поля напряжений температуры и облучения. В кн: Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования. К. Наукова думка, 1977 – с. 12-29.
62. Тутнов А. А. , Ткачев В. В. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомное материаловедение. 1978. Вып. 2. – С. 19-29.
63. Тутнов А. А. , Ульянов А. И. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомное материаловедение. 1985. Вып. 1. – С. 28-36.
64. Лихачев Ю. И. , Пупко В. Я. , Попов В. В. Методы расчета на прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М. : Энергоатомиздат, 1982. – 210с.
65. Морозов Е. М. , Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М. : Наука, 1980. -127с.
66. Забудько Л. М. , Лихачев Ю. И. , Прошкин А. А. Работоспособность ТВС быстрых реакторов // Физика и техника ядерных реакторов - М. : Энергоатомиздат, 1988, №35. - 168 с.
67. Wire G. L. , Straalsund J. L. Irradiation induced stress-relaxation of previously irradiated 304 stainless steel in a fast flux environment // J. Nucl. Mat. 1977. V. 64-N2. – p. 254.
68. Flinn J. E. , McVay G. , Walters L. C. In-reactor deformation of solution annealed type 304L stainless steel // J. Nucl. Mat. V. 65. N 3. – p. 210.
69. Регель В. Р. , Слуцкер А. И. , Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М. : Наука, 1974. – 560 с.
70. Appleby W. K. Swelling in neutron-irradiated 300-series stainless steels // Proc. of Int. Conf. Rad. Effects in Breeder Reactor Structural Materials. Scottsdale, Arisona. 1977. – P. 53. p. 509.
71. Bardeen J. , Herring C. Imperfections in nearly perfect crystal. New York. Willey, 1962. – 415 p.
72. Bates J. , Straalsand J. An empirical representation of irradiation induced swelling of solution treated type 304 stainless steel. — Nuclear Technology, 1972, vol. 14. N 3. – p. 292—298.
73. Flinn J. B. In-reactor deformation of solution annealed type 304 L, stainless steel,— Journal of Nuclear Materials, 1977, vol 65, N 1. – p. 210—223.
74. Helbling W. Deformation of fuel element boxes gas-cooled fast breeder reactors due to neutron irradiation induced swelling of steel. —Nuclear Engineering and Design, 1971, vol. 16, N 1. – p. 59—66.
75. Kenfield T. A. Swelling of type-316 stainless steel at high fluences in EBR-II,—Journal of Nuclear Materials, 1977, vol. 65, N 1. – p. 174—183.
76. MerckxK. R. . Calculational procedure for determining creep col-lapse of LWR fuel rods,- Nuclear Engineering and Design, 1974 vol. 31, N 1. – p. 95-101.
77. Naziasz P. J. Swelling and swelling resistance possibilities of austenitic stainless steel in fussion reactors. - J. Nucl. Mater 1984. vol. 122-123. –p. 472-486.

78. Perrin R. C. CRAMP: core restraint analysis and modelling program // Trans. of 5th Int. Conf. SMIRT, Berlin, 1979. – P. 29.

79. Rowcliffe A. F., Grossberck M. L. The response of austenitic steel to radiation damage. - J. Nucl. Mater., 1984, vol. 122- 123. – p. 181-190.

80. Kenfield T. A. Stress-free swelling in type 304 stainless steel at high fluences. — Transaction of the American Nuclear Society, 1976, v. 24. – p. 146-147.

81. Sutherland W. H. Calculation methods for core distortions and mechanical behaviour // Proc. of Specialists Meet, Prediction and Experience of Core Distortion Behaviour. Wilmslow, England, October, 1984. – P. 221.

82. Писаренко. Г. С. Испытательный стенд «Нейтрон» для исследования механических свойств материалов в условиях нейтронного облучения. К., Наук. Думка. 1971. – 7с.

83. Писаренко Г. С. Влияние реакторных излучений на сопротивление ползучести и длительную прочность аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ. – Проблемы прочности, 1974, №4. – с. 3-8.

84. Писаренко Г. С. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях. Киев., “Наукова Думка” 1980. – 531с.

85. Писаренко Г. С. Прочность тугоплавких металлов. М. Metallurgia, 1970. – 365 с.

86. Писаренко Г. С. Исследование высокотемпературной прочности тугоплавких металлокерамических материалов. — Труды VII Всесоюз. науч. -техн. конф. по порошковой металлургии. Ереван, 1964. – с. 50-54.

87. Писаренко Г. С. Установка для исследования ползучести и длительной прочности в поле реакторного облучения — Термопрочность материалов и конструктивных элементов, 1969, вып. 5 – с. 386-390.

88. Писаренко Г. С. Установка для исследования прочности материалов при сложном напряженном состоянии в роле реакторного облучения. — Термопрочность материалов и конструктивных элементов, 1969, вып. 5. – с. 390—394.

89. Писаренко Г. С., Антипов Е. А., Можаровский Н. С. Деформирование и разрушение материалов при переменных температурах и напряжениях. — Проблемы прочности, 1971, №1 – с. 4-12.

90. Писаренко Г. С., Борисенко В. А., Кашталян Ю. А. Влияние температуры на твердость и модуль упругости вольфрама и молибдена при 120-2700°С. — Порошковая металлургия, 1962, № 5 – с. 79—83.

91. Писаренко Г. С., Визерская Г. Р. Установка для определения истинного рассеяния энергии и циклически деформированном материале в широком диапазоне температур. —В кн.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем К., 1968. – с. 172—176.

92. Писаренко Г. С., Киселевский В. Н. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках. Киев «Наукова Думка» 1979. – 281с.

93. Киселевский В. Н. Об уравнении состояния структурноустойчивой нержавеющей стали в радиационном поле высокой интенсивности. – Проблемы прочности, 1974, № 7. – с. 30—33.

94. Киселевский В. Н. О справедливости гипотезы упрочнения в расчетах деформации ползучести облучаемых конструкций. – Атомная энергия, 1975, 38, вып. 5. – с 335—336.

95. Киселевский В. Н. Предельное состояние структурноустойчивой стали в условиях ползучести при интенсивном радиационном облучении. Сообщ. 1. Исследование применимости функций предельного состояния для стали ОХ16Н15МЗБ в условиях реакторного облучения. — Проблемы прочности, 1974, № 12 – с. 48-52.
96. Киселевский В. Н. Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении. – Киев: Наукова думка, 1977г. – 104с.
97. Киселевский В. Н. , Косов Б. Д. Уравнение состояния для процессов ползучести упрочняющегося материала. – Проблемы прочности, 1975, № 4. – с. 8-16.
98. Киселевский В. Н. , Осасюк В. В. Анализ критериев длительной прочности. – Прикладная механика, 1967, 3, вып 3, с. 96-99.
99. Киселевский В. Н. , Полевой Д. В. Об одном методе оценки длительной прочности облучаемой жаропрочной стали. – Проблемы прочности, 1974, № 6. – с. 65-66.
100. Киселевский В. Н. , Полевой Д. В. Влияние реакторного облучения на связь между характеристиками жаропрочности нержавеющей стали аустенитного класса. – Проблемы прочности, 1974, № 4. – с. 46-48.
101. Киселевский В. Н.; Чуприна А. Ф. Исследование влияния циклического воздействия температур на ползучесть и длительную прочность стали ЭИ847. — Термопрочность материалов и конструктивных элементов, 1969, вып. 5. – с. 51—55.
102. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М. , «Наука», 1966. – 752с.
103. Дубровский В. Б. Радиационная стойкость строительных материалов. – М. : Стройиздат, 1977. – 278с.
104. Дубровский В. Б. Радиационные и структурные воздействия на строительные материалы конструкций защит от излучения. Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – 1972. – 31с.
105. Дубровский В. Б. , Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующего излучения. М. : Стойиздат. 1983. - 240с.
106. Радиационная стойкость строительных материалов. Справочник / В. Б. Под ред. Дубровского – М. : Атомиздат, 1973. – 264.
107. Хечумов. Р. А. , Дубровский А. В. Исследование напряжённо-деформированного состояния некоторых строительных конструкций под воздействием ионизирующих излучений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: проектирование и строительство, вып. 2(2), 1978. – С215-221.
108. Комаровский А. Н. Строительство ядерных установок. – М. : 1969. –, 275с.
109. Андреев В. И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: Монография - М. : Издательство АСВ, 2002. – 288с.
110. Ольшак В. , Рыхлевский Я. , Урбановский В. Теория пластичности неоднородных тел. – М. : Мир, 1964. – 156 с.
111. Овчинников И. Г. , Петров В. В. Учёт радиационного облучения при расчёте тонкостенных элементов конструкций // Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов –18с. Деп в ВИНТИ 07. 01. 1982 №1341-82
112. Морозов В. И. , Веселов А. А. , ЮйХуэй, Калашников М. П. О расчете защитной сферической оболочки реактора при радиационном воздействии//Вестник гражданских инженеров. 2012. №2 (31). С 75-78.

113. Капустин С. А. , Горохов В. А, Виленский О. Ю. , Кайдалов В. Б. , Марголин Б. З. , Бучатский А. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций из нержавеющей сталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий// Проблемы прочности и пластичности. 2007. Вып. 69. с. 106 – 116.

114. Горохов В. А. , Капустин С. А. , Чурилов Ю. А. , Виленский О. Ю. , Кайдалов В. Б. Численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющей сталей в условиях терморadiационных воздействий//Проблемы прочности и пластичности. 2005. вып. 67. с. 26-36.

115. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС №147 от 31. 10. 2012.

116. Марголин Б. З. , Гуленко А. Г. , Курсевич И. П. , Бучатский А. А. Прогнозирование длительной прочности аустенитных материалов при нейтронном облучении// Вопросы материаловедения, 2005, №2 (42), с. 163-186.

117. Марголин Б. З. , Гуленко А. Г. , Бучатский А. А. , Балакин С. М. Прогнозирование скорости роста трещины в аустенитных материалах в условиях ползучести и нейтронного облучения// Вопросы материаловедения, 2005, №4 (44), с. 59-69.

118. Марголин Б. З. , Гуленко А. Г. , Курсевич И. П. , Бучатский А. А. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 1. Физико-механическая модель// Проблемы прочности. 2006. №3, с. 5 – 22.

119. Марголин Б. З. , Гуленко А. Г. , Курсевич И. П. , Бучатский А. А. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 2. Прогнозирование длительной прочности// Проблемы прочности. 2006. № 5, с. 5 – 16.

120. Марголин Б. З. , Гуленко А. Г. , Бучатский А. А. , Балакин С. М. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 3. Прогнозирование скорости роста трещины в аустенитных материалах// Проблемы прочности. 2006. № 6, с. 5 – 16.

121. Марголин Б. З. , Бучатский А. А. , Гуленко А. Г. и др. Новый метод прогнозирования сопротивления циклическомунагружению при вязкоупругопластическом деформировании и нейтронном облучении// Проблемы прочности. 2008. № 6, с. 5 – 24.

122. Марголин Б. З. , Беляева Л. А. , Балакин С. М. , Бучатский А. А. и др. Экспериментально-расчетное исследование сопротивления термоусталостному разрушению аустенитных сталей после нейтронного облучения// Вопросы материаловедения, 2008, № 4 (56), с. 94 - 105.

123. Бучатский А. А. Разработка методов прогнозирования длительной и циклической прочности аустенитных сталей в условиях нейтронного облучения на основе физико-механического моделирования процессов разрушения. Автореф. дисс. к. т. н. . 210. СПб. 27 с.

124. Сергеева Л. В. Исследование процесса возможного разрушения трубопроводов ядерных энергетических установок вследствие их эрозионно-коррозионного утонения//Вестник машиностроения, 2007. № 6, с. 22-24.

125. Сергеева Л. В. Исследование возможного растрескивания корпуса реактора в рамках концепции «течь перед разрушением» //Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 7, стр. 52-58

126. Сергеева Л. В. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов графитовой кладки ядерных реакторов с учетом анизотропии графита//Вестник машиностроения. 2007, № 7, с. 19-21.

127. Сергеева Л. В. Характерные особенности расчетного обоснования прочности элементов конструкций ядерных реакторов на стадии эксплуатации и при создании новых установок. Автореф. дисс. д. т. н. М. РНЦ «Курчатовский институт» Институт реакторных материалов и технологий. 2007. 44 с.

128. Андреев В. И. , Дубровский И. А. Влияние радиационного облучения на напряженное состояние сферической бетонной оболочки// International Journal for Computational Civiland Structural Engineering, 2010, « 6(1&2) с. 39-44.

Данная работа выполнена в рамках работы над грантом РФФИ № 12-01-31130Мол_а «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями».

Рецензент:Петров Владилен Васильевич, заведующий кафедрой «Теория сооружений и строительных конструкций» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А. , академик РААСН, д-р. техн. наук, профессор