

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ  
ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ<sup>\*)</sup>**

**С.А. Капустин, В.А. Горохов, О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов**

*Нижний Новгород*

**Б.З. Марголин, А.А. Бучатский**

*Санкт-Петербург*

Рассмотрены исходные экспериментальные зависимости и математические модели, описывающие основные закономерности поведения нержавеющей стали в условиях интенсивных терморadiационных воздействий, а также основные методические положения, заложенные в программу расчета элементов и узлов несущих конструкций при квазистатических силовых и терморadiационных нагружениях.

1. Известно, что нейтронное облучение может существенно влиять на механические характеристики конструкционных материалов. Наиболее сильно влияние облучения проявляется в изменении пределов текучести и прочности, других характеристик пластичности, размерных изменениях материалов, вызванных радиационным формоизменением и радиационной ползучестью. При этом все физико-механические характеристики материалов в условиях терморadiационных воздействий становятся функциями (а в ряде случаев функционалами) процесса деформирования, изменения температуры и параметров нейтронного облучения. В связи с этим исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций в условиях интенсивных терморadiационных воздействий представляет сложную проблему, требующую для своего решения комплекса взаимосвязанных задач:

- установления конкретных зависимостей, определяющих влияние уровня нейтронного облучения на механические характеристики конструкционных материалов;
- создания математических моделей, описывающих упруговязкопластическое поведение материалов с учетом основных эффектов, возникающих при нейтронном облучении;
- разработки численных методик и алгоритмов исследования поведения конструкций на основе таких моделей;

---

<sup>\*)</sup> Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (грант 06-08-00360а) и Министерством образования и науки РФ (грант Президента РФ на поддержку ведущих научных школ НШ-6391.2006.8).

– разработки программных средств, реализующих перечисленные методические положения в задачах расчета конкретных конструкций.

Для решения подобных задач коллективом сотрудников НИИМ ННГУ, ФГУП "ОКБМ" и ЦНИИ КМ "Прометей" разработаны методические и программные средства исследования упруговязкопластического поведения элементов несущих конструкций ЯЭУ, выполненных из аустенитных нержавеющей сталей, в условиях квазистатических силовых и терморadiационных воздействий.

В статье рассмотрены исходные экспериментальные зависимости и математические модели, описывающие основные закономерности деформирования нержавеющей сталей с учетом влияния высоких уровней температур и нейтронного облучения, а также основные методические положения, заложенные в программу расчета НДС элементов и узлов конструкций, работающих в условиях интенсивных терморadiационных воздействий.

**2.** Исходные зависимости, используемые для построения модели упруговязкопластического деформирования стали X18H9 в условиях терморadiационных воздействий получены в ЦНИИ КМ "Прометей".

Диаграммы деформирования материала при заданной температуре эксплуатации  $T$  и флюенсе нейтронов  $N$  аппроксимируются уравнением вида:

$$\sigma_{11} = \sigma_{0,2}(T, N) + A(T, N)k_p^{n(T, N)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{0,2}(T, N)$  – предел текучести;  $k_p$  – параметр Одквиста;  $A(T, N)$ ,  $n(T, N)$  – функции материала.

Радиационное изменение объема  $\beta$  при заданном уровне гидростатических напряжений  $\sigma$  и пластической деформации  $k_p$  определяется зависимостью

$$\beta = S_0 f_1(\sigma) f_2(k_p), \quad (2)$$

где

$$S_0 = c \left( \frac{N}{N_0} \right)^{n_v} \exp[-r(T - T_{\max})^2], \quad (3)$$

$$f_1(\sigma) = 1 + p\sigma \geq 0, \quad (4)$$

$$f_2(k_p) = \exp(-\eta k_p). \quad (5)$$

В соотношениях (2)–(5)  $c$ ,  $n_v$ ,  $r$ ,  $p$ ,  $\eta$ ,  $N_0$ ,  $T_{\max}$  – константы материала.

Уравнения для скоростей термической ползучести с учетом влияния облучения формулируются следующим образом:

$$\dot{\epsilon}^c = a_c \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \right)^{n_c} (k_c)^{m_c} \left[ 1 + \frac{\Phi}{\Phi_e} \exp\left( \frac{Q}{R_g T_a} \right) \right], \text{ если } k_c < k_{tr}, \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}^c = a_c \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \right)^{n_c} (k_{tr})^{m_c} \left[ 1 + \frac{\Phi}{\Phi_e} \exp\left( \frac{Q}{R_g T_a} \right) \right], \text{ если } k_c > k_{tr}, \quad (7)$$

где  $a_c$ ,  $n_c$ ,  $m_c$  – параметры материала, зависящие от температуры  $T$ ;  $R_g$  – универсаль-

ная газовая постоянная;  $Q, \Phi, \sigma_0$  – константы материала;  $\sigma_n$  – интенсивность напряжений;  $T_a$  – абсолютная температура;  $k_c$  – длина траектории деформации термической ползучести;  $\Phi = dN/dt$  – флукс нейтронов;  $k_p$  – значение деформации, при которой происходит переход от первой стадии ползучести ко второй.

Скорость радиационной ползучести определяется (для  $T < 500$  °C) следующим соотношением:

$$\dot{\epsilon}^r = (B\Phi + D\dot{S}_0)\sigma_n, \quad (8)$$

где  $B, D$  – коэффициенты радиационной ползучести;  $\dot{S}_0$  – скорость свободного распухания ( $\sigma = 0$ ).

С учетом приведенных аналитических зависимостей ниже дан уточненный вариант модели, используемой для описания упруговязкопластического поведения стали X18H9 [1] и получены все необходимые для ее реализации материальные функции.

Предполагается, что характеристики упругости материала  $G, K$  и коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha$  не зависят от уровня облучения:  $G = G(T), K = K(T), \alpha = \alpha(T)$ . Скорость радиационного формоизменения  $\dot{\beta}$  в соответствии с (2)–(5) принимается в виде:

$$\dot{\beta} = A_0(T, N)\Phi f(\sigma). \quad (9)$$

Влияние  $f_2(k_p)$  не учитываем вследствие малости  $k_p$  в практических расчетах.

В результате обработки значений функции  $A_0(T, N)$  установлено, что эта функция практически линейно зависит от уровня флюенса  $N$  и ее можно представить следующим образом:

$$A_0(T, N) = A_1(T)N, \quad (10)$$

где

$$A_1(T) = \frac{\dot{S}_0}{3N\Phi}. \quad (11)$$

Радиус поверхности текучести принимается в виде

$$C_p(T, N, k_p) = C_p^0(T, N) + \Delta C_p(T, k_p), \quad (12)$$

где  $C_p^0(T, N)$  – радиус начальной поверхности текучести;  $\Delta C_p(T, k_p)$  – изменение этой величины в зависимости от температуры и величины накопленной пластической деформации. Модули анизотропного упрочнения  $g_1$  и  $g_2$  принимаются как функции  $T$  и  $N$ :  $g_1 = g_1(T, N), g_2 = g_2(T, N)$ .

Функция  $B_1(T, N)$  в модели радиационной ползучести принималась в виде

$$B_1(T, N) = B + K_1(T)N, \quad (13)$$

где

$$K_1(T) = \frac{D\dot{S}_0}{N\Phi}. \quad (14)$$

Для описания термической ползучести в соответствии с ранее предложенной моделью [1] введен радиус поверхности ползучести  $C_0$ , который, вообще говоря,

зависит от температуры  $T$  и флакса  $\Phi$ . Для упрощения расчетов эта функция принималась одномерной и строилась для максимально возможного значения флакса  $\Phi$ . В качестве начального условия ползучести принималось такое значение напряжений, при котором суммарная ползучесть за 10 лет не превысит 1%. При этом уравнение для скорости термической ползучести можно выразить следующим образом:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \sigma'_{ij} L_c(T, \psi) H(T, k_c) (1 + F_c(T) \Phi), \quad (15)$$

где  $\sigma'_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений,  $\psi = (\sqrt{\sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} - C_0) / C_0$ , а  $L_c$ ,  $H$ ,  $F_c$  легко вычисляются на основе уравнений (6) и (7).

Таким образом, полный перечень материальных функций модели, описывающей упруговязкопластическое поведение стали X18H9 в условиях терморadiационных воздействий, включает следующие функции:  $G(T)$ ,  $K(T)$ ,  $\alpha(T)$ ,  $A_1(T)$ ,  $C_p^0(T, N)$ ,  $\Delta C_p(T, k_p)$ ,  $g_1(T, N)$ ,  $g_2(T, N)$ ,  $K_1(T)$ ,  $C_0(T)$ ,  $L_c(T, \psi)$ ,  $H(T, k_c)$ ,  $F_c(T)$ .

3. Исследование поведения конструкций на основе рассмотренных выше физических соотношений приводит к сложным нелинейным системам разрешающих уравнений. Значительная часть величин, входящих в эти уравнения, являются функционалами, которые зависят от предшествующей истории процесса деформирования и могут быть определены путем интегрирования для конкретных траекторий нагружения. Решение таких нелинейных задач строится обычно на основе инкрементальной формулировки исходных уравнений и требует применения современных шаговых методов.

В предлагаемой методике для повышения эффективности шаговых методов используется комбинированная шаговая схема [2], в которой шаги каждого уровня несут различную функциональную нагрузку, при этом их размеры определяются из различных соображений. На шагах верхнего уровня, которые в дальнейшем будем называть этапами нагружения, осуществляется внешняя линеаризация задачи. Реальная траектория нагружения представляется в виде кусочно-гладкой кривой в пространстве параметров нагружения и аппроксимируется совокупностью прямолинейных участков, величина которых определяется только условиями удовлетворительной аппроксимации пути нагружения. Решение нелинейных задач на этапах осуществляется с помощью метода начальных напряжений путем итерационного уточнения равновесного состояния для текущей деформированной конфигурации конструкции. Для вычисления изменений необратимых деформаций в пределах этапа нагружения последний разбивается на ряд шагов нижнего уровня. На внутренних шагах все вычисления строятся независимо для отдельных точек конструкции и без коррекции уравнений равновесия. Таким образом, в результате последовательного вычисления на каждом шаге низшего уровня величин, входящих в уравнения пластичности, термической и радиационной ползучести, и суммирования их в пределах этапа нагружения может быть определена информация, необходимая для получения текущего приближения решения нелинейной задачи на этапе нагружения.

Для получения уравнений, описывающих равновесие конструкции на этапе нагружения, будем считать известным закон изменения действующих на конструкцию внешних воздействий. Иначе говоря, примем, что для каждого момента времени известны значения объемных сил  $F_p$ , полей нейтронного облучения  $N$  и температуры  $T$ , заданные в объеме деформируемой системы  $V$ , а также значения поверхностных сил  $P_i$  и перемещений  $u_i^G$ , заданные на частях ее поверхности  $\Sigma$ .

Соотношения, устанавливающие связь между изменением напряжений  $\Delta\sigma_{ij}$  и деформаций  $\Delta e_{ij}$  на шаге нагружения в каждой точке конструкции, представим в виде [1]:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) + \delta_{ij}(K - \frac{2}{3}G)(\Delta e_{ii} - \Delta d_{ii}), \quad (16)$$

$$\Delta d_{ij} = \Delta e_{ij}^p + \Delta e_{ij}^c + \Delta e_{ij}^r - \frac{\Delta G}{2\hat{G}}\bar{\sigma}'_{ij} + \delta_{ij}\left[\Delta(\alpha T) + \Delta\beta - \frac{\Delta K}{3\hat{K}}\bar{\sigma}\right], \quad (17)$$

$$\Delta G = \frac{\hat{G} - \bar{G}}{\bar{G}}, \quad \Delta K = \frac{\hat{K} - \bar{K}}{\bar{K}}, \quad \Delta(\alpha T) = \hat{\alpha}\hat{T} - \bar{\alpha}\bar{T}, \quad \Delta\beta = \hat{\beta} - \bar{\beta}. \quad (18)$$

В соотношениях (16)–(18) величины, отмеченные символом "–", относятся к исходному состоянию, а символом "^" – к текущему;  $\Delta e_{ij}^p$  – приращение деформаций пластичности;  $\Delta e_{ij}^c$  – приращение деформаций термической ползучести;  $\Delta e_{ij}^r$  – приращение деформаций радиационной ползучести. Введение дополнительных деформаций  $\Delta d_{ij}$  позволяет организовать процесс решения нелинейной краевой задачи в виде последовательности линейных задач с постоянными коэффициентами и изменяющимися правыми частями, определяемыми текущими значениями  $\Delta d_{ij}$ .

При фиксированных на текущей итерации значениях коэффициентов  $\Delta d_{ij}$ , определяемых изменениями необратимых деформаций, линеаризованная система разрешающих уравнений может быть получена из условия стационарности функционала для приращений перемещений на этапе нагружения  $\Delta u_i$ , удовлетворяющих заданным кинематическим граничным условиям [2]:

$$\delta\Pi = 0, \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_V \Delta\sigma_{ij}(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij})dV - \int_V \Delta F_i \Delta u_i dV - \int_{\Sigma} \Delta P_i \Delta u_i d\Sigma + \\ & + \int_V (\bar{\sigma}_{ij} \Delta e_{ij} - \bar{F}_i \Delta u_i) dV - \int_{\Sigma} \bar{P}_i \Delta u_i d\Sigma. \end{aligned} \quad (20)$$

Два последних слагаемых в функционале (20) введены для коррекции глобальных условий равновесия конструкции.

Численное решение сформулированной задачи осуществляется на основе метода конечных элементов (КЭ) с использованием изопараметрических двумерных и пространственных КЭ с сирендиповой квадратичной аппроксимацией поля перемещений. В результате КЭ-дискретизации исследуемых конструкций условие стационарности функционала (19) может быть сведено к системе алгебраических уравнений

$$[H]\{\Delta U\} - \{\Delta R\} = 0, \quad (21)$$

где  $[H]$  – матрица жесткости конструкции, определяемая упругими характеристиками материала при температуре  $\hat{T}$  и уровне нейтронного облучения  $\hat{N}$ , соответствующим текущему состоянию;  $\{\Delta U\}$  – вектор изменений узловых перемещений конструкции для текущего шага нагружения;  $\{\Delta R\}$  – вектор узловых сил, состоящий из постоянной  $\{\Delta R'\}$  и переменной  $\{\Delta R''\}$  на шаге составляющих:

$$\{\Delta R\} = \{\Delta R'\} + \{\Delta R''\}. \quad (22)$$

Постоянная составляющая  $\{\Delta R'\}$  определяется совокупностью внешних воздействий, заданных на текущем шаге нагружения. Переменная составляющая  $\{\Delta R''\}$  включает в себя нелинейные члены, зависящие от решения задачи, и определяется текущими значениями параметров  $\Delta d_{ij}$ , меняющимися в процессе последовательных приближений.

При решении задачи на этапе нагружения матрица  $[H]$  и вектор  $\{\Delta R'\}$  формируются в начале шага и не меняются в процессе последовательных приближений. Решение системы уравнений (21) представляется в виде:

$$\{\Delta U\} = \{\Delta U'\} + \{\Delta u\}, \quad (23)$$

где

$$\{\Delta U'\} = [H]^{-1}\{\Delta R'\}, \quad (24)$$

$\{\Delta u\}$  – нелинейная часть вектора решения, зависящая от вектора  $\{\Delta R''\}$ . Таким образом, согласно принятой схеме линеаризации решение нелинейной задачи на шаге нагружения сводится к однократному нахождению вектора линейной части  $\{\Delta U'\}$  и уточнению нелинейной части  $\{\Delta u\}$  в процессе последовательных приближений согласно равенству

$$\{\Delta u\} = [H]^{-1}\{\Delta R''\}. \quad (25)$$

Перечисленные методические положения реализованы в виде программы численного исследования НДС конструкций при радиационно-термических воздействиях в составе программных средств вычислительного комплекса УПАКС созданного в НИИМ ННГУ [3].

**4. Верификация разработанных моделей, алгоритмов и программных средств** проводилась путем сравнения численных решений ряда тестовых задач с аналитическими решениями и зависимостями, полученными на основе экспериментальных данных.

Во всех тестовых задачах рассматривалось НДС в прямолинейном призматическом стержне, находящемся в условиях равномерно распределенных по объему температурных и нейтронных полей. Один из торцов стержня был закреплен от осевых перемещений, а другой находился под действием равномерно распределенных осевых поверхностных сил. Ввиду однородности распределения НДС по объему стержня численное решение задач строилось для одного пространственного КЭ в виде кубика с ребрами размером  $l = 10$  мм, ориентированными вдоль основных направлений стержня. Процесс нагружения стержня осуществлялся в два этапа. На первом этапе происходил мгновенный нагрев стержня до  $T = 500^\circ\text{C}$  и растяжение нагрузкой интенсивностью  $P$ . На втором этапе в течение временного промежутка  $t$  производилось облучение стержня потоками нейтронов до значения флюенса  $N$ .

В первой задаче принималось  $N = 9,7 \cdot 10^{22}$  н/см<sup>2</sup>,  $P = 250$  МПа,  $t = 400000$  часов. Кроме того предполагалось, что в материале отсутствуют деформации пластичности и термической ползучести, но могут развиваться деформации радиационной ползучести. На рис. 1 приведены графики продольной деформации кубика в зависимости от уровня облучения. Значению  $N = 0$  соответствует деформация,

достигнутая к концу первого этапа нагружения. Аналитические решения [4] изображены сплошной линией, а численные отмеченные точками.

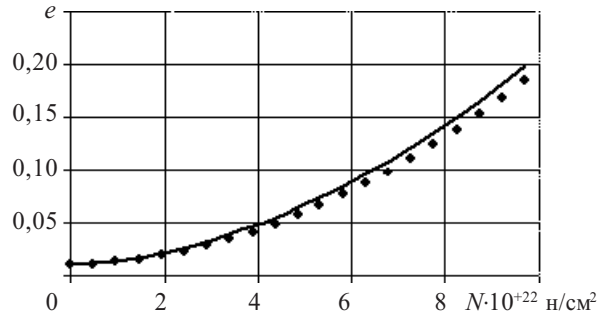


Рис. 1

Во второй задаче принималось  $N = 3,88 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>,  $P = 250$  МПа,  $t = 1600$  часов (такие условия нагружения отвечают условию окончания к концу второго этапа нагружения первой стадии термической ползучести). Предполагалось также, что в материале отсутствуют деформации пластичности и радиационной ползучести, но могут развиваться деформации термической ползучести. На рис. 2 изображены графики деформации термической ползучести в продольном направлении кубика в зависимости от времени. Аналитические решения [4] показаны сплошной линией, а численные отмечены точками.

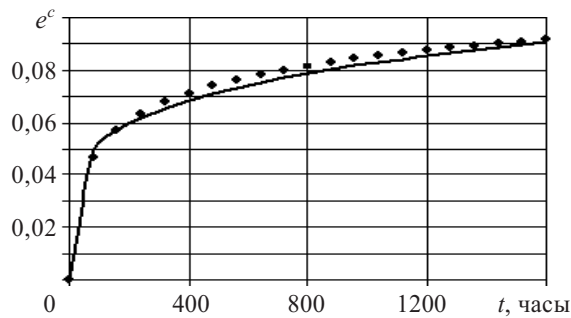


Рис. 2

Для оценки основных эффектов, влияющих на поведение материала в условиях терморadiационных воздействий, рассмотрен пример расчета изменения напряжений в стержне с квадратным сечением, который закреплен по торцам от продольных смещений и находится под действием равномерно распределенных по объему температуры и потока нейтронов, меняющихся согласно следующей последовательности:

начальное состояние –  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $N_0 = 0$  н/см<sup>2</sup>;

промежуточное состояние –  $T_{20} = 500^\circ\text{C}$ ,  $N_{20} = 0$  н/см<sup>2</sup>;

конечное состояние –  $T_{40} = 500^\circ\text{C}$ ,  $N_{40} = 9,7 \cdot 10^{22}$  н/см<sup>2</sup>.

Процесс нагружения включал два этапа (нагрев и последующее облучение), временная протяженность температурного этапа нагружения принималась равной 10 часам, этапа с радиационным воздействием – 400000 часам. Каждый этап нагружения разбивался на 20 подэтапов. Было рассмотрено четыре варианта задачи

с различными предположениями о свойствах материала: 1) учитывается радиационное формоизменение; 2) дополнительно к первому варианту учитывается пластичность; 3) дополнительно к первому варианту учитывается радиационная ползучесть; 4) учитывается радиационное формоизменение, пластичность, радиационная и термическая ползучесть.

На рис. 3 представлены зависимости осевых напряжений от номера подэтапа нагружения, полученные для рассмотренных вариантов задачи (цифра около кривой соответствует номеру варианта).

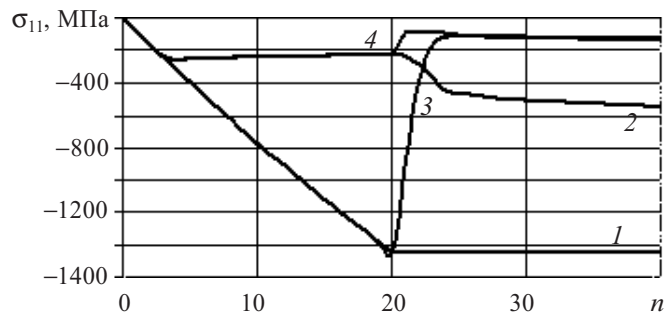


Рис. 3

Результаты решения по первому варианту задачи показывают, что по мере повышения температуры в стержне возникают значительные по величине сжимающие осевые напряжения. При этом появление нейтронного облучения не приводит к их росту, так как скорость радиационного формоизменения, вследствие высокого уровня сжимающих напряжений в стержне после нагрева, равна нулю (см. уравнение (4)).

При учете пластичности в материале стержня, начиная с третьего подэтапа нагружения до момента начала облучения, происходит стабилизация уровня напряжений. С ростом дозы облучения напряжения несколько увеличиваются (по абсолютной величине) за счет формоизменения и повышения предела текучести материала.

Анализ результатов решения третьего варианта задачи позволяет выявить существенную релаксацию напряжений на втором этапе нагружения, что является следствием учета в расчетах деформаций радиационной ползучести. Результаты решения четвертого варианта задачи также демонстрируют существенную релаксацию напряжений в стержне: сначала за счет пластических деформаций, а затем за счет деформаций радиационной и термической ползучести.

На основе приведенных результатов можно сделать вывод о существенном влиянии на процесс деформирования стали X18Н9 всех возникающих при нейтронном облучении эффектов.

Для иллюстрации возможностей практического применения разработанной методики рассмотрим пример расчета напряженно-деформированного состояния несущей обечайки отражателя нейтронов реактора БН, находящейся в условиях пространственных радиационно-термических полей. Конструкция выполнена из стали X18Н9 и имеет следующие геометрические размеры: диаметр 3385 мм, высота 1810 мм, толщина стенки 50 мм. Нижний контур обечайки закреплен от вертикальных перемещений, верхний – свободен. Процесс нагружения обечайки представляется в виде последовательности двух этапов нагружения: температурного



этапа и этапа, соответствующего последующему нейтронному облучению.

Результаты решения показывают, что зона максимальных значений интенсивности напряжений к концу температурного этапа нагружения располагается в районе нижнего фланца. При последующем нейтронном облучении зона максимальных напряжений перемещается в область соединения обечайки с трапециевидной стенкой. Картина распределения интенсивности напряжений (в МПа) на момент времени  $t = 25$  лет приведена на рис. 4.

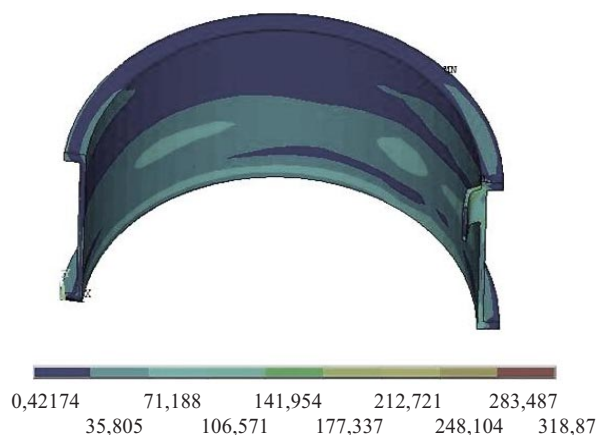


Рис. 4

Для момента времени  $t = 45$  лет, соответствующего концу процесса нагружения, на рис. 5 и 6 представлены соответственно деформированная конфигурация конструкции (с увеличением масштаба перемещений в десять раз) и картина распределения интенсивности напряжений в конструкции (в МПа).

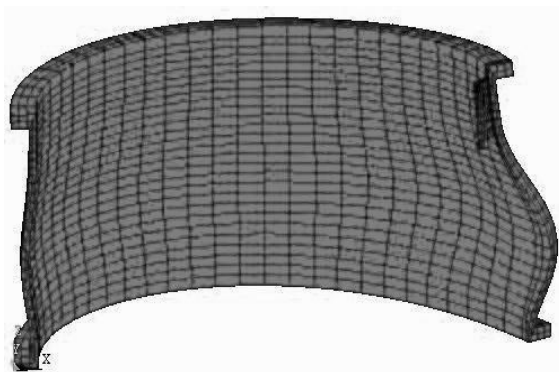


Рис. 5

Анализ представленных результатов показывает, что к концу температурного этапа нагружения уровень напряжений в обечайке невелик по сравнению с напряжениями при последующем нейтронном облучении. Максимальные значения интенсивности напряжений к концу температурного этапа достигают величины  $\sigma_{ii} = 201$  МПа в районе нижнего фланца. При последующем нейтронном облучении зона максимальных напряжений перемещается в область соединения обечайки с

трапецевидной стенкой, где интенсивность напряжений  $\sigma_n$  достигает величины 318 МПа при  $t = 25$  лет и величины 386 МПа при  $t = 45$  лет. Зона максимальных прогибов обечайки для  $t = 25$  лет и  $t = 45$  лет располагается в районе максимального флюенса. В этом же районе наблюдается радиационное утолщение обечайки (примерно на 1% от исходной толщины).

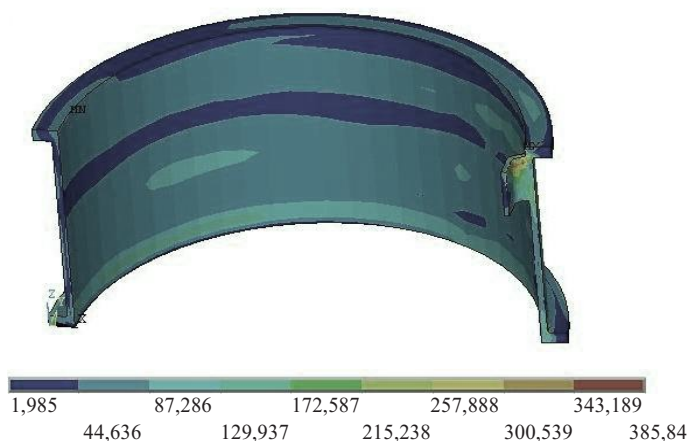


Рис. 6

### Заключение

Представлены методические положения расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов из аустенитных нержавеющей сталей с учетом воздействия пространственных радиационно-термических полей.

Рассмотрены модели поведения конструкционной стали X18H9 при термомеханических воздействиях в условиях нейтронного облучения, алгоритмы реализации предложенной модели в задачах расчета НДС, КЭ-методика решения задач расчета конструкций, подверженных нейтронному облучению.

Приведены примеры расчета НДС конструкций из стали X18H9 от температурного и нейтронного нагружений, выполненные с использованием предложенных моделей, методов и алгоритмов, реализованных в созданной программе.

Методика предназначена для применения в расчетах НДС бокового отражателя реактора на быстрых нейтронах, а также других конструкций из стали X18H9, работающих в условиях высоких температур и флюенсов быстрых нейтронов со сложным пространственным распределением.

### Литература

1. Численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющей сталей в условиях терморadiационных воздействий / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов [и др.] // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 2005. – Вып. 67. – С. 26–36.
2. Капустин, С. А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел. / С. А. Капустин. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 180 с.
3. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.

4. Разработка методики расчета прочности и формоизменения отражателя реактора БН-600 / Б.А. Васильев [и др.] // Material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment: Proc. of the ninth Int. conf. Pushkin - Saint-Peterburg, Russia, 6-8 June 2006. – Saint-Peterburg, 2006. – P. 217–228.

[13.07.2007]

**STUDYING THE STRESSED-STRAINED STATE OF STAINLESS STEEL  
STRUCTURES WORKING UNDER INTENSIVE  
THERMAL-RADIATION LOADING**

**S.A. Kapustin, V.A. Gorokhov, O.Yu. Vilenskiy, V.B. Kaydalov,  
B.Z. Margolin, A.A. Buchatskiy**

The paper examines basic experimental relations and mathematical models describing the main laws of behaviour of stainless steels under intensive thermal-radiation loading, as well as the basic methodological postulates used in the program for analyzing elements and units of supporting structures under quasistatic stress and thermal-radiation loading.