**Овчинников Илья Игоревич**
Ovchinnikov Ilya Igorevich
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, Саратов, ул Политехническая, 77
Доцент/docent
05.23.17 Строительная механика
E-Mail: bridgeart@mail.ru

**Овчинников Игорь Георгиевич**
Ovchinnikov Igor Georgievich
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614600, Пермь, ул. Королева 19.
Профессор/professor
05.23.17
E-Mail: bridgesar@mail.ru

# Исследование влияния жидкометаллической среды на поведение толстостенного трубопровода. 1. Основные соотношения

## Investigation of influence of the liquid metal environment on the behavior of the thick-walled pipe. 1. basic relations

**Аннотация:** Приведены уравнения модели деформирования и разрушения материала, взаимодействующего с жидкими металлами в условиях сложного напряженного состояния. Получены разрешающие уравнения толстостенной трубы, обезуглероживающейся в жидком натрии.

**The Abstract:** The equations of deformation and damage for the material that interacts with liquid metals in a complex stress state are given. Resolving equations of thick-walled tube under decarburization of liquid sodium were obtained.

**Ключевые слова:** Моделирование, ползучесть, накопление повреждений, жидкие металлы, долговечность, толстостенная труба.

**Keywords:** Modeling, creep, damage accumulation, liquid metals, durability, thick-walled pipe.

***

**Введение.** В статьях [1,2] описана модель деформирования и разрушения одномерных конструктивных элементов, подвергающихся обезуглероживанию в жидком натрии, определены значения коэффициентов модели и исследовано поведение стержневого элемента круглого поперечного сечения, взаимодействующего с жидкометаллической средой (натрием).

При описании поведения материала с учетом влияния обезуглероживания полагалось, что полная деформация ε складывается из упругой деформации и деформации ползучести $p$:

$$\varepsilon = \sigma / E + p \,, \tag{1}$$

где $E$- модуль упругости. Уравнения ползучести принимались в виде, описывающем все три стадии ползучести:

$$\frac{dp}{dt} = A \cdot p^{-\alpha} \cdot \left(\frac{\sigma}{1-\mu \cdot \Pi}\right)^k, p(0)=0, p(t_p) = p^*; \tag{2}$$

$$\frac{d\Pi}{dt} = \frac{B \cdot \sigma^n}{(1-\Pi)^{n+S}}, \Pi(0)=0, \Pi(t_p)=1; \tag{3}$$

Здесь $t_p$ – время до разрушения; *A, α, k, B, n, S, μ* – коэффициенты, П – параметр поврежденности.

Влияние обезуглероживания на кинетику деформирования и разрушения учитывалось зависимостью модуля упругости материала *E(C)* и коэффициентов уравнений (2) и (3) от концентрации углерода С в виде:

$$E(C) = b_0 + b_1 C$$

$$A = A_0 \cdot \chi(C)^{-k}, \quad B = B_0 \cdot \chi(C)^{-n}.$$

Здесь $\chi(C)$ отношение предела длительной прочности для образцов с некоторой концентрацией $C$ к пределу длительной прочности образцов с исходной (базовой) концентрацией $C_0$,

$$\chi(C) = 1 - \gamma(C_0 - C_1).$$

Для определения концентрации углерода $C$ в точке конструкции используется уравнение диффузии, которое для случая осесимметричной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial(C_0 - C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(D \cdot \frac{\partial(C_0 - C)}{\partial r}\right) + \frac{1}{r} \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \tag{4}$$

где $r$ - текущий радиус, D – коэффициент диффузии углерода, учитывающий влияние уровня поврежденности материала на кинетику перемещения углерода следующим образом:

$$D(\Pi) = D_o (1 + \alpha \Pi^\beta),$$

где $D_o$ - коэффициент диффузии углерода в неповрежденном материале, α, β – коэффициенты, учитывающие влияние поврежденности П на процесс диффузии, $C_0 - C$ характеризует потери концентрации углерода в точке элемента конструкции.

К уравнению (4) следует присоединить соответствующие начальные и граничные условия.

В работе [2] было исследовано поведение стержневого конструктивного элемента, находящегося в одномерном напряженном состоянии и взаимодействующего с жидкометаллической средой и показаны эффекты, к которым приводит учет влияния обезуглероживания, вызванного действием жидкометаллической среды.

Однако реальные конструкции обычно работают в условиях сложного напряженного состояния, поэтому представляет интерес исследовать влияние жидких металлов на поведение сложнонапряженных конструкций в условиях контакта с жидкими металлами

**1. Учет обезуглероживания при расчете конструкций, находящихся в условиях сложного неоднородного напряженного состояния**

Для расчета элементов конструкций, находящихся в условиях ползучести при сложном неоднородном напряженном состоянии нужно обобщить уравнения (2) и (3) на случай сложного напряженного состояния, а также ввести гипотезу о том, что механические свойства в точке элемента конструкции с концентрацией углерода *C* такие же, как и в образце с однородной концентрацией *C*.

В случае сложного напряженного состояния, уравнения (2) и (3) принимают вид:

$$dp_u / dt = A \cdot p_u^{-\alpha} \left(\frac{\sigma_u}{1-\Pi}\right)^k, \; p(0) = 0, \tag{5}$$

$$d\Pi / dt = B \cdot \sigma_{экв}^n / (1-\Pi)^{n+S}, \; \Pi(0) = 0, \Pi(t_p) = 1. \tag{6}$$

Здесь $p_u$ – интенсивность деформаций ползучести; $\sigma_u$ – интенсивность напряжений; $\sigma_{экв}$ – эквивалентное напряжение. Для приращений компонент тензора деформаций ползучести справедливы следующие уравнения:

$$\frac{dp_x}{dt} = \frac{\sigma_x - 0{,}5 \cdot (\sigma_y + \sigma_z)}{\sigma_u} \cdot \frac{dp_u}{dt},$$

$$\frac{dp_y}{dt} = \frac{\sigma_y - 0{,}5 \cdot (\sigma_x + \sigma_z)}{\sigma_u} \cdot \frac{dp_u}{dt},$$

$$\frac{dp_z}{dt} = \frac{\sigma_z - 0{,}5 \cdot (\sigma_x + \sigma_y)}{\sigma_u} \cdot \frac{dp_u}{dt},$$

$$\frac{dp_{xy}}{dt} = \frac{3 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_u} \cdot \frac{dp_u}{dt}, \qquad \frac{dp_{xz}}{dt} = \frac{3 \cdot \tau_{xz}}{\sigma_u} \cdot \frac{dp_u}{dt}, \; \frac{dp_{yz}}{dt} = \frac{3 \cdot \tau_{yz}}{\sigma_u} \cdot \frac{dp_u}{dt},$$

где $p_x$, $p_y$, $p_z$, $p_{xy}$, $p_{xz}$, $p_{yz}$ – компоненты деформаций ползучести $\sigma_x$, $\sigma_y$, $\sigma_z$, $\tau_{xy}$, $\tau_{xz}$, $\tau_{yz}$ – компоненты тензора напряжений.

В качестве эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ для длительного статического нагружения и в условиях сложного напряженного состояния обычно используют критерии эквивалентных напряжений И.А.Биргера [3], А.Джонсона [4], В.П.Сдобырева [5], И.И.Трунина [4] и других [6,7].

Такой подход позволяет свести действие сложного напряженного состояния к действию одноосного растягивающего напряжения. Выбор конкретного вида эквивалентного напряжения обычно опирается на оценку разрушения при сложном напряженном состоянии и учитывает характер разрушения – вязкое, хрупкое, смешанное. Для элементов конструкций подвергающихся обезуглероживанию под воздействием жидкого металла характерно увеличение пластичности, поэтому в дальнейшем для них в качестве эквивалентного напряжения разумно использовать интенсивность напряжений, которая обычно применяется как критерий прочности в случае вязкого разрушения.

Трубчатые элементы конструкций являются основными конструктивными элементами теплообменного оборудования с жидкометаллическими теплоносителями. Условия эксплуатации таких конструкций предполагают длительное совместное воздействие механических нагрузок, высокой температуры и жидкометаллической среды.

## 2. Моделирование поведения толстостенной трубы в условиях осесимметричной деформации, взаимодействующей с жидкометаллической средой

Рассмотрим толстостенную трубу с внутренним радиусом $R_a$; наружным радиусом $R_b$, находящуюся под действием внутреннего давления $q_a$ и наружного давления $q_b$ . Жидкометаллическая среда находится снаружи трубы. Полагая, что труба отнесена к цилиндрической системе координат $r$, $\theta$, $z$ запишем физические соотношения в приращениях, при этом будем считать, что приращения полных деформаций складываются из приращений упругих и температурных деформаций и деформаций ползучести

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_r &= \Delta\varepsilon_r^y + \Delta\varepsilon_r^T + \Delta p_r; \\ \Delta\varepsilon_\Theta &= \Delta\varepsilon_\Theta^y + \Delta\varepsilon_\Theta^T + \Delta p_\Theta; \\ \Delta\varepsilon_z &= \Delta\varepsilon_z^y + \Delta\varepsilon_z^T + \Delta p_z; \end{aligned} \tag{7}$$

$\Delta\varepsilon_r^y, \Delta\varepsilon_\Theta^y, \Delta\varepsilon_z^y$ – соответственно приращения радиальной, окружной и осевой упругих деформаций, которые определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_r^y &= \frac{1}{E}\cdot\Delta\sigma_r - \frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_\Theta - \frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_z - \frac{\sigma_r - \nu\cdot(\sigma_\Theta + \sigma_z)}{E^2}\cdot\Delta E; \\ \Delta\varepsilon_\Theta^y &= \frac{1}{E}\cdot\Delta\sigma_\Theta - \frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_r - \frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_z - \frac{\sigma_\Theta - \nu\cdot(\sigma_r + \sigma_z)}{E^2}\cdot\Delta E; \\ \Delta\varepsilon_z^y &= \frac{1}{E}\cdot\Delta\sigma_z - \frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_z - \frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_\Theta - \frac{\sigma_z - \nu\cdot(\sigma_r + \sigma_\Theta)}{E^2}\cdot\Delta E; \end{aligned} \tag{8}$$

где $\sigma_r, \sigma_\Theta, \sigma_z$ – соответствующие напряжения, ν – коэффициент Пуассона, $E = E(C, T)$ – модуль упругости, зависящий от концентрации углерода и температуры; $\Delta\varepsilon_r^T, \Delta\varepsilon_\Theta^T, \Delta\varepsilon_z^T$ – соответственно приращения температурных деформаций, причем:

$$\Delta\varepsilon_r^T = \Delta\varepsilon_\Theta^T = \Delta\varepsilon_z^T = T\cdot\Delta\alpha + \alpha\cdot\Delta T \tag{9}$$

$\Delta p_r, \Delta p_\Theta, \Delta p_z$ – соответственно приращения радиальной, окружной и осевой деформаций ползучести, определяемые выражениями:

$$\Delta p_r = \frac{\sigma_r - 0{,}5 \cdot (\sigma_\Theta + \sigma_z)}{\sigma_u} \cdot \Delta p_u;$$

$$\Delta p_\Theta = \frac{\sigma_\Theta - 0{,}5 \cdot (\sigma_r + \sigma_z)}{\sigma_u} \cdot \Delta p_u; \tag{10}$$

$$\Delta p_z = \frac{\sigma_z - 0{,}5 \cdot (\sigma_r + \sigma_\Theta)}{\sigma_u} \cdot \Delta p_u;$$

Приращения интенсивности деформаций ползучести $\Delta p_u = p(t_i) - p(t_{i-1})$ за шаг времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ определяются из кинетических уравнений ползучести (5) и накопления повреждений (6). Записывая физические соотношения (7) с учетом (8), (9), (10), имеем:

$$\Delta\varepsilon_r \frac{1}{E} \cdot \Delta\sigma_r - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_\Theta - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_z - \frac{\sigma_r - \nu \cdot (\sigma_\Theta + \sigma_z)}{E^2} \Delta E +$$

$$+ \frac{\sigma_r - 0{,}5 \cdot (\sigma_\Theta + \sigma_z)}{\sigma_u} \cdot \Delta p_u + T \cdot \Delta\alpha + \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta\varepsilon_\Theta \frac{1}{E} \cdot \Delta\sigma_\Theta - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_r - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_z - \frac{\sigma_\Theta - \nu \cdot (\sigma_r + \sigma_z)}{E^2} \Delta E +$$

$$+ \frac{\sigma_\Theta - 0{,}5 \cdot (\sigma_r + \sigma_z)}{\sigma_u} \cdot \Delta p_u + T \cdot \Delta\alpha + \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta\varepsilon_z \frac{1}{E} \cdot \Delta\sigma_z - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_r - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_\Theta - \frac{\sigma_z - \nu \cdot (\sigma_r + \sigma_\Theta)}{E^2} \Delta E +$$

$$+ \frac{\sigma_z - 0{,}5 \cdot (\sigma_r + \sigma_\Theta)}{\sigma_u} \cdot \Delta p_u + T \cdot \Delta\alpha + \alpha \cdot \Delta T. \tag{11}$$

Полагая, что $\varepsilon_z = 0$ или $\Delta\varepsilon_z = 0$ получим из (11):

$$\Delta\sigma_z = \nu \cdot (\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\Theta) + \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\Theta)}{E} \Delta E - \frac{E}{\sigma_u} (\sigma_z - 0{,}5 \cdot (\sigma_r + \sigma_\Theta)) \Delta p_u -$$

$$- E \cdot (T \cdot \Delta\alpha + \alpha \cdot \Delta T). \tag{12}$$

Подставляя теперь (12) в первые два выражения из (11), имеем:

$$\Delta\varepsilon_r = \frac{1}{E} \cdot \Delta\sigma_r - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_\Theta - \frac{\nu^2}{E} \cdot \Delta\sigma_r - \frac{\nu^2}{E} \cdot \Delta\sigma_\Theta -$$

$$- \frac{\nu}{E^2} \cdot (\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\Theta)) \cdot \Delta E + \frac{\nu}{\sigma_u} (\sigma_z - 0{,}5 \cdot (\sigma_r + \sigma_\Theta)) \Delta p_u +$$

$$+\nu\cdot(T\cdot\Delta\alpha+\alpha\cdot\Delta T)-\frac{\sigma_r-\nu\cdot(\sigma_\Theta+\sigma_z)}{E^2}\cdot\Delta E+\frac{\sigma_r-0{,}5\cdot(\sigma_\Theta+\sigma_z)}{\sigma_u}\cdot\Delta p_u+$$
$$+T\cdot\Delta\alpha+\alpha\cdot\Delta T \qquad (13)$$

$$\Delta\varepsilon_\Theta=\frac{1}{E}\cdot\Delta\sigma_\Theta-\frac{\nu}{E}\cdot\Delta\sigma_r-\frac{\nu^2}{E}\cdot\Delta\sigma_r-\frac{\nu^2}{E}\cdot\Delta\sigma_\Theta-\frac{\nu}{E^2}\cdot(\sigma_z-0{,}5\cdot(\sigma_r+\sigma_\Theta))\Delta E+$$
$$+\frac{\nu}{\sigma_u}\cdot(\sigma_z-0{,}5\cdot(\sigma_z+\sigma_\Theta))\cdot\Delta p_u+\nu\cdot(T\cdot\Delta\alpha+\alpha\cdot\Delta T)-$$
$$-\frac{\sigma_\Theta-\nu\cdot(\sigma_r+\sigma_z)}{E^2}\cdot\Delta E+\frac{\sigma_\Theta-0{,}5\cdot(\sigma_r+\sigma_z)}{\sigma_u}\cdot\Delta p_u+T\cdot\Delta\alpha+\alpha\cdot\Delta T \qquad (14)$$

Уравнения равновесия в приращениях в данном случае имеет вид:

$$\frac{d\Delta\sigma_r}{dr}+\frac{\Delta\sigma_r-\Delta\sigma_\Theta}{r}=0 \qquad (15)$$

Откуда получим выражение для $\Delta\sigma_\Theta$ :

$$\Delta\sigma_\Theta=\Delta\sigma_r+r\cdot\frac{d\Delta\sigma_r}{dr}\quad . \qquad (16)$$

Подставляя выражения (13) в уравнения неразрывности деформаций, которое в приращениях записывается так:

$$\frac{d\Delta\varepsilon_\Theta}{dr}=\frac{\Delta\varepsilon_r-\Delta\varepsilon_\Theta}{r} \qquad (17)$$

и принимая во внимание (16), после некоторых преобразований получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2\Delta\sigma_r}{d^2r}+P(r)\cdot\frac{d\Delta\sigma_r}{dr}+Q(r)\cdot\Delta\sigma_r=F(r), \qquad (18)$$

где обозначено

$$P(r)=\frac{3}{r}-\frac{1}{E}\cdot\frac{dE}{dr}, \qquad (19)$$

$$Q(r)=-\frac{1}{E\cdot r\cdot(1-\nu^2)}\cdot(1-\nu-2\cdot\nu^2)\cdot\frac{dE}{dr}\quad , \qquad (20)$$

$$F(r)=F_1(r)\cdot\Delta E+F_2(r)\cdot\Delta P_u+F_3(r)\cdot\Delta T+F_4(r)\cdot\Delta\alpha+$$
$$+F_5(r)\cdot\frac{d\Delta E}{dr}+F_6(r)\cdot\frac{d\Delta P_u}{dr}+F_7(r)\cdot\frac{d\Delta T}{dr}+F_8(r)\cdot\frac{d\Delta\varepsilon}{dr}, \qquad (21)$$

Здесь

$$F_1(r)=(\frac{1}{E\cdot(\nu-1)\cdot r^2}+\frac{2\cdot\nu}{E^2\cdot(1-\nu^2)\cdot r}\cdot\frac{dE}{dr})\sigma_r+(\frac{1}{E\cdot(1-\nu)\cdot r^2}+\frac{2\cdot(\nu-1)}{E^2\cdot(1-\nu^2)\cdot r}\cdot\frac{dE}{dr})\sigma_\Theta+$$

$$+(\frac{\nu}{E\cdot(\nu^2-1)\cdot r})\cdot\frac{d\sigma_r}{dr}+(\frac{1}{E\cdot(1+\nu)\cdot r})\cdot\frac{d\sigma_\Theta}{dr},$$

$$F_2(r)=(\frac{3\cdot E}{2\cdot(1-\nu^2)\cdot\sigma_u^2\cdot r})\cdot(\sigma_r-\sigma_\Theta)+(\frac{E}{\sigma_u^2\cdot(\nu-1)\cdot r}\cdot\frac{d\sigma_u}{dr})\cdot\sigma_r+$$

$$+(\frac{E\cdot(2-\nu)}{2\cdot(1-\nu^2)\cdot\sigma_u^2\cdot r}\cdot\frac{d\sigma_u}{dr})\cdot\sigma_\Theta+(\frac{E\cdot(2\cdot\nu-1)}{2\cdot(1-\nu^2)\cdot\sigma_u^2\cdot r}\cdot\frac{d\sigma_u}{dr})\cdot\sigma_z+$$

$$+(\frac{E\cdot(1-2\cdot\nu)}{2\cdot(1-\nu^2)\cdot\sigma_u\cdot r})\cdot\frac{d\sigma_z}{dr}, \qquad (22)$$

$$F_3(r)=\frac{E}{(\nu-1)\cdot r}\cdot\frac{d\alpha}{dr}, \qquad F_4(r)=\frac{E}{(\nu-1)}\cdot\frac{dT}{dr},$$

$$F_5(r)=\frac{\nu\cdot\sigma_r+(\nu-1)\cdot\sigma_\Theta}{E\cdot(\nu-1)\cdot r}, \quad F_6(r)=\frac{(1+\nu)\cdot\sigma_r+(\nu-2)\cdot\sigma_\Theta+(1-2\cdot\nu)\cdot\sigma_z}{(1-\nu^2)\cdot\sigma_u\cdot r}\cdot E,$$

$$F_7(r)=\frac{\alpha\cdot E}{(\nu-1)\cdot r}, \qquad F_8(r)=\frac{T\cdot E}{(\nu-1)\cdot r}.$$

Граничные условия для уравнения (18) имеют вид:

$$r=R_a, \Delta\sigma_r=0; \quad r=R_b, \Delta\sigma_r=0. \qquad (23)$$

Уравнение (18) с граничными условиями (23) является основным разрешающим уравнением, описывающим деформирование и разрушение толстостенной трубы, взаимодействующей с жидкометаллической средой на шаге по времени $\Delta t$. Для получения полной системы разрешающих уравнений к уравнению (18) с граничными условиями (23) следует присоединить уравнения (5) и (6), описывающие кинетику процессов ползучести и накопления повреждений, уравнение диффузии углерода (4), закон распределения температуры по толщине трубы (или уравнение теплопроводности) и зависимости $E=E(C,T)$, $\alpha=\alpha(C,T)$ и зависимости коэффициентов выражений (5) и (6) от *C* и *T*. К каждой группе уравнений следует добавить соответствующие граничные и (или) начальные условия.

**Вывод.** Получена система разрешающих уравнений, описывающих кинетику ползучести и накопления повреждений материала в условиях сложного напряженного состояния. С использованием этих уравнений получены уравнения деформирования и разрушений толстостенной трубы, подвергающейся обезуглероживанию вследствие контакта с жидким металлом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И. Построение и идентификация модели деформирования и разрушения металлов, взаимодействующих с жидкометаллической средой // Интернет-журнал «Науковедение» 2012, № 3, с. 1- 11.

2. Овчинников И.И. Моделирование поведения стержневого элемента, взаимодействующего с жидкометаллической средой// Интернет-журнал «Науковедение» 2012, № 3, с. 1-11.

3. Термопрочность деталей машин / Под ред. И.А.Биргера и Б.Ф.Шорра. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.

4. Писаренко Г.С, Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. - Киев: Наукова думка, I976. - 415 с.

5. Сдобырев В.П. Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. - 1959. - № 6. - с.93-99.

6. Кац Ш.Н. Исследование длительной прочности углеродистых труб// Теплоэнергетика. - 1955. - № 11. - с. 37-40. .

7. Стасенко И.В. Установившаяся ползучесть толстостенной трубы // Изв. вузов: Машиностроение. – 1974. – № 2. – с. 14-17.

8. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Исследование влияния жидкометаллической среды на поведение толстостенного трубопровода. 1**.** Основные соотношения// Интернет-журнал «Науковедение» 2012, № 4.

9. Калиткин Н.Н. Численные методы. - М.: Наука, 1978. - 512 с.

10. На Ц. Вычислительные методы решения прикладных граничных задач: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 296 с.

11. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. - М.: Наука, 1975. - 227 с.

12. Коренев В.Г. Задачи теории теплопроводности и термоупругости. - М.: Наука, 1980. - 400 с.

13. Лыков Д.З. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 595 с.

14. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. - Киев: Наукова думка, 1982. - 360 с.

15. Степанов Р.Д., Шленский О.Ф. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах. - М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.

16. Овчинников И.Г., Салихов А.Ю. Нелинейный анализ толстостенного цилиндра методом последовательных возмущений параметров // Строительная механика и расчет сооружений, 1992, № 1

17. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии. Изд-во СГТУ. Саратов, 2003. 176 с.

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