

УДК 539.4 + 539.376

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И РАЗРУШЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНО ПРОГРЕТОГО ТОЛСТОСТЕННОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ

С. А. Бубнов<sup>1</sup>, И. Г. Овчинников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балашовский институт (филиал)

Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского,  
412300, Балашов, Саратовская обл., ул. Карла Маркса, 29.

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина,  
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mails: serbubnov@rambler.ru, bridgesar@sstu.ru

*Рассматривается методика расчёта ползучести и разрушения толстостенного трубопровода в условиях относительно высоких температур и воздействия водорода. Локальный характер задачи обеспечивается за счёт локального воздействия температуры на внешнюю поверхность трубы. Рассмотрен случай линейного увеличения температуры локальной зоны с течением времени. Для определения момента разрушения применяется теория накопленных повреждений в форме Ю. Н. Работнова.*

**Ключевые слова:** локальные прогрев, неоднородное температурное поле, толстостенный трубопровод, параметр химического взаимодействия, водородная коррозия, разрушение, ползучесть, метод конечных элементов.

**Введение.** Толстостенные трубопроводы, применяемые в химической промышленности, в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных факторов: температурного поля, давления транспортируемой среды, химического воздействия и т.д. В частности, в роли химического реагента может выступать водородсодержащая среда или сам водород. Исследованию влияния водорода на материалы конструктивных элементов посвящено много работ [1, 2 и др.]. Проникание водорода в сечение конструктивного элемента сопровождается необратимыми процессами, результатом которых является изменение свойств материала (в большинстве случаев — в худшую сторону). Интересны случаи локального воздействия температуры (например, в результате аварии нагревается какой-либо участок трубопровода). Компьютерное моделирование процессов деформирования и разрушения конструктивных элементов, находящихся в условиях водородной коррозии, является актуальным на сегодняшний день в силу перспективного использования водорода как экологически чистого топлива.

**1. Модель деформирования и разрушения конструкций в условиях водородной коррозии.** Одни из первых способов расчёта таких конструкций заключались в использовании формул для расчёта теплосилового оборудования с дополнительным введением коэффициентов запаса для компенсации более тяжёлых условий работы металлов в водородсодержащей среде. Если в процессе эксплуатации происходило частичное обезуглероживание стенки аппарата, то оно учитывалось в расчётах или добавкой к расчётной толщине

---

*Сергей Алексеевич Бубнов, аспирант, каф. прикладной информатики. Игорь Георгиевич Овчинников (д.т.н., проф.), профессор, каф. мостов и транспортных сооружений.*

на глубину обезуглероживания, или уменьшением допускаемых напряжений, используемых при расчётах конструкций, работающих в неагрессивных средах [3]. Также полагалось [4], что обезуглероженный слой сохраняет приблизительно 60% первоначальной прочности. Более детальное исследование процесса водородной коррозии И. Г. Овчинниковым с соавторами [5, 6 и др.] показало некорректность обозначенного выше подхода. Среди многочисленных моделей деформирования и разрушения элементов конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии обратимся с модели И. Г. Овчинникова и А. Ю. Салихова [5–8 и др.]. К основным уравнениям напряжённо-деформированного состояния добавляются уравнения теории накопления повреждений Ю. Н. Работнова:

$$\frac{d\Pi}{dt} = F(\sigma_{\text{экв}}, T, \Pi, \mu),$$

где  $\Pi$  — скалярный параметр повреждённости, изменяющийся от 0 до 1;  $\sigma_{\text{экв}}$  — эквивалентное напряжение;  $T, \mu$  — соответственно температура и параметр химического взаимодействия. Параметр  $\mu$  подчиняется уравнению химического взаимодействия:

$$\frac{d\mu}{dt} = \varphi(\mu, \Pi, T, P),$$

в котором  $P$  — давление водорода в точке конструкции. Его можно определить, решив задачу диффузии с соответствующими граничными и начальными условиями, либо задать фронтом. Переход от концентрации к давлению можно осуществить с помощью закона Генри [9]. Для случая толстостенной трубы внутренним радиусом  $R_1 = 0,0055$  м, наружным —  $R_2 = 0,008$  м, находящейся под внутренним давлением водорода и имеющей участок локального прогрева на наружной поверхности (рис. 1), уравнение накопления повреждений примем в виде

$$\frac{d\Pi}{dt} = a \left[ \frac{\sigma_{\text{экв}}}{1 - \Pi} \right]^b, \quad (1)$$

где  $a, b$  — коэффициенты, в общем случае зависящие от температуры  $T$  и параметра химического взаимодействия  $\mu$ . Эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экв}}$  в

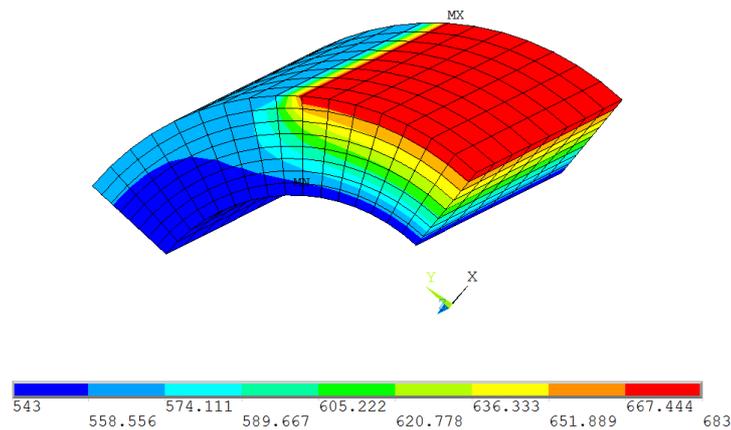


Рис. 1. Фрагмент толстостенной трубы с локальным прогревом и нанесённой конечно-элементной сеткой

условиях водородной коррозии будет зависеть от уровня обезуглероживания материала, т.е. от параметра  $\mu$ . Эту зависимость можно представить в виде [10]

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^0 - (\sigma_{\text{экв}}^0 - \sigma_{\text{экв}}^1)\chi(\mu),$$

где  $\sigma_{\text{экв}}^0$  — эквивалентное напряжение для материала в исходном состоянии,  $\sigma_{\text{экв}}^1$  — эквивалентное напряжение для материала в полностью обезуглероженном состоянии. Параметр  $\chi(\mu)$  введён для нормировки параметра химического взаимодействия  $\mu$ , чтобы он изменялся от 0 до 1:

$$\chi(\mu) = \frac{\mu - \mu_0}{1 - \mu_0}.$$

Значение величины  $\mu_0$  определяется на основе экспериментальных данных по кинетике скорости выделения метана [10].

В качестве  $\sigma_{\text{экв}}^0$  можно выбрать следующие выражения:  $\sigma_{\text{экв}}^0 = \sigma_{\text{max}} = \sigma_1$ ,  $\sigma_{\text{экв}}^0 = \sigma_{\text{и}}$ ,  $\sigma_{\text{экв}}^0 = 0,5(\sigma_1 + \sigma_{\text{и}})$ . Здесь  $\sigma_1$  — наибольшее главное напряжение,  $\sigma_{\text{и}}$  — интенсивность напряжения. Выбор выражения для конкретного случая может быть осуществлен на основе методики, изложенной в [11]. Зависимость коэффициентов  $a$  и  $b$  в уравнении (1) от параметра  $\mu$  полагается линейной.

При неравномерном распределении тепла по объёму конструктивного элемента, равно как и в случае локального прогрева, учёт температурной зависимости в упругих характеристиках материала является необходимым. Уравнения теории упругости становятся уравнениями с переменными коэффициентами. Их решение аналитическим путём становится затруднительным, поэтому в работе используется метод конечных элементов.

**2. Уравнения напряженно-деформированного состояния толстостенной трубы, подвергающейся воздействию водорода.** Рассмотрим поведение толстостенной трубы, находящейся под внутренним давлением водорода, и неравномерного, но осесимметричного нагрева. Отнесём трубу к цилиндрической системе координат. Тогда уравнения равновесия, упругости и совместности деформаций будут иметь следующий вид [12]:

$$\begin{aligned} r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta &= 0, \\ \varepsilon_r &= (\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) / E + \beta T, \\ \varepsilon_\theta &= (\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) / E + \beta T, \\ \frac{d}{dr}(\varepsilon_\theta r) &= \varepsilon_r, \quad \varepsilon_z = \text{const}, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\beta$  — коэффициент теплового расширения.

Уравнение параметра химического взаимодействия конкретизируется:

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dt} &= k(1 - \mu)\mu; \\ k(P, T) &= (P^m/s) \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \ln\left(\frac{g_0}{g_{\text{н}}}\right), \\ g_0 &= (1 - \mu_0)/\mu_0, \quad g_{\text{н}} = (1 - \mu_{\text{н}})/\mu_{\text{н}}. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь  $P$  — давление водорода;  $T$  — температура;  $m, s, T_0$  — коэффициенты, определяемые на основе экспериментальных данных ( $m = 1,73, s = 1,48 \times 10^{-5}$  (МПа) $^m \cdot \text{ч}, T_0 = 13500$  K);  $\mu_0, \mu_{\text{п}}$  — соответственно начальное и пороговое значения параметра химического взаимодействия. По результатам экспериментов было сделано предположение о независимости значений  $\mu_0, \mu_{\text{п}}$  от давления и температуры [10]. Для стали 20 они имеют следующие значения:  $\mu_0 = 0,17, \mu_{\text{п}} = 0,218$ .

В условиях воздействия водорода и высоких температур неизбежен эффект ползучести, следовательно, полные деформации будут состоять из упругих, температурных и деформаций ползучести. К правой части уравнений для радиальных и осевых деформаций в (2) следует добавить и деформации ползучести  $p_r$  и  $p_{\theta}$  соответственно, определяемые путём решения дифференциальных уравнений

$$\frac{dp_r}{dt} = B p_{\text{и}}^{-\alpha} \sigma_{\text{и}}^{n-1} \left( \sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_{\theta} + \sigma_z) \right), \quad \frac{dp_{\theta}}{dt} = B p_{\text{и}}^{-\alpha} \sigma_{\text{и}}^{n-1} \left( \sigma_{\theta} - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_z) \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{и}}$  — интенсивность напряжений;  $p_{\text{и}}$  — интенсивность деформаций ползучести.

Величины  $a, b$  в (1),  $E, \nu$  в (2) и  $B, \alpha$  и  $n$  в (4) зависят от уровня обезуглероживания материала:

$$\begin{aligned} a &= a_0 \exp\left(\chi(\mu) \ln \frac{a_1}{a_0}\right), & b &= b_0 - \chi(\mu)(b_0 - b_1); \\ E &= E_0 - \chi(\mu)(E_0 - E_1), & \nu &= \nu_0 - \chi(\mu)(\nu_0 - \nu_1); \\ B &= B_0 \exp\left(\chi(\mu) \ln \frac{B_1}{B_0}\right), & \alpha &= \alpha_0 - \chi(\mu)(\alpha_0 - \alpha_1), & n &= n_0 - \chi(\mu)(n_0 - n_1). \end{aligned}$$

Значения коэффициентов  $E_0, E_1, B_0, B_1, a_0, a_1, \nu_0, \nu_1, \alpha_0, \alpha_1, n_0, n_1, b_0, b_1$  получены для материала трубы (сталь 20) на основании экспериментальных данных и приведены в таблице. Здесь коэффициент с индексом 0 соответствует исходному состоянию материала, а с индексом 1 — полностью обезуглероженному.

Величина	Значение величины	
	Сталь в исходном состоянии	Сталь в обезуглероженном состоянии
$E$ , МПа	177000	141600
$B$ , (МПа) $^{-n}$ /ч	$2,306 \cdot 10^{-17}$	$1,662 \cdot 10^{-46}$
$a$ , (МПа) $^{-b}$ /ч	$3,069 \cdot 10^{-24}$	$5,635 \cdot 10^{-29}$
$\nu$	0,34	0,30
$\alpha$	0	0
$n$	6,58	21,85
$b$	9,66	13,16

При  $k = \text{const}$  уравнение (3) имеет аналитическое решение. В нашем случае данный коэффициент зависит как от давления  $P$ , так и от температуры  $T$ . При локальном прогреве получить аналитическую формулу распределения теплового поля по объёму конструктивного элемента затруднительно, поэтому уравнение (3) решается шаговым методом. Для нахождения поля температуры на каждом временном шаге используется программный комплекс ANSYS,

реализующий метод конечных элементов с двадцатиузловым конечным элементом Solid90 [13].

**3. Этапы решения.** В случае локального неосесимметричного прогрева трубы определить напряжённо-деформированное состояние рассматриваемой толстостенной трубы с использованием уравнений (2) невозможно. Поэтому для расчётного анализа используется метод конечных элементов в перемещениях (программный комплекс ANSYS). При решении задачи реализуется нижеследующая последовательность этапов.

1. Построение геометрической модели исследуемого объекта.
2. Расчленение модели на конечные элементы и выбор функций формы элемента. Этот этап аналогичен нанесению расчётной сетки в методе конечных разностей. Заметим, что здесь необходимо учесть два противоречивых фактора: с одной стороны, точность расчёта можно повысить за счёт увеличения числа элементов (большей густоты сетки), с другой — ресурсов ЭВМ, на которой будет производиться расчёт модели, ограниченны. При использовании готового программного комплекса базисные функции определяются вместе с выбором типа элемента из библиотеки конечных элементов программы.
3. Построение матрицы жёсткости и преобразование нагрузки с геометрической модели на конечно-элементную (для каждого конечного элемента). С этой целью для каждого элемента и всей конструкции в целом применяется как аналитическое, так и численное интегрирование в зависимости от вида функций формы. В условиях водородной коррозии расчёт матрицы жёсткости необходим на каждом временном шаге в силу изменения упругих характеристик со временем.
4. Построение, решение канонических уравнений с учётом зависимости упругих характеристик материала от параметра химического взаимодействия и определение узловых неизвестных (перемещений), а также их производных (деформаций, напряжений) как в пределах элемента, так и по всему объёму конструкции.
5. Анализ результатов моделирования и оценка погрешности метода.

**4. Анализ результатов моделирования и оценка погрешности метода.** В результате расчётного анализа поведения толстостенного трубопровода в условиях воздействия водорода и неоднородного нестационарного поля температур (температура локальной зоны линейно возрастает от  $T_1 = 750$  К до  $T_2 = 800$  К) получены зависимости радиальных, окружных и осевых компонент тензора напряжений в срединной поверхности от времени пребывания образца в агрессивной среде, представленные на рис. 2, 3. Из приведённых данных видно, что водород, проникающий в материал конструктивного элемента, оказывает влияние на напряжённое состояние. Причём чем выше его давление, тем быстрее происходит перераспределение напряжений, т. е. быстрее изменяются свойства материала.

Параметр повреждённости достигает своего предельного значения напротив зоны локального прогрева на внутренней поверхности трубы. Для оценки погрешности метода конечных элементов предполагалось, что если результаты, полученные в точках интегрирования, и результаты, аппроксимированные на узлы конечно-элементной модели, отличаются не более чем на 10%,

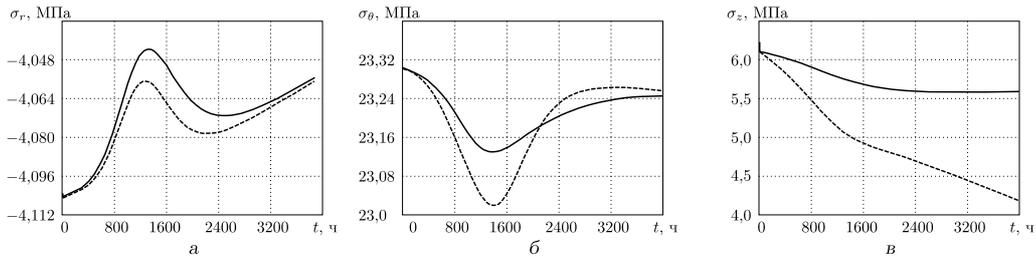


Рис. 2. Радиальные (а), окружные (б) и осевые (в) напряжения при внутреннем давлении 15 МПа: сплошная линия — «холодная» зона; штриховая линия — зона локального прогрева

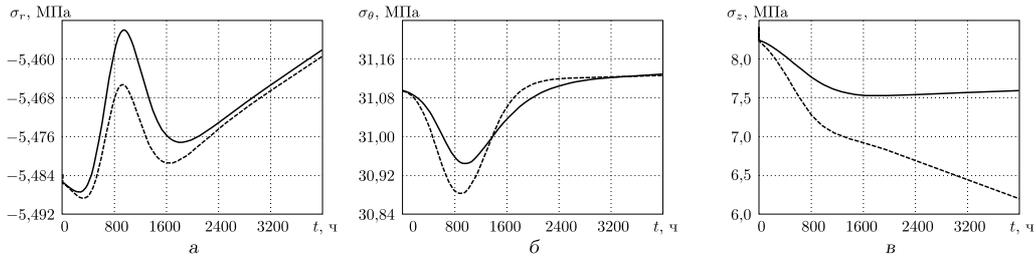


Рис. 3. Радиальные (а), окружные (б) и осевые (в) напряжения при внутреннем давлении 20 МПа: сплошная линия — «холодная» зона; штриховая линия — зона локального прогрева

то сетку можно считать достаточно мелкой [15]. При разбиении на 1024 конечных элемента погрешность определения напряжений составила 1,2 %, что является вполне приемлемой величиной.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. М.: Metallurgiya, 1985. 192 с. [Archakov Yu. I. Hydrogen Corrosion of Steel. Moscow: Metallurgiya, 1985. 192 pp.]
2. Колачев Б. А. Водородная хрупкость цветных металлов. М.: Metallurgiya, 1985. 217 с. [Kolachev B. A. Hydrogen Brittleness of Non-Ferrous Metals. Moscow: Metallurgiya, 1985. 217 pp.]
3. Асвилян М. Б. К вопросу расчёта и установление сроков службы труб, работающих при высоких температурах и давлениях водорода / В сб.: *Влияние водорода на служебные свойства стали*. Иркутск: Иркутск. книж. изд-во, 1963. С. 78–84. [Asviyan M. B. On the problem for investigation and finding life span for tubes exposed high temperatures and high hydrogen pressures / In: *Effect of Hydrogen on the Service Properties of Steel*. Irkutsk: Irkutsk. Knizh. Izd-vo, 1963. Pp. 78–84].
4. Арчаков Ю. И. Водородоустойчивость стали. М.: Metallurgiya, 1978. 152 с. [Archakov Yu. I. Hydrogen Resistance of Steel. Moscow: Metallurgiya, 1978. 152 pp.]
5. Овчинников И. Г., Салихов А. Ю. Деформирование и разрушение толстостенной цилиндрической оболочки, подвергающейся высокотемпературной водородной коррозии / В сб.: *Расчет элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред*: Межвуз. науч. сб.. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1985. С. 3–7. [Ovchinnikov I. G., Salikhov A. Yu. Deformation and failure of a thick-wall cylindrical shell subjected to high-temperature hydrogen corrosion / In: *Calculation of Structural Elements Exposed to Aggressive Media*. Saratov: Sarat. Politekh. In-t, 1985. Pp. 3–7].
6. Овчинников И. Г., Салихов А. Ю. Работоспособность трубчатых элементов конструкций, подвергающихся водородной коррозии / В сб.: *Расчет и управление надежностью больших механических систем*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 143–144. [Ovchinnikov I. G., Salikhov A. Yu. Efficiency of exposed to hydrogen corrosion tubular

- structures / In: *Calculation and control reliability of large mechanical systems*. Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1986. Pp. 143-144].
7. Овчинников И. Г., Салихов А. Ю. Исследование модели деформирования и разрушения конструктивных элементов при высоких температурах и давлениях водорода. Ч. 1. Случай всестороннего давления. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1984. 35 с. (Деп. в ВИНТИ 26.04.84. № 446–84) [Ovchinnikov I. G., Salikhov A. Yu. Study of model of deformation and fracture of structural elements at high temperatures and hydrogen pressures. Hydrostatic pressure case. Saratov: Sarat. Politekh. In-t, 1984. 35 pp. (Deposited at VINITI 26.04.84. No. 446–84)]
  8. Овчинников И. Г., Салихов А. Ю. Исследование модели деформирования и разрушения конструктивных элементов при высоких температурах и давлениях водорода. Ч. 2. Методика оценки параметров модели и расчёт стержня, растягиваемого при всестороннем давлении водорода. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1984. 45 с. (Деп. в ВИНТИ 23.03.84. № 3884–84) [Ovchinnikov I. G., Salikhov A. Yu. Study of model of deformation and fracture of structural elements at high temperatures and hydrogen pressures. Method of model parameters estimating and calculation of the rod stretched at hydrostatic hydrogen pressure. Saratov: Sarat. Politekh. In-t, 1984. 35 pp. (Deposited at VINITI 23.03.84. No. 3884–84)]
  9. Арчаков Ю. И., Теодорович В. П. Растворимость водорода в сталях при повышенных температурах и давлениях // *Журн. приклад. хим.*, 1959. Т. 32, № 12. С. 2667–2673. [Archakov Yu. I., Teodorovich V. P. Solubility of hydrogen in steels at elevated temperatures and pressures // *Zhurn. Priklad. Khim.*, 1959. Vol. 32, no. 12. Pp. 2667–2673].
  10. Овчинников И. Г., Хвалько Т. А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 176 с. [Ovchinnikov I. G., Khvalko T. A. Serviceability of structures under high-temperature hydrogen corrosion. Saratov: Sarat. Politekh. In-t, 2003. 176 pp.]
  11. Локощенко А. М. Длительная прочность металлов при сложном напряжённом состоянии // *Пробл. прочности*, 1983. № 8. С. 55–59; англ. пер.: Lokoshchenko A. M. Stress-rupture strength of metals in the complex stressed state // *Strength of Materials*. Vol. 15, no. 8. Pp. 1098–1103.
  12. Термопрочность деталей машин: Теория, экспериментальные исследования, расчёт / ред. И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр. М.: Машиностроение, 1975. 455 с. [Thermal Strength of Machine Parts / eds. I. A. Birger, B. F. Shorr. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 455 pp.]
  13. ANSYS Element Reference: ANSYS Release 11.0 Documentation Inc., 2007.
  14. ANSYS Theory Reference: ANSYS Release 11.0 Documentation Inc., 2007.
  15. Белобородов А. В. Оценка качества построения конечно-элементной модели в ANSYS / В сб.: *Компьютерный инженерный анализ*: Сб. научн. тр.. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. С. 60–67. [Beloborodov A. V. Assessment of quality of construction of finite-element model using ANSYS / In: *Computer engineering analysis*. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005. Pp. 60–67].

Поступила в редакцию 04/II/2011;  
в окончательном варианте — 20/IX/2011.

MSC: 74R20; 74S05

## SIMULATION OF CREEP AND FRACTURE OF THICK-WALLED NON-UNIFORMLY HEATED PIPELINE UNDER HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN CORROSION

*S. A. Bubnov*<sup>1</sup>, *I. G. Ovchinnikov*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Balashov Institute (Branch) of the Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky, 29, Karla Marksa st., Balashov, Saratov region, 412300, Russia.

<sup>2</sup> Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin, 77, Politekhnikeskaya st., Saratov, 410054, Russia.

E-mails: serbubnov@rambler.ru, bridgesar@sstu.ru

*The technique of calculating the creep and fracture of thick-walled pipeline in a relatively high temperature conditions and exposure to hydrogen is considered. The local nature of the problem is provided by the local effects of temperature on the outer surface of the pipe. The case of linear increase of the local zone temperature with time is examined. The theory of accumulation of damages in Yu. N. Rabotnov's form is applied to definition of the moment of destruction.*

**Key words:** *local heating, non-uniform temperature field, thick-walled pipeline, chemical interactions parameter, hydrogen corrosion, fracture, creep, finite element method.*

Original article submitted 04/II/2011;  
revision submitted 20/IX/2011.

---

*Sergey A. Bubnov*, Postgraduate Student, Dept. of Applied Informatics. *Igor' G. Ovchinnikov* (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Bridges and Transport Constructions.