Зиновьева Т.В. Моделирование условий возникновения трещин в трубе под давлением водородосодержащей среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 3. С. 86–96. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.3.08

Zinovieva T.V. Modeling of the initiation conditions of cracks in a pipe under pressure of a hydrogenous medium. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 3, pp. 86-96. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.3.08

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 3, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.3.08
УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН В ТРУБЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ

Т.В. Зиновьева

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 ноября 2022 г.
Одобрена: 30 мая 2023 г.
Принята к публикации:
15 июня 2023 г.

Ключевые слова:

влияние водорода, напряжения в трубе, водородная диффузия, водородное растрескивание.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается актуальная проблема современной техники о разрушении трубопровода в результате воздействия на него водорода, содержащегося в транспортируемом сырье. Водород изменяет механические свойства металла, воздействуя на напряженно-деформированное состояние трубы, которое, в свою очередь, оказывает влияние на распределение водорода в трубе. Принятые в работе гипотезы о характере этой связи позволили объяснить причину зарождения окружной трещины в трубе под воздействием водорода.

Разработан алгоритм итерационного расчета напряженно-деформированного состояния трубы, внутри которой содержится водородосодержащая смесь. Решена связанная задача теории упругости и диффузии в плоской осесимметричной постановке. Поскольку процесс взаимодействия водорода и металла очень медленный, он рассмотрен в последовательных статических постановках.

Сначала решается задача типа Ламе для трубы с модулем упругости, зависящим от радиальной координаты. Методом конечных разностей найдены поля напряжений и деформаций трубы, находящейся под давлением. Далее определяется концентрация свободного водорода в трубе, обусловленная его содержанием на поверхностях трубы и ее напряженным состоянием.

Принятая гипотеза об условии вклинивания атомов водорода в кристаллическую решетку металла позволяет на следующем этапе расчета провести оценку влияния водорода на механические свойства материала трубы. Расчет полей напряжений и концентрации повторяется вновь уже с измененными механическими характеристиками. Итерационный процесс останавливается, когда напряжения в трубе достигают критических значений по критерию Мизеса или когда механические свойства материала трубы перестают изменяться.

Расчеты показали, что при некоторых сочетаниях концентрации водорода и давления на стенку трубы в ней возникают зоны пластических деформаций, которые могут привести к расслоению материала в окружном направлении. Этот результат соответствует известным экспериментальным данным.

© ПНИПУ

© **Зиновьева Татьяна Владимировна** – к.т.н., доц., с.н.с., e-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com.

Tatiana V. Zinovieva – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MODELING OF THE INITIATION CONDITIONS OF CRACKS IN A PIPE UNDER PRESSURE OF A HYDROGENOUS MEDIUM

T.V. Zinovieva

Institute for Problems in Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 November 2022
Approved: 30 May 2023
Accepted for publication:
15 June 2023

Keywords:

influence of hydrogen, stresses in pipeline, hydrogen diffusion, hydrogen cracking.

ABSTRACT

An actual problem of modern engineering about destruction of a pipeline as a result of influence of hydrogen contained in the transported products is considered. Hydrogen changes the mechanical properties of metal, affecting the stress-strain state of the pipe, which, in turn, affects the distribution of hydrogen in the pipe. The hypotheses about the nature of this relationship accepted in the paper allowed to explain the reason of circumferential crack formation in the pipe under the influence of hydrogen.

An algorithm for iterative calculation of the stress-strain state of a tube containing a hydrogen-containing mixture inside the tube has been developed. The coupled problem of the theory of elasticity and diffusion in the planar axisymmetric formulation is solved. Since the interaction process of hydrogen and metal is very slow, it is considered in sequential static formulations.

First, the Lame-type problem for a tube with the modulus of elasticity depending on the radial coordinate is solved. By the finite difference method the stress and strain fields of the pressurized pipe are found. Further, the concentration of free hydrogen in the pipe caused by its content on the pipe surfaces and its stress state is determined.

The accepted hypothesis about the condition of hydrogen atoms embedding into the crystal lattice of metal allows to estimate the influence of hydrogen on mechanical properties of the pipe material at the next stage of the calculation. The calculation of stress and concentration fields is repeated again with already modified mechanical properties. The iteration process is stopped when the stresses in the tube reach critical values according to Mises criterion or when the mechanical properties of the pipe material stop changing.

The calculations show that at some combination of hydrogen concentration and pressure on the pipe wall, zones of plastic deformation arise in the pipe, which can lead to delamination of the material in the circumferential direction. This result is consistent with known experimental data.

© PNRPU

Введение

Развитие газовой и нефтяной промышленности приводит к росту требований к прочности трубопроводов, большинство из которых во время эксплуатации испытывают длительное воздействие нагрузок и агрессивных сред. Наличие водорода в транспортируемой смеси приводит к его быстрому накоплению внутри металла и, как следствие, к ухудшению механических свойств трубопровода [1; 2]. В результате в трубе образуются окружные трещины, приводящие к выходу ее из строя в короткое время (рис. 1).

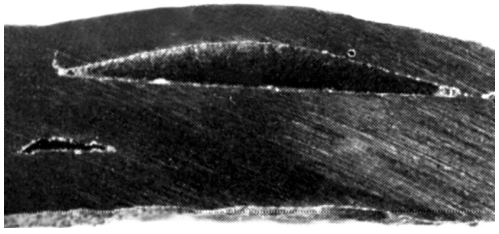


Рис. 1. Трещина в трубе

Fig. 1. Crack in a pipe

Отрицательное воздействие водорода на прочность труб приводит к необходимости его учета при проектировании и расчете трубопроводов. Актуальность темы определена возможными экологическими и экономическими проблемами в случае утечки газа и нефти.

Критические обзоры современных исследований по теме индуцированного водородом растрескивания и охрупчивания сталей представлены, например, в [3–5]. В большинстве работ изучаются условия роста уже сформированной трещины без рассмотрения причин ее возникновения. Математическое моделирование и анализ причин зарождения трещин остаются остроактуальными.

Современные представления о зарождении трещин в кристаллах основываются на концепции А.В. Степанова о взаимосвязи процессов разрушения и пластической деформации [6]. Согласно этой теории зарождение микротрещин не может быть связано с упругим деформированием, пластическая деформация рассматривается как необходимый подготовительный этап разрушения кристаллических твердых тел. На самых ранних стадиях пластического деформирования взаимодействие дислокаций в металле приводит к образованию микрощели атомного масштаба. Под действием нагрузок микротрещины способны к быстрому росту, слиянию друг с другом и образованию магистральных трещин, приводящих к разрушению всей конструкций [7; 8].

Цель данной работы – объяснить причины возникновения трещин в трубе под давлением водородосодержащего сырья методами математической физики и тео-

рии упругости. Для этого нужно определить, при каких давлениях на стенку трубы и при какой концентрации водорода в трубе возникнут зоны пластичности.

Исследования были начаты в [9–11] на модели трубы с ослабленным слоем. Для уточнения результатов теперь в рассмотрение вводится диффузия свободного водорода в трубе, связанная с механическими напряжениями в ней; деградация материала учитывается посредством изменения его модуля упругости как функции радиальной координаты.

1. О влиянии водорода на механические свойства металлов

Еще в начале прошлого века Горский утверждал, что на диффузию атомов водорода в металле влияют не только их концентрация и поле температур, но и напряженно-деформированное состояние матрицы: атомы водорода стремятся к зонам растягивающих напряжений [12; 13]. В работе [14] приводится критический обзор публикаций второй половины XX в. по проблеме коррозионного растрескивания трубчатых конструкций под напряжением. Многочисленные опыты показывают, что только статические растягивающие напряжения играют роль в процессе растрескивания, причем существует их пороговое значение, ниже которого сплав в данной коррозионной среде не обнаруживает коррозионного растрескивания.

Этот эффект объясняет недавняя работа [15]: при попытке искусственного наводораживания металлического образца без прикладывания нагрузки возникает своеобразный поверхностный экран, препятствующий проникновению водорода внутрь металла.

При нагрузке, способствующей диффундированию водорода внутрь, и с увеличением его содержания значительно ухудшаются механические свойства металлов [16]. В работе [17] показано, что насыщение водородом понижает предел прочности металла в 3–5 раз.

Влиянию водорода на модуль упругости металлов посвящено достаточно много исследований, в некоторых работах отмечается незначительное изменение модуля упругости образцов после наводораживания [18], в других – весьма существенное. Так, в работах [19; 20] изучалась никелевая нержавеющая сталь, которая широко используется для изготовления морских трубопроводов. Исследования показали, что модуль упругости никеля уменьшается на 15–22 % после зарядки его водородом. В работе [21] приведены данные для высокоуглеродистой стали AISI 1070, зафиксировано уменьшение модуля упругости всего на 1,7 %. Коллектив авторов [22] исследовал инновационный аморфный сплав, наполнив металлический стакан водородосодержащей смесью. Оказалось, что модуль упругости металлического сплава уменьшался на 25 %, когда содержание водорода в смеси составляло 20 %.

Поскольку процесс перераспределения водорода внутри металла очень медленный и может длиться даже несколько лет, то исследование механизма разрушения трубы под действием водорода будем рассматривать как последовательность статических задач. Как отмечено в работе [23], аппроксимация идущего с конечной скоростью реального нестатического процесса его квазистатической моделью позволяет проводить вычисления с достаточной точностью для большого класса практических задач.

2. Напряженно-деформированное состояние трубы

Определим напряженно-деформированное состояние (НДС) длинного стального трубопровода, испытывающего внутреннее давление p_1 от транспортируемого сырья и внешнее давление p_2 со стороны почвы или жидкости, окружающей трубу. Рассмотрим для этого плоскую осесимметричную задачу типа Ламе для круговой трубы, механические свойства которой зависят от радиальной координаты.

Аналитическое решение задачи Ляме для цилиндра со степенной зависимостью модуля Юнга приводится в [24], в работе [25] построено асимптотическое решение задачи для модуля Юнга с малым возмущением. В данной работе будет построено численное решение для произвольной зависимости упругого модуля от радиальной координаты.

В задаче перемещения и деформации двумерны, но тензор напряжений содержит еще третью компоненту в перпендикулярном направлении (вдоль оси z). Уравнения этой задачи известны [26; 27]:

$$\begin{gathered}\sigma_r' = \frac{1}{r}\left(\sigma_\varphi - \sigma_r\right),\ \varepsilon_r = u' = \frac{1}{E}\left[\sigma_r - \nu\left(\sigma_\varphi + \sigma_z\right)\right],\\ \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} = \frac{1}{E}\left[\sigma_\varphi - \nu\left(\sigma_r + \sigma_z\right)\right],\ \sigma_z = \nu\left(\sigma_r + \sigma_\varphi\right).\end{gathered} \tag{1}$$

Здесь σ_r, σ_φ и σ_z – радиальное, окружное и осевое напряжение соответственно, u – радиальное смещение, $(...)' = d/dr$, модуль Юнга $E(r)$ является заданной функцией радиальной координаты.

Из (1) следует обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) для перемещения $u(r)$. Но предпочтительнее другой способ решения – с уравнениями совместности деформаций:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\varphi + r\varepsilon_\varphi' \Rightarrow \varepsilon_\varphi' = \frac{1}{r}\left(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi\right). \tag{2}$$

Вместе с первым уравнением из (1) получаем систему ОДУ для столбца $Y = (\sigma_r, \varepsilon_\varphi)^T$. В системе ОДУ используем соотношения

$$\begin{gathered}\sigma_\varphi = \frac{1}{1-\nu}\left(\frac{\mathrm{E}}{1+\nu}\varepsilon_\varphi + \nu\sigma_r\right),\\ \sigma_\varphi - \sigma_r = \frac{1}{1-\nu}\left[\frac{\mathrm{E}}{1+\nu}\varepsilon_\varphi + (2\nu - 1)\sigma_r\right],\\ \varepsilon_r - \varepsilon_\varphi = \frac{1+\nu}{E}\left(\sigma_r - \sigma_\varphi\right).\end{gathered} \tag{3}$$

Уравнения дополняются граничными условиями: на внутреннем радиусе (R_1) напряжение $\sigma_r = -p_1$, на внешнем радиусе (R_2) напряжение $\sigma_r = -p_2$.

Поставленная краевая задача

$$Y' = F(r, Y); \sigma_r(R_1) = -p_1, \sigma_r(R_2) = -p_2 \qquad (4)$$

в данной работе решается методом конечных разностей [28]. Система ОДУ и граничных условий аппроксимируется разностными уравнениями с равномерным шагом $\delta = (R_2 - R_1)/N$; функции σ_r и ε_φ непрерывного аргумента r заменяются сеточными функциями $(\sigma_r)_i$, $(\varepsilon_\varphi)_i$ $(i = 0,...,N)$. Численная схема позволяет вычислить приближенные значения функций в узлах. Функции затем восстанавливается посредством интерполяции.

При аппроксимации системы (4) используется неявная симметричная одношаговая разностная схема, имеющая второй порядок точности [29]:

$$\frac{Y_{i+1} - Y_i}{\delta} = \frac{F_i + F_{i+1}}{2},\ i = 0,...,N,\ (\sigma_r)_0 = -p_1, (\sigma_r)_N = -p_2, \qquad (5)$$

для этого вводится один дополнительный узел с номером $i = N+1$, и решение продолжается вне области определения $[R_1, R_2]$ еще на один интервал δ справа от границы. Таким образом, неизвестными становятся $2N+4$ значения, столько же разностных уравнений имеем в системе (5). Система может быть решена стандартными алгоритмами, после этого значения неизвестных функций в дополнительном узле откидываются и не используются при интерполяции. Изложенная схема решения была предложена в работе [30] для расчета колебаний оболочек вращения с произвольным меридианом.

Для определения прочности трубы используется критерий Мизеса, если величина нормы

$$S_{\text{eqv}} = \sqrt{(\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 / 2} \qquad (6)$$

достигнет предела текучести стали при растяжении, то в трубе начнутся пластические деформации.

Известно состояние трубы с постоянным модулем Юнга, испытывающей внутреннее давление (задача Ламе), – материал трубы сжат в радиальном направлении и растянут в окружном и осевом. Согласно гипотезе Горского, атомы водорода в трубе будут стремиться к зонам растягивающих напряжений, изменяя свойства материала.

Как и авторы работ [31; 32], будем предполагать наличие двух групп водорода в металле трубы: свободного и связанного. При выполнении некоторых условий свободно диффундирующий водород внедряется в кристаллическую решетку металла и становится связанным. Присоединяясь к атомам металла, водород отнимает энергию у кристаллической структуры, что ведет к ухудшению механических свойств металла.

Эксперименты показывают, что при наводороживании металла степень снижения его прочности зависит не только от уровня растягивающих напряжений, но и от концентрации водорода [33]. В работе [34] для описания влияния водорода на диаграмму «напряжение – деформация» в материале предложена оригинальная биконтинуальная модель, в которой растворенный в металле водород моделируется идеальным газом. В данном исследовании представлена альтернативная модель, связывающая концентрацию водорода с напряжениями в металле.

3. Распределение свободного водорода в трубе

Атом водорода обладает большой диффузионной подвижностью вследствие своего чрезвычайно малого размера. Рассчитаем стационарное распределение свободного водорода в круговой трубе, опираясь на закон диффузии Фика [35]. Положим, что на внутренней стенке задана постоянная концентрация водорода C_{int}. А снаружи задана плотность диффузионного потока, возникающего из-за разности концентраций водорода на внешней поверхности трубы и в окружающей среде.

В случае осесимметрии при отсутствии объемных источников имеем следующую задачу для определения поля концентрации свободного водорода в металле $C(\boldsymbol{r})$:

$$r(DC')' + DC' = 0,\ C|_{r=R_1} = C_{\text{int}},\ DC'|_{r=R_2} = k(C_{ext} - C), \qquad (7)$$

где $D(\boldsymbol{r})$ – коэффициент диффузии, C_{ext} – концентрация водорода в окружающей среде, k – коэффициент, характеризующий интенсивность концентрационного взаимодействия. Решение задачи (7) имеет вид:

$$C(r) = C_{\text{int}}\left[1 + \frac{\alpha - 1}{\beta + \chi(R_2)}\chi(r)\right],\ \chi(r) = \int_{R_1}^{r} \frac{D_0}{D(\xi)}\frac{d\xi}{\xi}, \qquad (8)$$

здесь введены безразмерные параметры

$$\alpha = \frac{C_{ext}}{C_{\text{int}}},\ \beta = \frac{D_0}{kR_2}.$$

Для удобства дополнительно введен параметр D_0 – значение коэффициента диффузии в металле при нулевой механической нагрузке.

В зависимости от состояния железа или стали экспериментально найденные значения коэффициента диффузии водорода D колеблются в достаточно широком диапазоне от $2 \cdot 10^{-9}$ до $9 \cdot 10^{-5}$ см^2/с. Этот разброс значений связывают с наличием в металле ловушек [36; 37].

Известны экспериментальные данные по влиянию постоянной растягивающей нагрузки в металле σ на коэффициент диффузии водорода в нем при одноосном нагружении. В работе [38] указано, что упругие растягивающие напряжения повышают коэффициент диффузии водорода для двухфазной стали, поскольку из-за увеличения объема элементарной ячейки диффузия во-

дорода облегчается. Когда же напряжение становится равным пределу текучести, то увеличивается количество водородных ловушек, что замедляет диффузию.

Аналогичные результаты были получены в работе [39] для углеродистой стали с низким содержанием углерода и других примесей. На основании приведенных там данных в этой работе была построена безразмерная величина D_0/D, необходимая для проведения дальнейших расчетов. Соответствующая зависимость этой величины от отношения растягивающего напряжения σ в металле к пределу текучести приведена на рис. 2. Отметим, что в формуле (8) использована сложная функция D_0/D от r, для ее построения на каждом итерационном шаге следует сначала рассчитать зависимость растягивающего напряжения σ в трубе от радиальной координаты r.

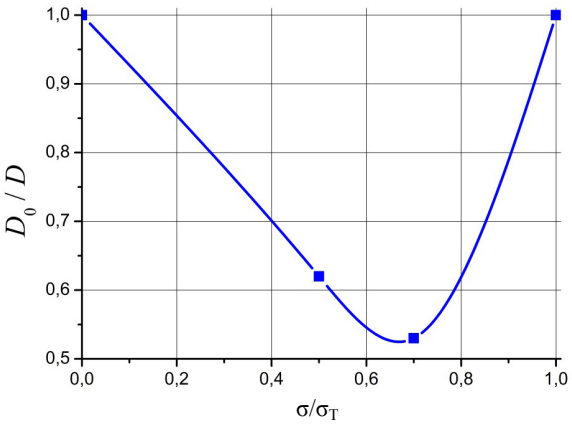


Рис. 2. Связь коэффициента диффузии с растягивающим напряжением

Fig. 2. Relation of diffusion coefficient to tensile stress

В указанных работах при проведении эксперимента изучался поток водорода перпендикулярный направлению приложения растягивающей нагрузки σ, поэтому в рассматриваемой плоской осесимметричной задаче на коэффициент диффузии в радиальном направлении так будут влиять растягивающие окружные напряжения.

С помощью построенной зависимости в дальнейших расчетах будет учтено, что напряженно-деформированное состояние трубы существенно влияет на коэффициент диффузии, а значит и на распределение водорода в трубе.

4. Оценка влияния водорода на механические свойства трубы

Найденная функция концентрации водорода (8) будет использована далее для оценки ослабления механических характеристик трубы при заданном напряженном состоянии.

Как было отмечено выше, изменение механических свойств металлической трубы при наводороживании зависит как от ее напряженно-деформированного состояния, так и от концентрации водорода, причем существует некое предельное растягивающее напряжение, запускающее процесс проникновения водорода внутрь металла.

Для ответа на вопрос, при каких условиях происходит внедрение свободного водорода в решетку металла, в работе [10] была введена гипотеза об условии вклинивания водорода. Суть ее состоит в том, что для заданного металла допускается существование критического значения растягивающего напряжения σ_*, при превышении которого атомы водорода начинают вклиниваться в кристаллическую решетку и изменять механические свойства металла. Причем это значение находится в обратной зависимости от концентрации свободного водорода в металле:

$$\sigma_+ > \sigma_*, \quad \sigma_* = \frac{\mu}{\lg(1+C)}, \tag{9}$$

где μ – постоянный коэффициент, характеризующий металл. То есть предполагается, что при очень больших концентрациях свободного водорода для его вклинивания в решетку достаточно даже небольших растягивающих напряжений σ_+, а при его малых концентрациях напряжения должны быть велики. В формуле (9) концентрация водорода должна быть задана в ppm (миллионная массовая доля), функция логарифма использована в предположении, что изменения концентрации водорода в сотни и тысячи раз не могут также сильно изменять механические напряжения в металле.

Коэффициент μ имеет размерность напряжений, он определен материалом матрицы: при одинаковом наводороживании различных металлов критические растягивающие напряжения вклинивания будут различны. Значение коэффициента μ должно быть определено из эксперимента, за отсутствием пока этих данных привяжем его к известной величине – пределу текучести металла при растяжении σ_T. Критическое напряжение вклинивания будет минимальным на внутренней поверхности трубы (поскольку там максимальная концентрация водорода), именно там начнется процесс внедрения водорода в структуру металла. Свяжем этот критический порог с пределом текучести так: $\sigma_*\big|_{r=R_1} \triangleq n\sigma_T$.

На внутренней поверхности трубы концентрация водорода постоянна и равна C_{int}, учитывая (9), имеем:

$$\frac{\mu}{\lg(1+C_{int})} \triangleq n\sigma_T \Rightarrow \quad \mu = n\sigma_T \lg(1+C_{int}). \tag{10}$$

Коэффициент $0 < n \le 1$ теперь определяет, при каком уровне растягивающих напряжений относительно предела текучести конкретного металла на внутренней поверхности трубы с концентрацией C_{int} водород начнет вклиниваться в кристаллическую решетку, и запустится процесс деградации материала.

Формулу (10) можно использовать для определения μ из эксперимента, задавая на поверхности трубы значение C_{int} и определяя, при каком уровне растягивающих напряжений водород начинает из свободного состояния переходить в связанное.

Построим далее алгоритм итерационного расчета НДС трубы, ослабляемой водородом. Начало расчета соответствует состоянию некорродированной трубы, модуль Юнга которой постоянен. Каждый последующий итерационный шаг будет соответствовать очередному состоянию трубы в процессе ее взаимодействия с водородом.

После определения напряжений в трубе, концентрации водорода и критического напряжения вклинивания для текущего *j*-го шага по формулам п. 2–4 необходимо оценить степень влияния водорода на механические свойства материала трубы.

Согласно введенному выше предположению, для внедрения водорода должно выполняться условие вклинивания (9). В области, где условие $\sigma_+^j > \sigma_*^j$ выполняется, модуль Юнга $E^{j+1}(r)$ материала трубы для следующего итерационного шага уменьшается. Будем считать, что это уменьшение связано с превышением растягивающего напряжения σ_+^j критического значения σ_*^j:

$$E^{j+1} = E_\infty\left(1 - be^{-\gamma\varphi}\right), \quad \varphi = \frac{\sigma_+^j - \sigma_*^j}{\sigma_*^j}, \quad b = 1 - \frac{E^j}{E_\infty}. \qquad (11)$$

Смысл этой формулы поясняет рис. 3: чем сильнее превышено критическое напряжение, тем значительнее уменьшится модуль упругости на следующей итерации, но он не может стать меньше задаваемой нижней границы E_∞. Если для данного металла эксперименты показывают уменьшение модуля упругости при наводороживании не более чем на 15 %, то в расчетах нужно задать $E_\infty = 0{,}85E_0$, это значение использовано далее.

Безразмерный коэффициент γ характеризует чувствительность модуля Юнга к изменениям напряжений, он же является неким «временным масштабом», так как определяет приращение величин между итерациями. Чем он меньше, тем больше итераций потребуется для достижения конечного состояния системы «труба – водород». Но само это состояние не зависит от γ.

Принимается также предположение о том, что ослабленный материал усилиться уже не может.

На основе вышеизложенного построен алгоритм итерационного расчета напряженно-деформированного состояния трубы под воздействием водорода. Опишем его этапы.

1. Для текущего *j*-го шага делается расчет НДС трубы по формулам п. 1 и определяются зоны растягивающих напряжений σ_+^j в ней. При этом учитывается максимальное главное напряжение, в рассматриваемой плоской задаче таким напряжением будет σ_φ^j.

Итерационный процесс останавливается, если максимум нормы (6) достигнул предела текучести.

Заметим, что в начале итерационного процесса модуль Юнга материала трубы полагается константой E_0 во всей области, на последующих шагах используется зависимость $E^{j+1}(r)$, рассчитанная на 3-м этапе.

2. Для текущего *j*-го шага рассчитывается коэффициент диффузии D_0/D^j, концентрация свободного водорода $C^j(r)$ по формуле (8) и критическое значение растягивающего напряжения $\sigma_*^j(r)$ по формуле (9).

3. Рассчитывается влияние водорода на механические свойства материала: в области трубы, где условие $\sigma_+^j > \sigma_*^j$ выполняется, модуль Юнга $E^{j+1}(r)$ для следующего итерационного шага пересчитывается по формуле (11).

Итерационный процесс останавливается при отсутствии изменений в упругом модуле по сравнению с предыдущей итерацией.

4. Расчет повторяется вновь уже с измененными характеристиками материала.

Изложенный алгоритм был реализован в системе компьютерной математики Mathematica [40].

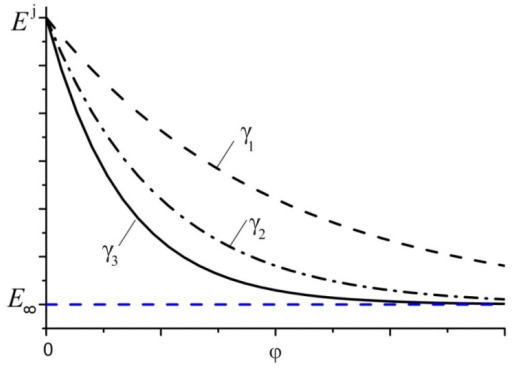


Рис. 3. Модуль упругости на следующем итерационном (*j*+1)-м шаге при различных значениях параметра γ: $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$

Fig. 3. Modulus of elasticity in the next iterative (j+1)-step at different values of the parameter γ: $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$

5. Численные результаты

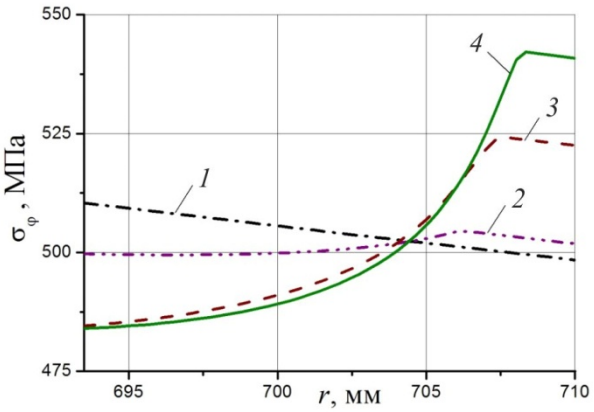
Расчеты проведены для трубы с параметрами, соответствующими магистральным газо- и нефтепроводам: внутренний радиус $R_1 = 693{,}5$ мм, внешний радиус $R_2 = 710$ мм, сталь класса прочности X70 по стандарту API-5L [41]. Предел текучести такой стали $\sigma_T = 483$ МПа, модуль Юнга $E_0 = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}28$. Этим параметрам соответствует, например, газопровод «Сияние Севера».

В соответствии с международным стандартом ISO 12213-3:2006 [42] предельное значение содержания водорода для природного газа, подготовленного для

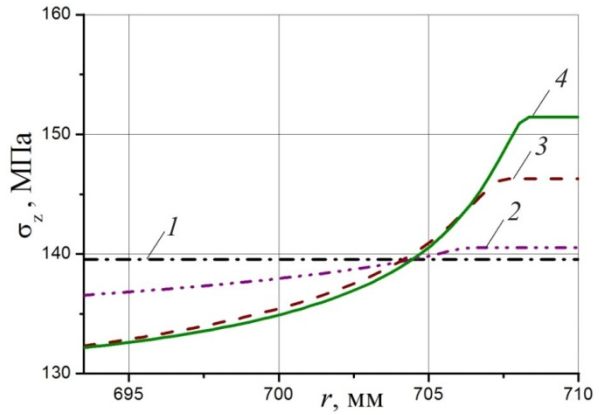
транспортирования по магистральным газопроводам – 10 %, давление газа в трубе должно быть не более 12 МПа. Ориентируясь на эти численные значения, в расчетах были заданы концентрация и давление на внутреннюю стенку трубы. Значение концентрации C_{int} варьировалось до 10^5 ppm (10 %), во внешней среде принято $C_{\text{ext}} = 1$ ppm. Интенсивность взаимодействия с внешней средой зависит от изолирующего слоя на внешней стенке трубы, она определяется коэффициентом $\beta = 10^{-6}$. При расчете по формуле (10) использовано значение $n = 0{,}7$ при $C_{\text{int}} = 10^5$ ppm. Внешнее давление на трубу полагалось нулевым.

Проведён расчёт для случая приложения внутреннего давления 12 МПа и концентрации водорода в транспортируемой смеси $C_{\text{int}} = 1\%$. При значении параметра $\gamma = 0{,}5$ процесс сошелся за 19 итераций.

Окружная и осевая компоненты напряжений в трубе на разных этапах итерационного процесса показаны на рис. 4, первая итерация соответствует трубе без деградации материала.



a



b

Рис. 4. Окружное (*a*) и осевое (*b*) напряжения в трубе как функции радиальной координаты на *j*-й итерации вычислений: $j = 1$ (*1*), $j = 2$ (*2*), $j = 10$ (*3*), $j = 19$ (*4*)

Fig. 4. Circumferential (*a*) and axial (*b*) stresses in the pipe as a function of the radial coordinate at the *j*-th calculation iteration: $j = 1$ (*1*), $j = 2$ (*2*), $j = 10$ (*3*), $j = 19$ (*4*)

График радиального напряжения не построен, поскольку он почти не изменяется. Радиальная компонента – это монотонно возрастающая функция от заданного значения −12 МПа на внутреннем радиусе до 0 МПа на внешнем.

Наибольшим растягивающим напряжением является окружная компонента, именно она сравнивается с критическим напряжением σ_*^j. На рис. 5 показаны обе эти кривые в начале итерационного процесса (при $j = 1$). В зонах, где выполняется условие $\sigma_\varphi^j > \sigma_*^j$, водород активно проникает в решётку металла, ослабляя его. Уже на втором цикле материал будет ослаблен согласно формуле (11) от внутренней поверхности трубы до $r = 706$ мм. В результате итерационного процесса максимум напряжений постепенно смещается с внутренней поверхности трубы внутрь, а его величина растёт.

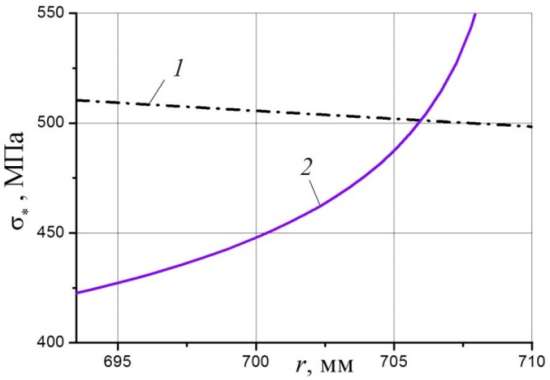


Рис. 5. Окружное напряжение (*1*) и критическое напряжение вклинивания (*2*) в трубе как функции радиальной координаты на первой итерации

Fig. 5. Circumferential stress (*1*) and critical wedging stress (*2*) in the pipe as a function of radial coordinate at the first iteration

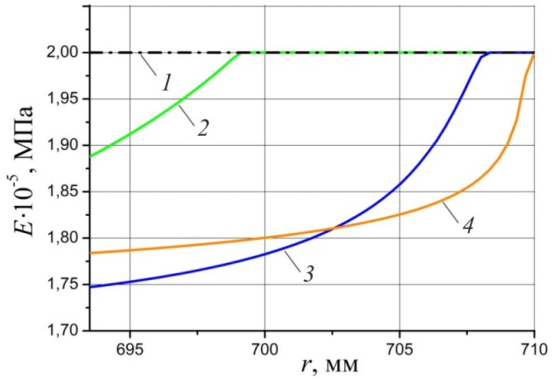
На последней итерации норма Мизеса достигает предела текучести на внутреннем радиусе $r = 708$ мм, и расчет останавливается. Кривая, соответствующая этому случаю нагружения, показана на рис. 6, *b*, под номером *3*. Учитывая осесимметрию задачи, зона пластической деформации будет иметь форму окружности. В трубе возможно образование окружной трещины вроде той, что показана на рис. 1.

При том же приложенном давлении 12 МПа проведены расчёты для других значений концентрации водорода C_{int}. Соответствующие профили модуля Юнга материала трубы и эквивалентные напряжения по Мизесу в конце итерационного процесса показаны на рис. 6.

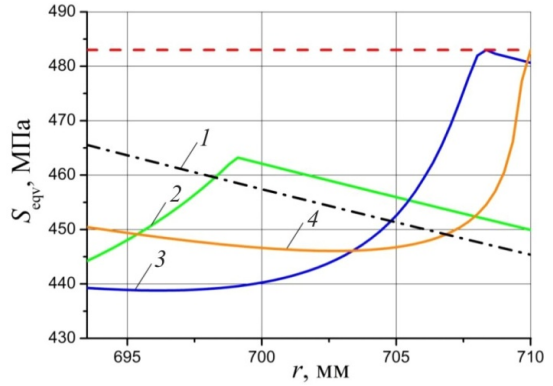
Линии *1* на графиках соответствуют исходному состоянию трубы под нагрузкой. При малых концентрациях водорода в трубе образуется ослабленный слой, максимум напряжений по Мизесу сдвигается с внутренней поверхности вглубь трубы (кривые *2*), но он не достигает предела текучести материала (отмечен на графике красной пунктирной линией), следовательно, труба держит нагрузку без появления пластических де-

формаций. В этих случаях итерационный процесс заканчивался по причине отсутствия изменений в упругом модуле по сравнению с предыдущей итерацией.

С ростом концентрации максимум напряжений сдвигается ближе к внешней поверхности трубы и увеличивается. При концентрации водорода, равной 1 %, предел текучести достигается внутри трубы, а при концентрациях выше 10 % – на внешней поверхности трубы, что может стать причиной образования поверхностных трещин. То есть положение зоны пластического течения в трубе зависит от концентрации водорода в транспортируемой смеси.



a



b

Рис. 6. Модуль упругости (*a*) и эквивалентные напряжения по Мизесу (*b*) в трубе как функции радиальной координаты: *1* – при отсутствии водорода; *2* – при $C_{int} = 0{,}3\,\%$; *3* – при $C_{int} = 1\,\%$; *4* – при $C_{int} = 10\,\%$

Fig. 6. Modulus of elasticity (*a*) and equivalent Mises stresses (*b*) in the pipe as a function of radial coordinate: *1* – in the absence of hydrogen; *2* – at $C_{int} = 0.3\,\%$; *3* – at $C_{int} = 1\,\%$; *4* – at $C_{int} = 10\,\%$

Расчеты также показали, что водородная коррозия в стальной трубе начинает развиваться только при достаточно высоких давлениях водорода, это подтверждают и эксперименты [36]. На рис. 7 показаны зависимости максимального значения эквивалентного напряжения по Мизесу в трубе (на последней итерации) от приложенного внутреннего давления.

Для заданных параметров трубы давление водорода ниже 8 МПа не вызывает коррозии металла, при превышении этого значения степень воздействия водорода сильно зависит от его концентрации на внутренней стенке трубы. Уже концентрации водорода в смеси, равной 1 %, достаточно для возникновения пластической деформации в трубе при давлении 12 МПа, а при концентрации, равной 10 %, она возникает при давлении чуть большем 11 МПа.

При наличии точного экспериментального значения коэффициента μ можно построить диаграмму, аналогичную показанной на рис. 7, и использовать её для оценки критического значения концентрации водорода в транспортируемой смеси, при котором начинается процесс водородного растрескивания трубы.

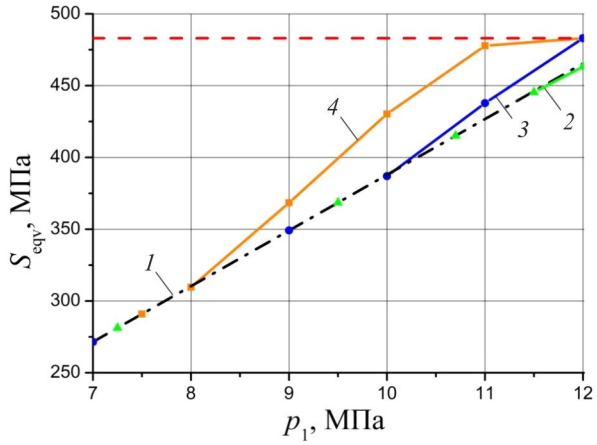


Рис. 7. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в трубе как функция внутреннего давления: *1* – при отсутствии водорода; *2* – при $C_{int} = 0{,}3\,\%$; *3* – при $C_{int} = 1\,\%$; *4* – при $C_{int} = 10\,\%$

Fig. 7. Maximum equivalent Mises stresses in the pipe as a function of internal pressure: *1* – in the absence of hydrogen; *2* – at $C_{int} = 0.3\,\%$; *3* – at $C_{int} = 1\,\%$; *4* – at $C_{int} = 10\,\%$

Таким образом, согласно проведенным расчетам, проникновение водорода в металл трубы с последующим ослаблением его механических свойств происходит лишь при превышении некоторого давления на стенку трубы. Степень коррозионного воздействия будет зависеть от концентрации водорода в транспортируемой по трубе смеси.

Заключение

В исследовании разработана математическая модель прогнозирования напряженно-деформированного состояния трубы под напряжением, подвергающейся воздействию водорода. Проведенное исследование объясняет причину водородного растрескивания трубы.

Показано, что в процессе транспортировки сырья в трубопроводе возникает напряженно-деформированное состояние, способствующее перераспределению водо-

рода в материале трубы. Итерационный процесс анализа напряжений и диффузии водорода показал, что при определенном сочетании давления и концентрации водорода возможно возникновение зоны пластических деформаций в виде окружности. Согласно современным представлениям о зарождении трещин в кристаллах, это приводит к образованию характерных окружных трещин и продольных расслоений стенок трубы.

Библиографический список

1. Elboujdaini M., 2006. Initiation of Near Neutral pH Environmentally Assisted Cracking in Line Pipe Steel // Proceedings of the 16th European Conference of Fracture. – Alexandroupolis, Greece, July 3 – 7, 2006.
2. Balueva A. Modeling of hydrogen embrittlement cracking in pipe-lines under high pressures // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 1310–1315.
3. Модели влияния водорода на механические свойства металлов и сплавов / Ю.А. Яковлев, В.А. Полянский, Ю.С. Седова, А.К. Беляев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. –2020. – № 3.– С. 136–160. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.13
4. Towards a unified and practical industrial model for prediction of hydrogen embrittlement and damage in steels / M.B. Djukic [et al.] // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 604–611.
5. Основы повышения долговечности высокопрочных сталей, эксплуатируемых в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов [и др.]. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 352 с.
6. Степанов А.В. О причинах преждевременного разрыва // Изв. АН СССР. ОМЕН. – 1937. – № 6. – С. 797–813.
7. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
8. Косевич А.М. Дислокации в теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1978. – 219 с.
9. Чулкин С.Г., Зиновьева Т.В. Расчет влияния водорода на прочность морского трубопровода // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 2 (44). – Т. 1. – С. 31–35. DOI: 10.13140/RG.2.2.22027.34088
10. Зиновьева Т.В. Влияние концентрации водорода на растрескивание трубы // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 9-й Международной научно-практической конференции. – СПб., 2020. – С. 196–206. DOI: 10.1872/MMF-2020-15
11. Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Analysis of axisymmetric vibrations of a hydrogen weakened pipe in a layered shell model // Advances in Mechanical Engineering, LNME. – Published by Springer International Publishing Switzerland, 2022. – P. 78–85. DOI: 10.1007/978-3-030-91553-7_9
12. Gorsky W.S. Theorie der ordnungsprozesse und der Diffusion in Mischkristallen von CuAu // Sow. Phys. – 1935. – Bd. 8. – P. 433–456.
13. Gorsky W.S. Theorie der elastischen Nachwirkung in ungeordneten Mischkristallen (elastische Nachwirkung zweiter Art) // Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion. – 1935. – Bd. 8. – P. 457–471.
14. Овчинников И.И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание [Электронный документ] // Науковедение. – 2012. – № 4. – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/38tvn412.pdf. (дата обращения: 21.04.2022).
15. Phenomenon of skin effect in metals due to hydrogen absorption / V.A. Polyanskiy, A.K. Belyaev, E.L. Alekseeva, A.M. Polyanskiy, D.A. Tretyakov, Yu.A. Yakovlev // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2019. – Vol. 31, no. 6. – P. 1961–1975. DOI: 10.1007/s00161-019-00839-2
16. Суранов Г.И. Водород: разрушение, изнашивание, смазка деталей машин. – Ухта: УГТУ, 2015. – 224 с.
17. Hydrogen embrittlement of a 1500-MPa tensile strength level steel with an ultrafine elongated grain / Y. Nie, Y. Kimura, T. Inoue [et al.] // Metallurgical and Materials Trans. A. – 2012. – Vol. 43, no. 5. – P. 1670–1687.
18. Hydrogen-Induced Cracking of Metastable Austenitic Stainless and High-Strength Carbon Steels / Y. Yagodzinskyy, T. Saukkonen, E. Andronova, L. Rissanen, H. Hanninen // Effects of Hydrogen on Materials: Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference. – ASM International, Materials Park, 2009. – P. 123–130.
19. Probing the Effect of Hydrogen on Elastic Properties and Plastic Deformation in Nickel Using Nanoindentation and Ultrasonic Methods / S.K. Lawrence, B.P. Somerday, M.D. Ingraham, D.F. Bahr // JOM. – 2018. – Vol. 70(7). – P. 1068–1073. DOI: 10.1007/s11837-018-2850-z
20. Müller C., Zamanzade M., Motz C. The Impact of Hydrogen on Mechanical Properties; A New In Situ Nanoindentation Testing Method // Micromachines. – 2019. – Vol. 10(2). – P. 114. DOI: 10.3390/mi10020114
21. Ortiz M., Ovejero-Garcia J. Effect of hydrogen on Young's modulus of AISI 1005 and 1070 steels // Journal of Materials Science. – 1992. – Vol. 27. – P. 6777–6781.
22. Effects of hydrogen on the nanomechanical properties of a bulk metallic glass during nanoindentation / Fuyu Dong, Mengyuan He, Yue Zhang, Liangshun Luo, Yanqing Su, Binbin Wang, Hongjun Huang, Qingchun Xiang, Xiaoguang Yuan, Xiaojiao Zuo, Baoshuai Han, Yanjin Xu. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, iss. 40. – P. 25436–25445.
23. Глаголев К.В., Морозов А.Н. Физическая термодинамика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 270 с.
24. Horgan C.O., Chan A.M. The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials // J. Elasticity. – 1999. – Vol. 55. – P. 43–59.
25. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд-во Московского университета, 1976. – 368 с.
26. Елисеев В.В. Механика деформируемого твердого тела. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 231 с.
27. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. – М.: Ленанд, 2019. – 456 с.
28. Chapra S.C., Canale R.P. Numerical Methods for Engineers. – McGraw-Hill Education, New York, 2014. – p. 992.
29. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 640 с.
30. Zinovieva T.V. Calculation of shells of revolution with arbitrary meridian oscillations // Advances in Mechanical Engineering, LNME. – Published by Springer International Publishing Switzerland, 2017. – P. 165–176. DOI: 10.1007/978-3-319-53363-6_17
31. Описание деформации и разрушения материалов, содержащих водород, с помощью реологической модели / А.К. Беляев, Н.Р. Кудинова, В.А. Полянский, Ю.А. Яковлев //

Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2015. – № 3(225). – С. 134–149.

32. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Yakovlev Y.A. Stresses in a pipeline affected by hydrogen // Acta Mechanica. – 2012. – 223(8). – P. 1611–1619.

33. Овчинников И.И. Модели деформирования и замедленного разрушения материалов в водородосодержащей среде // Вестник СГТУ. – 2013. – № 2 (70). – Вып. 1. – С. 178-183.

34. An approach to modeling structural materials with low hydrogen concentration / A.K. Belyaev, A.M. Polyanskiy, V.A. Polyanskiy, Y.A. Yakovlev // Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures, Springer, Cham. – 2019. – P. 63–87.

35. Бекман И.Н. Математика диффузии. – М.: Издательство «ОнтоПринт», 2016. – 400 с.

36. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.

37. Turnbull A. Hydrogen diffusion and trapping in metals // Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies. – Philadelphia: Woodhead Publishing Limited. – 2012. – P. 89–128.

38. The effect of a constant tensile load on the hydrogen diffusivity in dual phase steel by electrochemical permeation experiments / E. Eeckhout, I. Baere, T. Depover, K. Verbeken // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 773. – Article 138872.

39. Determination of the Critical Plastic Strain-Induced Stress of X80 Steel through an Electrochemical Hydrogen Permeation Method / W. Zhao, T. Zhang, Z. He, J. Sun, Y. Wang // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 214. – P. 336–344.

40. Borwein J.M., Skerritt M.B. An introduction to modern mathematical computing: with Mathematica. – Springer, 2012. – Vol. XVI. – P. 224.

41. API SPEC 5L Specification for Line Pipe, Forty-sixth Edition (04/01/2018).

42. ISO 12213-3:2006 "Natural gas – Calculation of compression factor – Part 3: Calculation using physical properties".

References

1. Elboujdaini M. Initiation of Near Neutral pH Environmentally Assisted Cracking in Line Pipe Steel. *Proceedings of the 16th European Conference of Fracture*. Alexandroupolis, Greece, July 3 – 7, 2006.

2. Balueva A. Modeling of hydrogen embrittlement cracking in pipe-lines under high pressures. *Procedia Materials Science,* 2014, Vol. 3, pp. 1310-1315.

3. Yakovlev Yu.A., Polyanskiy V.A., Sedova Yu.S., Belyaev A.K. Modeli vliianiia vodoroda na mekhanicheskie svoistva metallov i splavov [Models of hydrogen influence on the mechanical properties of metals and alloys]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, No. 3, pp. 136-160. doi: 10.15593/perm.mech/2020.3.13.

4. Djukic M.B. et al. Towards a unified and practical industrial model for prediction of hydrogen embrittlement and damage in steels. *Procedia Structural Integrity*, 2016, Vol. 2, pp. 604–611.

5. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., et al. Osnovy povysheniia dolgovechnosti vysokoprochnykh stalei, ekspluatiruemykh v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Fundamentals for improving the durability of high-strength steels operated in hydrogen-containing environments]. Moscow, Infra-Inzheneriia, 2021, 352 p.

6. Stepanov A.V. O prichinah prezhdevremennogo razryva [About the causes of premature bursting]. *Izv. AN SSSR. OMEN*, 1937, No. 6, pp. 797-813.

7. Vladimirov V.I. Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov [The physical nature of metal failures]. M., Metallurgiya, 1984, 280 p.

8. Kosevich A.M. Dislokacii v teorii uprugosti [Dislocations in theory of elasticity]. Kiev, Naukova dumka, 1978, 219 p.

9. Chulkin S.G., Zinovieva T.V. Raschet vlijanija vodoroda na prochnost' morskogo truboprovoda [Calculation of hydrogen influence on the strength of marine pipeline]. *Marine Intellectual Technologies*, 2019, No. 2 (44), Vol. 1, pp. 31-35. doi: 10.13140/RG.2.2.22027.34088.

10. Zinovieva T.V. Vliianie kontsentratsii vodoroda na rastreskivanie truby [Effect of hydrogen concentration on pipe cracking]. *Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference). SPb., 2020, pp.196-206. doi: 10.1872/MMF-2020-15.

11. Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Analysis of axisymmetric vibrations of a hydrogen weakened pipe in a layered shell model. *Advances in Mechanical Engineering, LNME*. Published by Springer International Publishing Switzerland, 2022, pp. 78–85. doi:10.1007/978-3-030-91553-7_9.

12. Gorsky W.S. Theorie der ordnungsprozesse und der Diffusion in Mischkristallen von CuAu. *Sow. Phys.,* 1935, Bd. 8, pp. 433-456.

13. Gorsky W.S. Theorie der elastischen Nachwirkung in ungeordneten Mischkristallen (elastische Nachwirkung zweiter Art). *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion,* 1935, Bd. 8, pp. 457-471.

14. Ovchinnikov I.I. Issledovanie povedeniia obolochechnykh konstruktsii, ekspluatiruiushchikhsia v sredakh, vyzyvaiushchikh korrozionnoe rastreskivanie [Investigation of the behaviour of shell structures operating in environments causing corrosion cracking]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* (The online magazine Naukovodenie), 2012, No. 4, available at: http://naukovedenie.ru/PDF/38tvn412.pdf .

15. Polyanskiy V.A., Belyaev A.K., Alekseeva E.L., Polyanskiy A.M., Tretyakov D.A., Yakovlev Yu.A. Phenomenon of skin effect in metals due to hydrogen absorption. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2019, Vol. 31, No. 6, pp. 1961-1975. doi: 10.1007/s00161-019-00839-2.

16. Suranov G.I. Vodorod: razrushenie, iznashivanie, smazka detalei mashin [Hydrogen: Destruction, wear and tear, lubrication of machine parts]. Ukhta, UGTU Publishing House, 2015, 224 p.

17. Nie Y., Kimura Y., Inoue T., et al. Hydrogen embrittlement of a 1500-MPa tensile strength level steel with an ultrafine elongated grain. *Metallurgical and Materials Trans. A.,* 2012, Vol. 43, No. 5, pp. 1670-1687.

18. Yagodzinskyy Y., Saukkonen T., Andronova E., Rissanen L., Hanninen H. Hydrogen-Induced Cracking of Metastable Austenitic Stainless and High-Strength Carbon Steels. *Effects of Hydrogen on Materials: Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference*, ASM International, Materials Park, 2009, pp. 123-130.

19. Lawrence S. K., Somerday B. P., Ingraham M. D., Bahr D. F. Probing the Effect of Hydrogen on Elastic Properties and Plastic Deformation in Nickel Using Nanoindentation and Ultrasonic Methods. *JOM*, 2018, 70(7), pp. 1068-1073. doi: 10.1007/s11837-018-2850-z.

20. Müller C., Zamanzade M., Motz C. The Impact of Hydrogen on Mechanical Properties; A New In Situ Nanoindentation

Testing Method. *Micromachines*, 2019, 10(2), p. 114. doi: 10.3390/mi10020114.

21. Ortiz M., Ovejero-Garcia J. Effect of hydrogen on Young's modulus of AISI 1005 and 1070 steels. *Journal of Materials Science* , 1992, Vol. 27 , pp. 6777-6781.

22. Fuyu Dong, Mengyuan He, Yue Zhang, Liangshun Luo, Yanqing Su, Binbin Wang, Hongjun Huang, Qingchun Xiang, Xiaoguang Yuan, Xiaojiao Zuo, Baoshuai Han, Yanjin Xu. Effects of hydrogen on the nanomechanical properties of a bulk metallic glass during nanoindentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, Vol. 42, Issue 40, pp. 25436-25445.

23. Glagolev K.V., Morozov A.N. Fizicheskaia termodinamika [Physical thermodynamics]. M., Bauman University Publishing House, 2007, 270 p.

24. Horgan C.O., Chan A.M. The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials. J. Elasticity, 1999, 55, pp. 43-59.

25. Lomakin V. A. Teoriya uprugosti neodnorodnyh tel [Theory of elasticity of inhomogeneous bodies]. M., Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1976, 368 p.

26. Eliseev V. V. Mehanika uprugih tel [Mechanics of elastic bodies]. SPb., SPbGPU Publishing House, 2003, 336 p.

27. Rabotnov Yu. N. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. M., Lenand, 2019, 456 p.

28.Chapra S.C., Canale R.P. Numerical Methods for Engineers. McGraw-Hill Education, New York, 2014, 992 p.

29. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. Chislennye metody [Numerical methods]. Moscow, Binom. Laboratoriya znanij, 2011, 640 p.

30. Zinovieva T.V. Calculation of shells of revolution with arbitrary meridian oscillations. *Advances in Mechanical Engineering, LNME*. Published by Springer International Publishing Switzerland, 2017, pp. 165–176. doi:10.1007/978-3-319-53363-6_17.

31. Belyaev A.K., Kudinova N.R., Polyanskiy V.A., Yakovlev Yu.A. Opisanie deformatsii i razrusheniia materialov, soderzhashchikh vodorod, s pomoshch'iu reologicheskoi modeli [The Description of deformation and destruction of materials containing hydrogen by means of rheological model]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* (St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics), 2015, № 3(225), pp. 134-149.

32. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Yakovlev Y.A. Stresses in a pipeline affected by hydrogen. *Acta Mechanica*, 2012, 223(8), pp. 1611-1619.

33. Ovchinnikov I.I. Modeli deformirovaniia i zamedlennogo razrusheniia materialov v vodorodosoderzhashchei srede [Models for deformation and delayed fracture of materials in hydrogen-containing media]. *Vestnik SGTU* (SGTU Bulletin), 2013, № 2 (70), issue 1, pp. 178-183.

34. Belyaev A.K., Polyanskiy A.M., Polyanskiy V.A., Yakovlev Y.A. An approach to modeling structural materials with low hydrogen concentration. *Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures*, Springer, Cham, 2019, pp. 63-87.

35. Bekman I. N. Matematika diffuzii [The mathematics of diffusion]. *Moscow, OntoPrint*, 2016, 400 p.

36. Kolachev B. A. Vodorodnaia khrupkost' metallov [Hydrogen embrittlement of metals]. *Moscow, Metallurgiia*, 1985, 216 p.

37. Turnbull A. Hydrogen diffusion and trapping in metals. *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies*. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 89-128.

38. Eeckhout E., Baere I., Depover T., Verbeken K. The effect of a constant tensile load on the hydrogen diffusivity in dual phase steel by electrochemical permeation experiments. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, Vol. 773, article 138872.

39. Zhao W., Zhang T., He Z., Sun J., Wang Y. Determination of the Critical Plastic Strain-Induced Stress of X80 Steel through an Electrochemical Hydrogen Permeation Method. *Electrochimica Acta*, 2016, Vol. 214, pp. 336-344.

40. Borwein J.M., Skerritt M.B. An introduction to modern mathematical computing: with Mathematica. Springer, 2012, Vol. XVI, 224 p.

41. API SPEC 5L Specification for Line Pipe, Forty-sixth Edition (04/01/2018).

42. ISO 12213-3:2006 "Natural gas – Calculation of compression factor – Part 3: Calculation using physical properties".

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121112600154-4 Прогнозирование ресурса конструкционных материалов с учетом поверхностных эффектов и коррозионных факторов, вызванных абсорбцией водорода из внешней среды).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Financing. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 121112600154-4 Prediction of service life of structural materials, taking into account surface effects and corrosion factors caused by absorption of hydrogen from the external environment).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the author 100 %.