

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 1 / 2023, Vol. 15, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/08SAVN123.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Караханян, В. Б. К вопросу о моделировании деформирования магистральных трубопроводных конструкций с учетом воздействия агрессивной среды / В. Б. Караханян, И. И. Овчинников // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/08SAVN123.pdf>

For citation:

Karakhanyan V.B., Ovchinnikov I.I. On the issue of modeling the deformation of main pipeline structures, taking into account the impact of an aggressive environment. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15 (1): 08SAVN123.

Available at: <https://esj.today/PDF/08SAVN123.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 539.3

Караханян Вадим Барменович

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Аспирант

E-mail: vadimkarakhanyan@mail.ru

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Доцент

Кандидат технических наук

E-mail: bridgeart@mail.ru

К вопросу о моделировании деформирования магистральных трубопроводных конструкций с учетом воздействия агрессивной среды

Аннотация. Автором представлена актуальность проблемы прогнозирования поведения магистральных трубопроводов с учетом коррозионных поражений. В статье затрагивается тема моделировании коррозионно-механического состояния трубопроводов специалисты по трубопроводам не анализируют проведенные до них исследования по прогнозированию поведения тонкостенных оболочечных конструкций с учетом коррозии, а ссылаются только на работы, публикуемые в основном в трубопроводных журналах. В статье приведены ссылки на работы, в которых гораздо раньше трубопроводчиков моделировалось поведение трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений. Кратко рассмотрены расчетные схемы, применяемые при расчетах трубопроводов. Получены выражения для геометрических характеристик сечений трубопроводов с учетом коррозионных повреждений внутренних и наружных стенок трубопроводов. Построены уравнения модели деформирования нагруженного трубопровода, учитывающие геометрическую, физическую, конструктивную нелинейности (из-за взаимодействия подземного трубопровода с окружающим грунтом), а также коррозионный износ, приводящий к утонению стенки трубопровода и повышению уровня возникающих в ней напряжений. Очевидно, что при неравномерном по периметру стенок коррозионном износе трубопровода, толщина стенок, а также радиус средней линии сечения трубопровода будут изменяться, что приведет к изменению и расчетных геометрических характеристик сечения трубопровода, и положения центра тяжести сечения трубопровода и тем более положения главных осей инерции. В результате вместо привычного прямого поперечного изгиба прямолинейного участка трубопровода может получить ситуацию, когда трубопровод будет испытывать косой изгиб. В заключение используя полученные уравнения можно проанализировать напряженно-деформированное состояние

трубопровода с учетом целого спектра нелинейностей различного вида, сопровождающих процесс деформирования трубопровода в грунте с учетом коррозионного износа.

Ключевые слова: моделирование трубопроводов; геометрическая нелинейность трубопроводов; физическая нелинейность; конструктивная нелинейность

Введение

Как известно, в настоящее время на магистральных трубопроводах в РФ по причине коррозионных повреждений происходит до 42 % аварий, а в КНР эта величина достигает 45 %. Поэтому проблема оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводных конструкций с учетом кинетики развития коррозионных повреждений представляет весьма большую актуальность и для нашей страны и для зарубежных стран.

Причем, так как магистральные нефтегазопроводы довольно часто сооружаются путем заглубления в грунт, то они нередко страдают от грунтовой коррозии, которой подвергается внешняя поверхность трубопровода, несмотря на наличие изоляции, которая, к сожалению, довольно часто выходит из строя.

В результате коррозионные поражения наружной поверхности трубопроводов от грунтовой коррозии и коррозионные повреждения внутренней поверхности трубопроводов от агрессивных примесей, содержащихся в транспортируемом продукте, являются факторами, лимитирующими продолжительность эксплуатации трубопроводов.

К настоящему времени существует довольно много публикаций, посвященных проблеме прогнозирования коррозионно-механического поведения трубопроводов. Отметим, некоторые из них [1–11].

Но, к сожалению, у специалистов по трубопроводным конструкциям, которые начали обращаться к проблеме коррозионного повреждения трубопроводов, имеется не совсем понятная (а может и наоборот, очень понятная) привычка при анализе публикаций, посвященных какой-либо проблеме, обращать внимание только на публикации, приводимые в основном в изданиях, имеющих самое непосредственное отношение к трубопроводному транспорту, и не проводить достаточно полный поиск и анализ литературы, посвященной этой проблеме.

Поэтому в начале нашего материала мы отметим, что проблема моделирования тонкостенных конструкций, подвергающихся коррозионному износу начала разрабатываться в Саратовской школе нелинейной строительной механики под руководством академика РААСН Петрова В.В. и профессора Овчинникова И.Г. Ими ещё в 1980 году была написана монография по расчету элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой и сдана в редакцию Саратовского государственного университета, которая по не зависящим от авторов причинам была опубликована только в 1987 году [12]. Затем под руководством этих же исследователей в 1994 году была опубликована книга [13] по инженерным методам расчета конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах в Казахстане, а в 1995 году на Украине вышла книга [14] по расчету и оптимизации тонкостенных конструкций в условиях коррозионного износа. В 2000 году появилась монография [15], посвященная расчету на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений, а в 2007 году книга [16], в которой исследовалась прочность оболочек вращения, подвергающихся коррозионному износу в неоднородном поле температур. И наконец, в

2014 году появилась в определенной мере уникальная монография [17], в которой рассматривались весьма непростые вопросы идентификации и верификации с использованием экспериментальных данных моделей, в том числе и коррозионных процессов. Представляют интерес также последние публикации, посвященные проблеме коррозионного поражения трубопроводов [18–21].

Поэтому мы полагаем, что при построении моделей коррозионного износа трубопроводных конструкций следует учитывать и результаты, отраженные в этих монографиях и других статьях этих авторов.

С нашей точки зрения представляют интерес исследования, посвященные построению и последующему использованию моделей тонкостенных трубопроводных конструкций, в которых в возможно полной степени учитываются эффекты, сопровождающие процесс деформирования трубопроводов с учетом геометрической и физической нелинейности, взаимодействия с грунтом, включая конструктивную нелинейность, и подвергающихся коррозионному износу с учетом температуры. Причем физическая и геометрическая нелинейность, могут в начале процесса коррозии отсутствовать, но затем, по мере уменьшения толщины стенок трубопровода под влиянием коррозии и последующего повышения уровня напряжений все эти виды нелинейностей могут проявиться в полной мере. Мы полагаем, что отслеживать уровень напряжений и геометрических параметров трубопровода, при котором начинает проявляться та или иная нелинейность с тем, чтобы перейти к расчету по нелинейным уравнениям некорректно, и проще расчеты проводить сразу же с использованием уравнений, описывающих деформирование трубопроводов с учетом всех видов нелинейностей. Построению таких нелинейных уравнений и посвящена настоящая статья.

Расчетные схемы, применяемые при расчете трубопроводов

Конструктивная схема элементов магистральных трубопроводов может включать прямолинейные участки, упругие искривленные участки, криволинейные участки, состоящие из гнутых труб, а также стыки, сварные колена и тройники.

Эти участки трубопровода в зависимости от решаемой задачи могут моделироваться с точки зрения строительной механики или схемой пространственного стержня, или схемой тонкостенной оболочки, или даже жесткой нити. При этом в зависимости от условий опирания участка трубопровода, схемы его загрузки, а также с учетом поставленных задач расчетного анализа для трубопровода из упругого материала могут иметь место такие расчетные схемы трубопровода:

- упругая балка соответствующего поперечного сечения на упругом грунтовом основании же (винклеровском) основании;
- упругий же стержень в упругой грунтовой среде;
- статически неопределимая упругая многопролетная балка;
- плоская конструкция в виде рамы из трубчатых элементов;
- толстостенная цилиндрическая оболочка или точнее толстостенная труба;
- безмоментная упругая цилиндрическая оболочка;
- брус, имеющий малую кривизну;
- брус, имеющий малую кривизну, расположенный в упругой грунтовой среде;
- жесткая нить без упругой среды или в упругой грунтовой среде;

- тонкостенная цилиндрическая оболочка в условиях осесимметричного нагружения;
- оболочка в соответствии с полубезмоментной теорией оболочек В.З. Власова;
- произвольно нагруженная упругая тонкостенная оболочка в упругой грунтовой среде;
- тонкостенная цилиндрическая оболочка, имеющая криволинейную ось;
- несколько сопряженных упругих цилиндрических оболочек.

Ранее в публикациях по расчетному анализу трубопроводов обычно говорилось, что при анализе напряженно-деформированного состояния трубопроводных конструкций можно не учитывать такие дефекты, появившиеся в процессе сооружения трубопроводов как царапины, вмятины, забоины. Эта точка зрения опиралась на соображения о том, что влияние этих дефектов на надежность трубопроводов со временем по мере повышения качества сооружения трубопроводов будет уменьшаться. Причем, обычно расчет трубопроводов производится по давно уже применяемой при расчете строительных конструкций методике предельных состояний, но анализ этих предельных состояний производится без учета возможных случаев выхода конструкций из строя из-за дефектов изготовления, некачественных материалов, дефектов монтажа, а также из-за повреждений из-за нарушения нормальных режимов эксплуатации трубопроводов. Также в расчетных схемах трубопроводов длительное время практически не учитывалось влияние коррозионных процессов, приводящих к изменению геометрических размеров, формы и свойств материала конструкции.

В связи с этим описанные в нормативных документах расчеты по методике предельных состояний практически не учитывают работу трубопроводов в процессе эксплуатации, а моделируют поведение трубопроводов в некотором предельном состоянии, которое практически никогда не наступает, и потому позволяют оценить только интегральные (предельные) возможности трубопровода. Очевидно, что такие состояния могут наступить один-два раза в жизни трубопровода — при проведении гидравлических испытаний или при испытаниях с доведением трубопровода до разрушения. Такой расчет может использоваться при проведении анализа после наступления аварийной ситуации на трубопроводе для установления причин аварии и разработке мер по недопущению таких ситуаций в дальнейшем.

В связи со сказанным обратим внимание на то, что расчет трубопровода по методике предельных состояний, но на действие не предельных (аварийных) а только эксплуатационных нагрузок и других эксплуатационных воздействий на трубопровод сообщает расчетчику недостоверную информацию и режимах эксплуатации трубопроводов.

Следовательно, при расчетах трубопроводов с учетом эксплуатационных воздействий следует включать в расчетные схемы имеющие место в процессе эксплуатации деградационные (коррозионные) процессы, ибо нередко и уровень и вид напряженного состояния трубопроводов приводит к интенсификации этих деградационных процессов.

Возможный подход к учету влияния коррозии на напряженно-деформированное состояние трубопровода

Как уже упоминалось, влияние коррозионной среды может приводить к изменению, как геометрических параметров трубопроводов, так и свойств материала, из которого они изготавливаются.

Рассмотрим учет изменения геометрических характеристик трубопровода под влиянием коррозии (рис. 1).

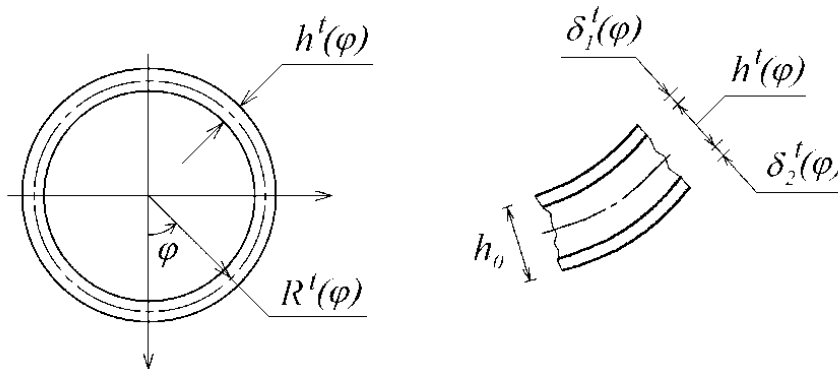


Рисунок 1. Изменение сечения трубопровода под влиянием коррозии (разработано автором)

Очевидно, что при неравномерном по периметру стенок коррозионном износе трубопровода, толщина стенок, а также радиус средней линии сечения трубопровода будут изменяться, что приведет к изменению и расчетных геометрических характеристик сечения трубопровода, и положения центра тяжести сечения трубопровода и тем более положения главных осей инерции. В результате вместо привычного прямого поперечного изгиба прямолинейного участка трубопровода может получить ситуацию, когда трубопровод будет испытывать кривой изгиб.

Если обозначить через $R^t(\varphi)$ — меняющийся с течением времени под влиянием коррозии радиус средней линии сечения трубопровода, то можно записать:

$$R^t(\varphi) = R_0 + \frac{1}{2} [\delta_2^t(\varphi) - \delta_1^t(\varphi)], \quad (1)$$

здесь $h^t(\varphi)$ — меняющаяся по периметру с течением времени толщина стенки трубопровода:

$$h^t(\varphi) = h_0 - \delta_1^t(\varphi) - \delta_2^t(\varphi), \quad (2)$$

R_0, h_0 — исходные значения радиуса и толщины сечения трубопровода, $\delta_1^t(\varphi), \delta_2^t(\varphi)$ — величина коррозионного поражения на внутренней (с индексом 1), и наружной (с индексом 2), сторонах трубопровода, φ — угловая координата, индекс t означает зависимость от времени эксплуатации.

Тогда можно найти площадь элементарной секториальной части сечения трубопровода равна:

$$dA^t = h^t(\varphi) \cdot R^t(\varphi) \cdot d\varphi. \quad (3)$$

Полная площадь неповрежденного коррозией сечения трубопровода будет:

$$A^t = \int_0^{2\pi} h^t(\varphi) \cdot R^t(\varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} (h_0 - \delta_1^t - \delta_2^t) \cdot \left(R_0 + \frac{\delta_2^t - \delta_1^t}{2} \right) d\varphi. \quad (4)$$

Отметим, что величины $h^t, R^t, \delta_1^t, \delta_2^t$ зависят и от времени t и от угла φ .

Найдем статические моменты площади сечения пораженного коррозией трубопровода:

$$\begin{aligned} S_z^t &= \int_0^{2\pi} y^t dA^t = \int_0^{2\pi} (R^t)^2 h^t \sin \varphi d\varphi, \\ S_y^t &= \int_0^{2\pi} z^t dA^t = \int_0^{2\pi} (R^t)^2 h^t \cos \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, что координаты измененного положения центра тяжести сечения z_0^t , y_0^t будут определяться выражениями:

$$z_0^t = \frac{S_y^t}{A^t}; \quad y_0^t = \frac{S_z^t}{A^t}. \quad (6)$$

Очевидно, что осевые и центробежный моменты инерции относительно осей Oz и Oy можно записать в виде формул:

$$\begin{aligned} J_z^t &= \int_0^{2\pi} (y^t)^2 dA^t = \int_0^{2\pi} (R^t)^3 h^t \sin^2 \varphi d\varphi, \\ J_y^t &= \int_0^{2\pi} (z^t)^2 dA^t = \int_0^{2\pi} (R^t)^3 h^t \cos^2 \varphi d\varphi, \\ J_{zy}^t &= \int_0^{2\pi} z^t y^t dA^t = \int_0^{2\pi} (R^t)^3 h^t \sin \varphi \cos \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

Как показали предварительные расчеты, изменение положения центра тяжести сечения трубопровода, вызванное коррозионным износом сечения невелико (порядка 2 %), и потому можно считать оси Oz и Oy центральными, а значит выражения для главных моментов инерции относительно этих осей будут иметь вид:

$$J_{\frac{\max}{\min}}^t = (J_z^t + J_y^t) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(J_z^t - J_y^t)^2 - (J_{zy}^t)^2}, \quad (8)$$

при этом угол наклона главных осей J_{\max}^t и J_{\min}^t к оси Oz определится через его тангенс:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\frac{\max}{\min}}^t = \frac{J_{zy}^t}{J_y^t - J_{\frac{\max}{\min}}^t}. \quad (9)$$

Разобьем кольцевое сечение трубопровода на "n" элементарных секториальных площадок, площадь которых будет $\left(\frac{2\pi}{n}\right)R_j h_j$, где h_j и R_j представляют толщину и радиус средней линии j-го элементарного сектора, причем в пределах каждого сектора коррозия может протекать по разным законам.

Координаты j-й секториальной площадки на радиусе s углом φ_j от начала отсчета в прямоугольной системе координат определяются так:

$$z_j = R_j \cos \varphi_j; \quad y_j = R_j \sin \varphi_j; \quad \varphi_j = \frac{2\pi(j-1)}{n}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (10)$$

При этом полная площадь пораженного коррозией сечения трубопровода, а также моменты инерции можно найти по формулам:

$$\begin{aligned}
 A^t &= \frac{2\pi}{n} \sum_{j=1}^n R_j h_j, \\
 J_z^t &= \frac{2\pi}{n} \sum_{j=1}^n R_j^3 h_j \sin^2 \varphi_j, \\
 J_y^t &= \frac{2\pi}{n} \sum_{j=1}^n R_j^3 h_j \cos^2 \varphi_j, \\
 J_{zy}^t &= \frac{2\pi}{n} \sum_{j=1}^n R_j^3 h_j \sin \varphi_j \cos \varphi_j.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Проведенный предварительно анализ особенностей коррозионного износа трубопроводов позволяет предположить, что во многих случаях коррозионный износ симметричен относительно вертикальной оси сечения трубопровода, а значит главные оси сечения трубопровода, подвергающегося коррозии, не меняют своего положения, то есть остаются горизонтальными и вертикальными, при этом и изменением положения центра тяжести сечения трубопровода можно пренебречь.

Построение модели трубопровода, учитывающей геометрическую, физическую, конструктивную нелинейности и коррозионный износ

Рассмотрим поведение тонкостенного трубопровода на упругом грунтовом основании, считая, что материал трубопровода имеет нелинейную диаграмму деформирования, описываемую сложной четырех параметрической зависимостью между напряжениями σ и деформациями ε :

$$\sigma = a\varepsilon^k - b\varepsilon^m.
 \tag{12}$$

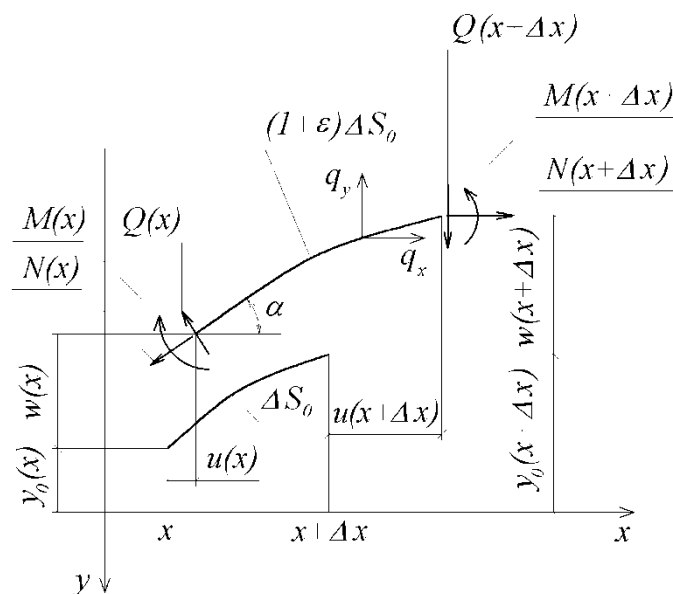


Рисунок 2. Исходная и деформированная расчетная схема элементарного участка трубопровода (разработано автором)

Далее предполагается, что уровень нагружения трубопровода и вызываемый этими нагружениями уровень напряжений дает возможность применять деформационную теорию пластичности. Также считаем, что справедлива гипотеза прямых нормалей (Кирхгоффа), прогибы трубопровода малы по сравнению с его длиной, а касательными напряжениями и деформациями сдвига от перерезывающих сил и крутящих моментов можно пренебречь. В результате получаем стержневую расчетную схему, приведенную на рисунке 2 в исходном и деформированном состоянии.

Полагаем, что линия проложения трубопровода в вертикальном направлении задана функцией $y_0(x)$, а перемещение точки трубопровода с продольной координатой x разложим на две составляющие: горизонтальную $u(x)$ и вертикальную $w(x)$.

Анализируем равновесие малого элемента трубопровода, имеющего длину ΔS , в сечениях которого возникают усилия: изгибающий момент M , продольное усилие N , поперечная сила Q .

Составляя уравнения равновесия всех усилий, действующих на этот малый элемент, получим:

$$\frac{d}{dx}(N \sin \alpha - Q \cos \alpha) - q_y = 0, \quad (13)$$

$$\frac{d}{dx}(N \cos \alpha + Q \sin \alpha) - q_x = 0, \quad (14)$$

$$\frac{dM}{dx} + (N \sin \alpha - Q \cos \alpha) - (N \cos \alpha + Q \sin \alpha) \frac{d(y_0 + w)}{dx} = 0. \quad (15)$$

Учитывая, что $Q = \frac{1}{\cos \alpha} \frac{dM}{dx}$.

Эту систему легко преобразовать к двум дифференциальным уравнениям:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + q_y - N \cos \alpha \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} - \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \frac{dM}{dx} \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} + q_x \frac{d(y_0 + w)}{dx} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \frac{dM}{dx} \right) + \frac{d}{dx} (N \cos \alpha) + q_x = 0. \quad (17)$$

Если трасса трубопровода пологая, перемещения трубопровода малы, то относительную продольную осевую деформацию трубопровода ε_0 , а также кривизну деформированной оси трубопровода ϕ , и используемые выше тригонометрические характеристики можно записать с использованием таких компонент перемещения как u и w :

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\left(\frac{d(y_0 + w)}{dx} \right)^2 + \left(1 + \frac{du}{dx} \right)^2} - 1 = \frac{dw}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2, \quad (18)$$

$$\phi = \frac{1}{\gamma^3} \left[\left(1 + \frac{du}{dx} \right) \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} - \left(\frac{d^2 u}{dx^2} \right) \frac{d(y_0 + w)}{dx} \right] = \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2}, \quad (19)$$

$$\sin \alpha = \frac{d(y_0 + w)}{\gamma dx} = \frac{d(y_0 + w)}{dx}, \quad (20)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\gamma} \left(1 + \frac{du}{dx} \right) = 1, \quad (21)$$

$$\text{где } \gamma = \sqrt{\left(\frac{d(y_0 + w)}{dx} \right)^2 + \left(1 + \frac{du}{dx} \right)^2}.$$

Если подставить эти выражения в (17) и (18), то получим:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + q_y - N \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} + q_x \frac{d(y_0 + w)}{dx} - \frac{d(y_0 + w)}{dx} \frac{dM}{dx} \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} = 0, \quad (22)$$

$$\frac{d^2 M}{dx^2} \frac{d(y_0 + w)}{dx} + \frac{dM}{dx} \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} + \frac{dN}{dx} + q_x = 0. \quad (23)$$

Для дальнейших преобразований необходимо вывести выражения для M и N , в этих уравнениях.

Если на трубопровод действует перепад температуры ΔT , но механические свойства материала не зависят от изменения температуры, можно записать:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\psi(\varepsilon)} + \beta \Delta T, \quad (24)$$

где функция $\psi(\varepsilon) = a\varepsilon^{k-1} - b\varepsilon^{m-1}$; а β — коэффициент линейного расширения.

Для того, чтобы учесть внутреннее давление в трубопроводе и его влияние на его продольные перемещения в (15), введем дополнительный член — $\nu \sigma_{окр}$, в котором ν — коэффициент поперечной деформации; а величина $\sigma_{окр} = (P_{вн} R) / h$ — есть окружное напряжение от действия внутреннего давления; причем $P_{вн}$ — есть внутреннее давление в трубопроводе. В результате:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\psi(\varepsilon)} + \beta \Delta T - \nu \sigma_{окр}.$$

Находя отсюда напряжение, получим:

$$\sigma = \psi(\varepsilon) \left[\varepsilon - \beta \Delta T + \nu \sigma_{окр} \right]. \quad (25)$$

Гипотеза плоских сечений позволяет записать следующее выражение для относительной деформации произвольной точки сечения трубопровода, имеющей координату z_t записывается:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \phi z_t. \quad (26)$$

В результате можем записать,

$$\sigma = \left[a(\varepsilon_0 + \phi z_t)^{k-1} - b(\varepsilon_0 + \phi z_t)^{m-1} \right] \cdot (\varepsilon_0 + \phi z_t + g), \quad (27)$$

где обозначено

$$g = -\beta\Delta T + v\sigma_{окр}. \quad (28)$$

Учитывая, что $M = \int_{A'} \sigma z_i dA'$, $N = \int_{A'} \sigma dA'$, принимая во внимание (28), а также полагая, что трубопровод подвергается коррозионному износу, приводящему к изменению его геометрических параметров, получим:

$$z_i = R_t(\varphi) \cdot \sin \varphi, \quad dA' = h'(\varphi) \cdot R_t(\varphi) d\varphi. \quad (29)$$

И после несложных преобразований запишем выражения:

$$N = (\varepsilon_0 + g) \cdot I_1 + \phi \cdot I_2, \quad (30)$$

$$M = (\varepsilon_0 + g) \cdot I_2 + \phi \cdot I_3, \quad (31)$$

где I_1, I_2, I_3 — некоторые достаточно сложные, но легко находимые с помощью компьютерных программ функции осевой деформации трубопровода ε_0 , его кривизны ϕ , а также времени t :

$$I_1 = \int_0^{2\pi} G \cdot R_t(\varphi) \cdot h'(\varphi) d\varphi, \quad (32)$$

$$I_2 = \int_0^{2\pi} G \cdot R_t^2(\varphi) \cdot h'(\varphi) \cdot \sin \varphi d\varphi, \quad (33)$$

$$I_3 = \int_0^{2\pi} G \cdot R_t^3(\varphi) \cdot h'(\varphi) \cdot \sin^2 \varphi d\varphi. \quad (34)$$

Входящая в подынтегральные выражения функция $G(\varepsilon_0, \phi, t, \varphi)$ записывается:

$$G = a(\varepsilon_0 + \phi \cdot R_t(\varphi) \cdot \sin \varphi)^{k-1} - b(\varepsilon_0 + \phi \cdot R_t(\varphi) \cdot \sin \varphi)^{m-1}. \quad (35)$$

Если учесть (19) и (20), то получим:

$$G = a \left[\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + R_t(\varphi) \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right]^{k-1} - b \left[\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + R_t(\varphi) \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right]^{m-1}. \quad (36)$$

Для влияния нелинейности деформирования грунтового основания в случае перемещения трубопровода по вертикали вертикальную компоненту нагрузки в (17) можно записать:

$$q_y = -P_0 - \eta_1(C) \cdot w^{\mu_1} \cdot e(-w) + \eta_2(C) \cdot w^{\mu_2} \cdot e(w), \quad (37)$$

здесь P_0 — вес единицы длины трубопровода и перекачиваемого продукта; $\eta_1(C), \eta_2(C)$ — коэффициенты постели при перемещении трубопровода соответственно вниз и вверх, являющиеся функциями концентрации $C(x)$ агрессивной среды, которая проникает в грунт

постели и приводит к изменению его механических характеристик; μ_1, μ_2 — коэффициенты, отражающие степенную нелинейность работы грунтового основания; $e(w)$ — единичная обобщенная функция, причем если $w > 0$: то $e(w) = 1$, а если $w \leq 0$ то $e(w) = 0$.

Горизонтальная компонента нагрузки принимается в виде:

$$q_x = \eta_3(C) \cdot u^{\mu_3}. \quad (38)$$

Подставляя полученные выражения для усилий и других факторов в уравнения (23) и (24), получим систему нелинейных дифференциальных уравнений относительно двух неизвестных перемещений $u(x)$ и $w(x)$. Эта система уравнений описывает напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода в случае одновременного учета следующих нелинейных факторов: геометрической, физической, конструктивной нелинейностей, а также коррозионного износа трубопровода и влияния агрессивной среды на свойства нелинейного грунтового основания:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2}{dx^2} \left[I_2 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + g \right) + I_3 \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right] - \\ & - \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \left[I_1 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + g \right) + I_2 \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right] - \\ & - \frac{d(y_0 + w)}{dx} \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \cdot \frac{d}{dx} \left[I_2 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + g \right) + I_3 \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right] - \\ & - P_0 - \eta_1(C) \cdot w^{\mu_1} \cdot e(-w) + \eta_2(C) \cdot w^{\mu_2} \cdot e(w) + \eta_3(C) \cdot u^{\mu_3} \cdot \frac{d(y_0 + w)}{dx} = 0, \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d(y_0 + w)}{dx} \cdot \frac{d^2}{dx^2} \left[I_2 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + g \right) + I_3 \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right] + \\ & + \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \cdot \frac{d}{dx} \left[I_2 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + g \right) + I_3 \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right] + \\ & + \eta_3(C) \cdot u^{\mu_3} + \frac{d}{dx} \left[I_1 \cdot \left(\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + g \right) + I_2 \cdot \frac{d^2(y_0 + w)}{dx^2} \right] = 0. \end{aligned} \quad (40)$$

Заключение

Используя полученные уравнения, можно проанализировать напряженно-деформированное состояние трубопровода с учетом целого спектра нелинейностей различного вида, сопровождающих процесс деформирования трубопровода в грунте с учетом коррозионного износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марченко, А.Ф. Почвенная коррозия трубопроводной стали и магистральных трубопроводов / А.Ф. Марченко // Строительство трубопроводов. — 1995. — № 1. — С. 29–34.
2. Зайнуллин Р.С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической поврежденности. М.: Мир, 1997. 428 с.
3. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем. Уфа: Гилем, 1997. 177 с.
4. Зайнуллин, Р.С. Ресурс элементов трубопроводных систем. М.: Нефть и газ, 2005. 836 с.
5. Melchers, R.E. Statistical characterization of pitting corrosion — Part 2: Probabilistic modeling for maximum pit depth / R.E. Melchers // Corrosion. — 2005. № 8. — p. 766–777.
6. Papavinasam, S. Predicting internal pitting corrosion of oil and gas pipelines. Review of corrosion science models / S. Papavinasam, R. Winston Revie, A. Doiron // NACE Corrosion. — 2005. — Paper#05643. — CD-ROM.
7. Fessler, R.R. Pipeline Corrosion. Final report / R.R. Fessler. — USA: Baker, 2008. — 78 p.
8. Мальцев, Ю.Н. Прогнозирование коррозионных повреждений магистрального газопровода / Ю.Н. Мальцев, А.Е. Лапин, И.Г. Романов, В.К. Тянь // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2009. — № 52. — 11 т. — С. 301–304.
9. Бырылов, И.Ф. Прогнозирование скорости коррозии подземных трубопроводов / И.Ф. Бырылов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2011. — № 6. — С. 157–159.
10. Зорин, Е.Е. Особенности коррозионно-механического разрушения газонефтепроводов / Е.Е. Зорин, Д.И. Волченко, Н.Е. Зорин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. — 2013. — 4 т. — № 1(15). — С. 148–154.
11. Нефедов, С.В. Модель прогнозирования коррозионной поврежденности магистральных газопроводов и метод прогнозирования роста протяженности коррозионно-опасных участков газопроводов / С.В. Нефедов, А.Ю. Прокопенко // Вести газовой науки. — 2014. — № 1. — С. 22.
12. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. Изд-во СГУ, 1987. 228 с.
13. Овчинников И.Г., Айнабеков А.И., Кудайбергенов Н.Б. Инженерные методы расчета конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах. Изд-во КазХТИ, Шымкент, 1994. 131 с.
14. Овчинников И.Г., Почтман М.Ю. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация (монография). Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1995. 192 с.

15. Наумова Г.А., Овчинников И.Г. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений. СГТУ.Саратов.2000. 227 с.
16. Кабанин В.В., Наумова Г.А., Овчинников И.И. Прочность оболочек вращения, подвергающихся коррозионному износу в неоднородном поле температур. Волгогр. гос. архит. — строит. ун-т. Волгоград. Изд-во ВолгГАСУ. 2007. 108 с.
17. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Идентификация и верификация моделей коррозионных и деформационных процессов. Саратов: СГТУ, 2014. 164 с.
18. Беррекия Х., Шуитер А., Бензерга Д. Численный анализ корродированных конструкций с применением ANSYS APDL // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 1. С. 79–83.
19. Sedova, O. A New Model for the Mechanochemical Corrosion of a Thin Spherical Shell / O. Sedova, Y. Pronina // EPJ Web of Conferences / EDP Sciences. — Vol. 108. — 2016. — P. 02040.
20. Шилин А.Н., Информационно-измерительная система коррозионного мониторинга магистральных газопроводов / Шилин А.Н., Халяпин В.В. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 11. С. 25–31
21. Попов, Г.Г. Влияние напряженного-деформированного состояния металла трубопровода на скорость развития «ручейковой» коррозии / И.В. Жуйков, Д.В. Гареев, Г.Г. Попов // Сборник научных трудов III Всероссийской конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». — 2020. — С. 1364–1370.

Karakhanyan Vadim Barmenovich

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: vadimkarakhanyan@mail.ru

Ovchinnikov Il'ya Igorevich

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgeart@mail.ru

On the issue of modeling the deformation of main pipeline structures, taking into account the impact of an aggressive environment

Abstract. The relevance of the problem of predicting the behavior of main pipelines, taking into account corrosion damage, is confirmed. It is shown that when modeling the corrosion-mechanical state of pipelines, pipeline specialists do not analyze previous studies on predicting the behavior of thin-walled shell structures taking into account corrosion, but refer only to works published mainly in pipeline journals. References are given to works in which the behavior of pipeline structures was modeled much earlier than pipeliners, taking into account corrosion damage. The design schemes used in the calculation of pipelines are briefly considered. Expressions are obtained for the geometric characteristics of pipeline sections, taking into account corrosion damage to the internal and external walls of pipelines. The equations of the loaded pipeline deformation model are constructed, taking into account the geometric, physical, structural non-linearity (due to the interaction of the underground pipeline with the surrounding soil), as well as corrosion wear, leading to thinning of the pipeline wall and an increase in the level of stresses arising in it.

Keywords: modeling of pipelines; geometric nonlinearity of pipelines; physical nonlinearity; structural nonlinearity; corrosive wear of pipelines; pipeline deformation equations