ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/160

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ С УЧЁТОМ ИСКРИВЛЕНИЙ И КОМПЛЕКСА ВОЗДЕЙСТВИЙ

¹Сильвестров С.А., ²Кантемиров И.Ф.

¹ООО “Астрапроект”, Казань, Россия,

²УГНТУ, г.Уфа, Россия

Расчеты напряженного состояния нефтегазопроводов в соответствии с нормативными документами, как правило, производятся по формулам без учета исходной (строительной) кривизны в ненапряженном состоянии. В процессе эксплуатации на некоторых участках нефтегазопроводов происходят активные грунтовые процессы (размыв, развитие карста, пучение, таяние в многолетнее-мерзлых зонах). Всё это отражается на напряженном состоянии, снижает безопасность трубопровода и требует учёта при оценке опасности дефектов, обнаруженных при периодических обследованиях. В последние годы существенно возросли требования к точности расчётных оценок, особенно на потенциально опасных участках трубопроводов и участках со сложной конфигурацией. Поэтому требуется разделить влияние кривизны начальной (в ненапряженном состоянии) и кривизны, возникшей при упругом изгибе трубопроводов.

В большинстве случаев расчёты строятся на основе данных, полученных методами внутритрубой диагностики. При этом обычно используется криволинейная координата s – длина пути, пройденного снарядом по трубопроводу от точки запуска. Поэтому в математической модели также предпочтительно иметь не декартову прямую ось z , соединяющую начало и конец трубопровода, а криволинейную координату s – совпадающую с реальной осью трубопровода с учётом его кривизны.

Однако, в проводимых расчетах уравнения равновесия трубопровода в вертикальной плоскости с учётом кривизны строятся с двумя принятыми допущениями:

1) Считается, что продольная деформация определяется только продольными смещениями по формуле $\varepsilon_s = dw/ds$ (Это допустимо только на подземных трубопроводах с большим радиусом кривизны).

2) Принимается, что кривизна трубопровода постоянна по всей длине участка. Поэтому при решении требуется разбивка трубопровода на отдельные участки с постоянной кривизной, затем совмещение отдельных решений. Это всегда вызывает трудности.

В настоящей работе поставлена задача получить уравнения равновесия в общем виде, не прибегая к вышеуказанным допущениям.

Рисунок 1 – Расчетная схема

Рассмотрим элемент трубы длиной ds (рис.1), которая мала, поэтому малы и величины ds (дуга), dz (хорда), $d\varphi$ (угол). Распределённые силы, действующие на элемент (вес, реакция грунта, давление продукта, воды, ветра и т.д.), обозначим q , поперечные и продольные составляющие – q_n и q_s . Действие смежных участков трубопровода слева и справа заменим продольными силами N и $(N+dN)$, поперечными силами Q и $(Q+dQ)$, изгибающими моментами M и $(M+dM)$. При деформировании элемента ds точки смещаются в поперечном (n) и продольном (s) направлениях на v и w .

Примем подвижную криволинейную систему координат $(s-n-m)$ (см. Рис.1), где s – кривая, направленная по оси трубы; n , m – направления, перпендикулярные s , при этом n находится в вертикальной плоскости, m – в горизонтальной. Перемещения трубы по направлениям m , n , s обозначим u , v , w соответственно.

Произведя необходимые вычисления, находим:

Секция 3. Проблемы компьютерного конструирования материалов с иерархической структурой

- уравнение продольно-поперечного изгиба трубопровода с учётом кривизны, внутреннего давления, действующих продольных и поперечных сил:

$$EJ \cdot \frac{d^4 v}{ds^4} - N_{\text{эф}} \left(\frac{d^2 v}{ds^2} + K_{0n} \right) - q_{n(\text{внеш})} = 0. \quad (1)$$

- уравнение продольно-поперечного изгиба в горизонтальной плоскости

$$EJ \cdot \frac{d^4 u}{ds^4} - N_{\text{эф}} \left(\frac{d^2 u}{ds^2} + K_{0m} \right) - q_{m(\text{внеш})} = 0. \quad (2)$$

-уравнение продольного сдвига с учётом кривизны, которое описывает продольное смещение w . Такое смещение происходит под действием продольных внешних сил q_s и осевой силы N :

$$\begin{aligned} & \frac{f_1 + f_2 + f_3}{\sqrt{(u' + K_{0m} w)^2 + (v' + K_{0n} w)^2 + (1 + w' - K_{0m} u - K_{0n} v)^2}} + \\ & + \frac{J}{F} [(K_{0n} + u'')u''' + (K_{0m} + v'')v'''] + \frac{q_s}{EF} = 0; \\ & f_1 = (u' + K_{0m} w)(u'' + K_{0m} w' + K_{0m}' w); \\ & f_2 = (v' + K_{0n} w)(v'' + K_{0n} w' + K_{0n}' w); \\ & f_3 = (1 - K_{0m} u - K_{0n} v + w')(w'' - K_{0m} u' - K_{0m}' u - K_{0n} v' - K_{0n}' v). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, получены искомые дифференциальные уравнения (15, 16, 24), которые записаны в криволинейных координатах и учитывают неоднородность трубопровода по начальной кривизне. Эти уравнения в частных случаях переходят в известные формулы, и в некоторых простейших случаях поддаются аналитическому решению. Но в более общих и интересных для практики случаях решение можно получать только численными методами, например, методом конечных разностей.

Работоспособность подхода опробована и подтверждена на примере участка подземного нефтегазопровода с характеристиками: диаметр 1220 мм, толщина стенки 13 мм, рабочее давление 6,0 МПа, перепад температуры +20°C; коэффициенты постели (сопротивляемость) грунта в поперечном и продольном направлениях 4 МПа/м. Рельеф местности равнинный, но на одном участке образовалась ступень с разницей высотных уровней 2 м. Тем не менее, трубопровод проложен без применения отводов, а переход от одного уровня на другой происходит плавно на участке длиной 50 м (450 – 500 м). Профиль трубопровода соответствует линиям v на графиках. Глубина трубопровода 1 м по верхней образующей.

В работе получены дифференциальные уравнения равновесия трубопровода в общем виде (1, 2, 3), которые составлены в криволинейных координатах и учитывают неоднородность участков по кривизне и действующим силам. Полученные уравнения можно использовать при анализе напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов с учётом их исходных искривлений, особенностей взаимодействия с грунтом и опорами, термосиловых режимов эксплуатации. Уравнения удобны для обработки результатов внутритрубно́й диагностики, поскольку используют одну и ту же криволинейную систему координат, отображающую реальную геометрическую конфигурацию оси трубопровода.