

УДК 622.692.4

А. А. Александров, С. П. Сущев,
В. И. Ларионов, Д. Ю. Валекжанин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Предложена усовершенствованная методика оценки напряжений изгиба трубопровода по результатам замеров координат и высотных отметок, основанная на математическом моделировании процесса деформирования трубопровода с грунтом.

**E-mail: rector@bmsu.ru;lar@esrc.ru;
director@esrc.ru; diacont@ufanet.ru**

Ключевые слова: магистральный подземный трубопровод, грунт, оценка, напряжения, радиус, изгиб.

Многие магистральные трубопроводы, в том числе трубопроводная система ВСТО, проходят через территории Восточной Сибири с суровым резко-континентальным климатом и многолетнемерзлыми грунтами, для которых характерны криогенные и экзогенные процессы и проявления, такие как просадки, морозное пучение, наледи, термокарсты, курумы, осыпи, обвалы, оползни, овражно-балочная эрозия, обводнение и заболачивание. В течение длительной эксплуатации эти процессы приводят к существенным изменениям планово-высотного положения трубопроводов и напряженно-деформированного состояния (НДС). Поэтому для обеспечения безопасности трубопроводов необходимо следить не только за развитием дефектов, старением материалов, но и за динамикой изменения напряженного состояния с учетом происходящих грунтовых изменений.

Обследования проводятся разными методами, в том числе методами внутритрубной диагностики, а также приборными обследованиями снаружи как по поверхности земли вдоль трассы, так и в шурфах. Некоторые методы отражены в отраслевых нормативных документах и регламентах, например [1].

Методика является практическим руководством по обследованию подземных трубопроводов без вскрытия грунта. Она позволяет определять глубину заложения трубопровода, его фактическое положение в пространстве и кривизну, состояние изоляционного покрытия, его интегральное сопротивление, площадь дефектов изоляции, местонахождение наиболее значимых дефектов покрытия. Обследование трубопровода проводится бесконтактными методами путем измерения со-

Поверхность воды

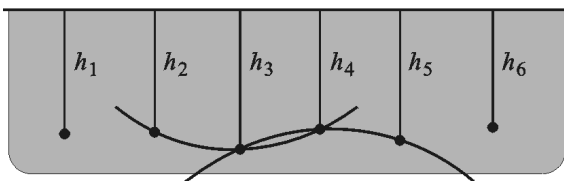


Рис. 1. Схема определения радиусов изгиба по методике [1]

ставляющих электромагнитного поля, создаваемого переменным током, протекающим по трубопроводу от генератора низкой частоты. Остановимся на определении радиуса прогиба трубопровода и соответствующих изгибных напряжений.

Документ [1] предлагает контролировать НДС трубопровода путем измерения высотных отметок h_i с некоторым шагом. Затем рассчитывается радиус кривизны участка ρ , что позволяет оценить напряжение изгиба по формуле

$$\sigma_{\text{изг}} = \pm \frac{ED}{2\rho}. \quad (1)$$

Предлагаемая методика определения радиуса прогиба ρ основана на построении кругов через каждые три смежные точки измерения, как показано на рис. 1.

Однако такой метод приводит к значительным погрешностям в зависимости от выбора точек, участвующих в построении круга. Кроме того, погрешность измерения глубины Δh , которая всегда присутствует, также оказывает влияние на результаты расчетов. Это видно на рис. 1, где на одном и том же участке 3–4 проведены две разные даже по знаку окружности, характеризующие изгиб трубопровода с разными радиусами.

В результате анализа существующих материалов выявлено, что методы оценки НДС трубопровода не дают возможности корректно учесть знакопеременные деформации трубопровода на участках сложных геологических условий.

Поэтому контроль НДС по материалам плано-высотных обследований является актуальной задачей, особенно с увеличением сроков эксплуатации, прокладкой высоконагруженных подземных трубопроводов в районах со сложным климатом и сложными инженерно-геологическими грунтами. Имеется несколько методов контроля, основанных на магнитных свойствах трубопроводов [2, 3]. Такими методами контролируют состояние подводных переходов трубопроводов в условиях периодических размывов грунта и русловых изменений. Обследования проводят с плавучих средств, применяя специальные эхолоты и гидролокаторы. На суше такие работы практически до последнего времени не проводились. Но с развитием средств навигации и

методов магнитной локации появилась возможность более планомерно и с большей точностью контролировать изменения планово-высотного положения подземных трубопроводов и на суше. Таким образом повысился интерес к контролю НДС трубопровода на основе измерения координат с некоторым шагом.

Предлагается метод, основанный не на геометрических построениях, а на физических законах. Метод использует основной закон термодинамики, согласно которому механическая система находится в состоянии устойчивого равновесия, когда ее потенциальная энергия минимальна из всех возможных вариантов. В качестве системы предлагается рассматривать трубу, разбитую на конечные элементы [4]. В качестве конечных элементов выбираются кольца длиной h . В центрах конечных элементов располагаются узлы, обозначенные индексами $i, i + 1, i + 2, \dots$ и т.д. (рис. 2).

При решении используем принцип, суть которого заключается в следующем. Равновесное положение участка трубопровода рассматривается как совокупность локальных равновесий конечных элементов, т.е. равновесие всей системы достигается тогда, когда каждый конечный элемент находится в равновесии со своими ближайшими соседними конечными элементами.

В пределах каждого конечного элемента, размер которого невелик, распределения величин можно упростить, приближенно приняв их постоянными. Погрешность решения из-за такого допущения снижается по мере уменьшения размеров конечных элементов. Численными экспериментами установлено, что при расчете магистральных трубопроводов оптимальная длина конечных элементов равна 1 м.

Рассмотрим конечный элемент в виде бруса. Энергия упругой деформации бруса при изгибе определяется формулой

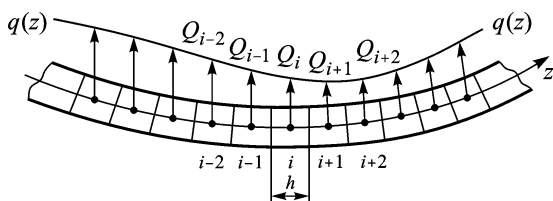
$$U = \frac{1}{2} \int_0^h \frac{M_x^2}{EJ_x} dz. \quad (2)$$

Изгибающий момент M_x и напряжения взаимосвязаны формулами

$$\begin{aligned} M_x(z) &= EJ_x \frac{d^2v(z)}{dz^2}; \\ Q_y(z) &= \frac{d}{dz} \left(EJ_x \frac{d^2v(z)}{dz^2} \right); \\ \sigma(z) &= \frac{M}{J_x} y; \quad \tau(z) = \frac{Q_y}{F}, \end{aligned} \quad (3)$$

где v — смещение по вертикали; z — координата по оси трубы; M_x — изгибающий момент; E — модуль упругости металла трубы; J_x — момент поперечного сечения трубы; σ — линейное напряжение в стенке трубы от изгиба; τ — касательное напряжение в стенке трубы.

Рис. 2. Конечно-элементное представление участка трубопровода



Из формул (2) и (3) получим

$$U = \frac{1}{2} \int_0^h EJ_x \left(\frac{d^2v}{dz^2} \right)^2 dz. \quad (4)$$

Заменяя вторую производную приближенным конечно-разностным выражением, получаем следующие формулы для упругой энергии элементов с номерами $i - 1, i, i + 1$:

$$U_{i-1} = \frac{1}{2} EJ_x h \left(\frac{v_i - 2v_{i-1} + v_{i-2}}{h^2} \right)^2 = \frac{EJ_x}{2h^3} (v_i - 2v_{i-1} + v_{i-2})^2;$$

$$U_i = \frac{EJ_x}{2h^3} (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1})^2;$$

$$U_{i+1} = \frac{EJ_x}{2h^3} (v_{i+2} - 2v_{i+1} + v_i)^2.$$

Полная упругая энергия этих трех элементов составляет

$$U_{\Pi} = U_{i-1} + U_i + U_{i+1}. \quad (6)$$

Условию равновесия в локальной области соответствует равенство нулю вариации функции Лагранжа:

$$L = U_{\Pi} - A_i; \quad \delta L = \delta(U_{\Pi} - A_i) = 0; \quad \delta U_{\Pi} = \delta A_i. \quad (7)$$

Здесь A_i — работа внешних сил, приложенных к i -му узлу;

$$\delta U_{\Pi} = U_{\Pi} \delta V_i \text{ и } \delta A_i = h q_i \delta V_i \quad (8)$$

— вариации упругой энергии i -го элемента и работы внешних сил; q_i — интенсивность нагрузки на i -й элемент, включая массу трубопровода, массу транспортируемого продукта, а также массу и реакцию грунта, описываемую функцией $q(z)$ (рис. 2).

Величина $q(z)$ с учетом реакции грунта при смещении трубопровода может быть определена по рекомендациям, приведенным в справочном пособии [5].

Из выражений (5), (6) и (8) следует, что

$$\delta U_{\Pi} = \frac{EJ_x}{h^3} (v_{i-2} - 4v_{i-1} + 6v_i - 4v_{i+1} + v_{i+2}) \delta v_i. \quad (9)$$

Учитывая уравнения (8) и (9), получаем условие локального равновесия

$$v_i = \frac{q_i h^4}{6EJ} + \frac{2}{3}(v_{i-1} + v_{i+1}) - \frac{1}{6}(v_{i-2} + v_{i+2}). \quad (10)$$

Это и есть условие равновесия i -го узла под действием произвольной нагрузки, описываемой функцией $q(z)$.

Как отмечалось ранее, равновесие всего участка трубопровода состоит из равновесий в каждой локальной области. Следовательно, условие (10) должно быть удовлетворено для каждого узла при действующей на него системе сил и нагрузок. Поэтому решение задачи о равновесном положении всего участка сводится к определению перемещений всех узлов v_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), участвующих в системе уравнений типа (10). Решение целесообразно строить итерационным методом. При этом выполняют численное моделирование взаимодействия трубопровода с окружающим грунтом с учетом всех явлений и факторов.

Для решения задачи разработаны алгоритм и расчетная программа.

Основные этапы алгоритма.

1. Формируются массивы $V(i)$, $Z(j)$, $V(j)$ соответственно для описания поперечных (вертикальных) координат узлов конечно-элементной сетки в расчетном участке трубопровода, координат измеренных точек по оси трубопровода, результатов измерений высотных отметок. Длина конечных элементов $D_z = 1$ м.

2. Вводятся исходные данные (обозначения максимально приближены к алгоритмическому языку): Z_0 , Z_C — осевые координаты начала и конца рассматриваемого участка трубопровода; D_n , A_n , E — наружный диаметр, толщина стенки, модуль упругости металла трубы; N_z , D_{V_k} — число измеренных (контрольных) точек на данном участке, погрешность измерения высотных отметок; $Z_K(j)$, $V_K(j)$ — результаты замеров на трассе (координаты и глубина; число строк соответствует значению N_z).

3. Организуются циклы, реализующие итерации и последовательные приближения по формуле (10) с изменяющимися индексами. Процесс приближения к точному решению контролируется по изменению суммы вертикальных смещений $V(i)$ узлов конечно-элементной сетки.

4. Выводятся результаты расчета для каждого i -го узла (в виде таблицы): Z — координаты точки трубы (узла конечно-элементной сетки); $V(i)$ — фактическая глубина трубопровода с шагом 1 м; σ — напряжения изгиба; R_o — радиус изгиба трубы в данной точке.

Основные особенности алгоритма и программы.

1. Вдоль всего участка трубопровода обеспечивается минимум потенциальной энергии, что соответствует равновесию в пределах каждого элемента и в целом трубопровода.

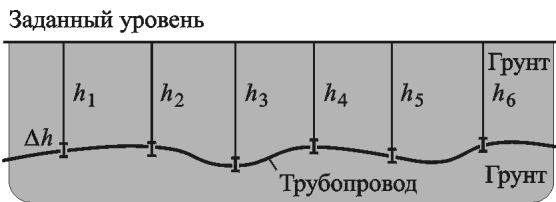


Рис. 3. Моделирование положения трубопровода по результатам измерения глубины залегания

2. В точках, где проведены измерения глубины, обеспечивается прохождение трубопровода через “ворота” шириной Δh , что соответствует погрешности измерений (рис. 3).

3. Радиусы изгиба и соответствующие напряжения определяются по всей длине участка трубопровода с шагом 1 м, а не только в точках измерения при приборном обследовании.

Пример расчета. Рассмотрим участок трубопровода диаметром 720 мм, со стенкой толщиной 19,5 мм. Измерения проведены в 10 точках с шагом 20 м (таблица). Погрешность измерений планово-высотного положения трубы составляет не более 10 см.

Результаты замеров планово-высотного положения трубы

Дистанция, м	Глубина h , м
100	-3,20
120	-3,30
140	-3,50
160	-3,40
180	-4,80
200	-4,10
220	-4,00
240	-3,00
260	-2,90
280	-2,80

В результате решения найдено равновесное положение трубопровода, отвечающее заданным исходным данным, определены радиусы кривизны ρ и напряжения изгиба σ с шагом 1 м. Соответствующие графики приведены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что график напряжения представляет собой кусочно-линейную функцию. Напряжения изгиба по нижней образующей изменяются от -50 до $+60$ МПа. Учитывая другие напряжения, в том числе от давления в трубе и температурного перепада, можно сделать вывод о запасе прочности трубопровода на рассматриваемом участке. Следует отметить, что, определяя кривизну только по

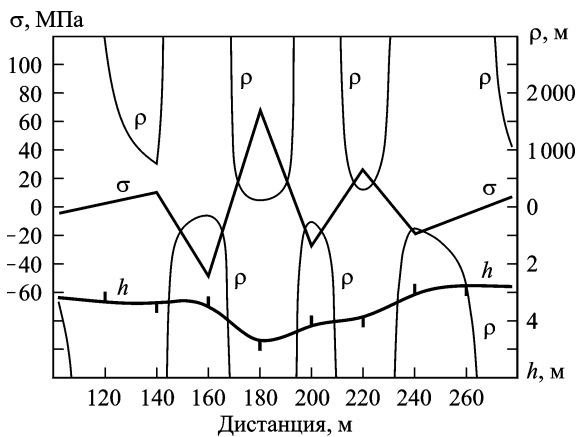


Рис. 4. Определение НДС трубопровода по результатам измерений в отдельных точках с шагом 20 м:

h — расстояние верха трубопровода от заданного уровня; σ — напряжения изгиба (по нижней образующей трубы); ρ — радиус изгиба

натурным данным (см. рис. 1), без применения математического моделирования, подобную функцию получить практически невозможно.

Выводы. 1. Проанализированы нерешенные проблемы оценки НДС трубопровода по данным обследования планово-высотного положения трубопровода.

2. Предложен метод оценки прочности, основанный на взаимодействии трубопровода с грунтом при его деформации на участках сложных геологических условий.

3. Разработаны алгоритм решения полученных зависимостей и программа расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВРД 39-1.10-026-2001. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов. – М.: ОАО “Газпром”, ООО “ВНИИГАЗ”, 2001. – 106 с.
2. Григорашвили Ю. Е., Гумеров К. М., Стицей Ю. В., Иваненков В. В. Физические основы метода магнитной локации при оценке состояния изоляционного покрытия // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: Матер. научн.-практ. конф. 22 мая 2007 г., Уфа, 2007. – С. 258–260.
3. Иваненков В. В. Метод магнитной локации и диагностический комплекс “Орион-1М” // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. Матер. научн.-практ. конф. 21 мая 2008 г., Уфа, 2008. – С. 110–112.
4. Саргсян А. Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 240 с.
5. Айнбидер А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: Справ. пособ. – М.: 1991. – 287 с.

Статья поступила в редакцию 3.10.2011

Анатолий Александрович Александров родился в 1951 г., окончил в 1975 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор. Ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

A.A. Aleksandrov (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. D. Sc. (Eng.), professor, rector of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of theory of risks, mechanics of destruction, industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.



Сергей Петрович Сушев родился в 1958 г., окончил в 1976 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор. Директор Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности опасных производственных объектов.

S.P. Sushchev (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1976. D. Sc. (Eng.), professor. Director of the Scientific and Educational Center of Extremal Situation Study of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of theory of risks, mechanics of destruction, industrial safety of dangerous industrial objects.



Валерий Иванович Ларионов родился в 1941 г., окончил в 1972 г. Военно-инженерную ордена Ленина краснознаменную академию им. В.В. Куйбышева. Д-р техн. наук, профессор. Заместитель директора по научной работе Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории рисков и промышленной безопасности потенциально опасных объектов.

V.I. Larionov (b. 1941) graduated from The Order of Lenin and Red Banner Military Engineering Academy n.a. V.V. Kuibyshev in 1972. D. Sc. (Eng.), professor, deputy director for scientific work of the Scientific and Educational Center of Extremal Situation Study of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of theory of risks and industrial safety of potentially dangerous objects.



Дмитрий Юрьевич Валежжанин родился в 1976 г., окончил в 1998 г. Уфимский государственный авиационный технический университет. Директор ООО “Научно-производственная компания “Диаконт” (г. Уфа).

D.Yu. Valekzhanin (b. 1976) graduated from the Ufa State Aviation Technical University in 1998. Director of the ООО Scientific and Production Company “Diakont” (city Ufa).

