

УДК 622.692.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕПРОВОДА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ

Ларионов Ю. В.

Центр исследований экстремальных ситуаций, Москва, Россия

e-mail: ydnepra@yandex.ru

Аннотация. Для оценки влияния грунтовых изменений на напряженно-деформированное состояние подземных трубопроводов предложена математическая модель, основанная на минимизации функции Лагранжа. Проанализирована достоверность ее результатов путем сравнения с результатами натурных обследований подземного магистрального нефтепровода на участках, оборудованных интеллектуальными вставками. Представлены результаты верификации. Установлено, что разработанная модель позволяет рассчитывать с приемлемой точностью фактический запас прочности и остаточный ресурс трубопровода по данным измерений планово-высотного положения, выявлять в минимальные сроки потенциально опасные и критические участки сооружения, нуждающиеся в инженерной защите или реконструкции, расчетным путем.

Ключевые слова: нефтепровод, магистральный, планово-высотное положение, линейная часть, напряженно-деформированное состояние, грунтовые изменения, интеллектуальная вставка.

Грунтовые изменения являются одним из факторов, представляющих потенциальную опасность для подземных магистральных трубопроводов. Размывы, просадки, пучения, тектонические сдвиги и пр. приводят к дополнительным нагрузкам и напряжениям, которые могут превысить допустимый уровень и стать причиной разрушения трубопровода. Для повышения прочности и надежности трубопроводов, обеспечения их эксплуатационной и экологической безопасности необходим контроль напряженного-деформированного состояния трубопровода на потенциально опасных участках.

Один из методов контроля основан на расчетах по данным изменений планово-высотного положения (ПВП) трубопровода в результате грунтовых явлений. Планово-высотное положение трубопровода может определяться с применением внутритрубного инспекционного прибора, трассоискателя или геодезического оборудования. Расчеты проводятся с использованием

математической модели определения напряженно-деформированного состояния (НДС) нефтепровода по данным измерений ПВП трубопровода в отдельных точках на рассматриваемом участке. Модель основана на развитии методов расчета трубопроводов на прочность, изложенных в работах [1,2].

Постановка задачи на основе минимизации функции Лагранжа

Задача по определению НДС трубопровода сводится к обоснованию положения оси трубопровода с учетом работы металла в упругой стадии по данным измерений ПВП трубопровода в отдельных точках. При решении необходимо заменить участок, представленный в виде отдельных отрезков, упругой линией с различной кривизной в каждой точке. Эта задача может быть решена с использованием энергетических методов, основанных на свойствах упругих систем накапливать потенциальную энергию при деформации за счет работы действующих сил. Объект будет находиться в равновесии при выполнении условия, известного как минимизация функции Лагранжа L [3]:

$$L = \mathcal{E} - A = \min \quad (1)$$

где \mathcal{E} – потенциальная энергия деформации рассматриваемого участка трубопровода; A – работа внешних сил, действующих на трубопровод.

При условии (1) рассматриваемый участок трубопровода будет находиться в равновесии.

Для решения задачи расчетный участок трубопровода разбивается плоскостями на отдельные элементы равной длины h (рисунок 1).

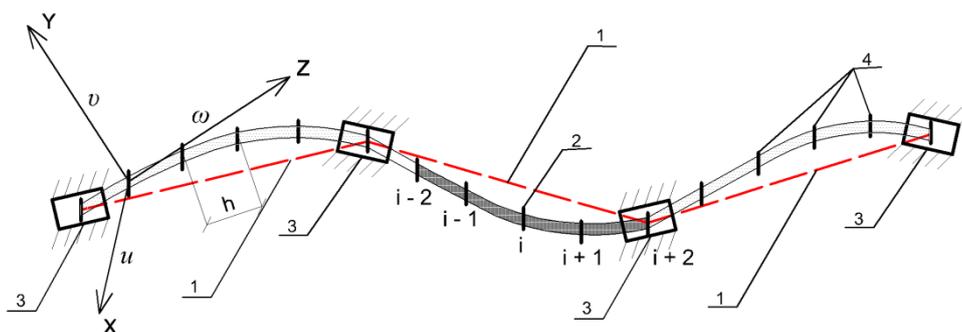


Рисунок 1. Расчетная схема определения упругой линии оси трубопровода по данным измерений ПВП

1 – прямые отрезки, соединяющие точки измерений ПВП; 2 – расчетная упругая линия оси трубопровода; 3 – точки измерений ПВП трубопровода (условно показана погрешность измерений); 4 – расчетные сечения трубопровода; u, v, w – смещения трубопровода в направлениях соответственно осей x, y, z ; $(i-2), (i-1), (i), (i+1), (i+2)$ – узлы расчетной конечно-элементной сетки с шагом h

При решении добиваются выполнения условия (1) для локального участка (*i*):

$$L_{(i)} = \mathcal{E}_{(i)} - A_{(i)} = \min. \quad (2)$$

При выполнении условия (2) для отдельного элемента будет выполнено условие (1) для всего участка. Этот подход значительно упрощает численное решение задачи [4].

Накапливаемая в единице объема элемента энергия деформации в пределах пропорциональности между напряжением и относительным удлинением (плотность энергии деформаций) принимается равной [6]:

$$\gamma = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (3)$$

где σ – напряжение материала; E – модуль упругости.

В пределах каждого элемента вычисляется энергия, накопленная при деформации за счет внешних сил. Основные виды рассматриваемой энергии:

- энергия радиальных деформаций от внутреннего давления;
- энергия окружных (кольцевых) деформаций от внутреннего давления;
- энергия продольных деформаций от осевой силы;
- энергия деформаций элемента от действия поперечной силы;
- энергия деформаций элемента от действия изгибающего момента.

Известно [3], что энергия, запасаемая упругим телом при линейной деформации в замкнутой системе, равна работе внешних сил, действующих на рассматриваемое упругое тело. Работа внешних сил определяется при вариации узлов *i*-го элемента с учетом пространственного положения трубы относительно осей координат.

Энергия деформаций узлов конечно-элементной модели от воздействия внешних сил на нефтепровод

1. Энергия радиальных деформаций от действия внутреннего давления P

Учитывая, что на внутренней поверхности трубы радиальное напряжение равно эксплуатационному давлению продукта P , а на внешней поверхности – нулю, и принимая распределение напряжений в стенке линейным, среднее радиальное напряжение σ_r от действия внутреннего давления будет равным:

$$\sigma_r = 0,5P. \quad (4)$$

Тогда плотность энергии радиальных деформаций составит:

$$\gamma_r = \frac{\sigma_r^2}{2E}, \quad (5)$$

а энергия радиальных деформаций в конечном элементе будет равна:

$$\mathfrak{E}_{r(i)} = \int_V \gamma_r dV = \frac{\sigma_r^2}{2E} V_h = \frac{P^2 F h}{8E}, \quad (6)$$

где h – длина конечного элемента; V_h – объем металла в конечном элементе; $F = \pi\delta(D_n - \delta)$ – площадь поперечного сечения трубы; D_n – наружный диаметр трубы; δ – толщина стенки.

2. Энергия кольцевых деформаций от внутреннего давления P

Кольцевые напряжения $\sigma_{кц}$ определяются из уравнения Лапласа для тонкостенных осесимметричных оболочек при постоянном внутреннем давлении [7]. Принимая радиус кривизны в направлении продольной оси трубы $\rho_e = \infty$, а в поперечном сечении $\rho_s = R_b$, формула по определению кольцевых деформаций примет вид:

$$\sigma_{кц} = \frac{PR_b}{\delta}, \quad (7)$$

где R_b – внутренний радиус трубы.

С учетом (3) и (7) энергия кольцевых деформаций в конечном элементе равна:

$$\mathfrak{E}_{кц(i)} = \int_V \gamma_{кц} dV = \frac{\sigma_{кц}^2}{2E} V_h = \frac{P^2 R_b^2 F h}{2E\delta^2}. \quad (8)$$

3. Энергия продольных деформаций от действия осевой силы N

Напряжения σ_N в элементе трубы, вызванные действием осевой силы N , определяются из уравнения:

$$\sigma_N = \frac{N}{F}. \quad (9)$$

Тогда плотность энергии продольных деформаций от осевой силы составит:

$$\gamma_N = \frac{\sigma_N^2}{2E}, \quad (10)$$

а энергия деформаций в конечном элементе будет равна:

$$\mathfrak{E}_{N(i)} = \int_V \gamma_N dV = \frac{\sigma_N^2}{2E} V_h = \frac{N^2 h}{2EF}. \quad (11)$$

4. Энергия деформации элемента от действия поперечной силы Q

Плотность энергии при поперечном сдвиге определяется по формуле [7]:

$$\gamma_Q = \frac{\tau_{zy}^2}{2G}, \quad (12)$$

а энергия в конечном элементе будет равна:

$$\mathfrak{E}_{Q(i)} = \int_V \frac{\tau_{zy}^2}{2G} dV, \quad (13)$$

где τ_{xy} – касательные напряжения от действия поперечной силы, определяемые по формуле Журавского:

$$\tau_{zy} = \frac{Q S_x}{b J_x}; \quad (14)$$

$S_x = \int_{F_1} y dF_1$ – статический момент относительно нейтральной оси отсеченной

части поперечного сечения, расположенной над уровнем $y = const$, на котором определяется касательное напряжение; F_1 – площадь отсеченной части поперечного сечения трубы; b – ширина поперечного сечения стенки трубы на том уровне, на котором определяется τ_{zy} ; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига металла

трубы; μ – коэффициент Пуассона металла трубы; J_x – момент инерции сечения трубы относительно оси x , определяемый из уравнения:

$$J_x = \int_F y^2 dF = \frac{\pi(R_n^4 - R_b^4)}{4}. \quad (15)$$

Подставляя (14) в уравнение (13), затем интегрируя по объему конечного элемента, получаем потенциальную энергию деформации трубы длиной h при действии поперечной силы:

$$\mathfrak{E}_{Q(i)} = \frac{Q^2 \eta}{F} \cdot \frac{h}{2G}. \quad (16)$$

Выражение (16) приведено к виду, характерному для уравнения энергии деформации при действии продольной силы N . Здесь использовано обозначение:

$$\eta = \frac{F}{J_x^2} \int \frac{S_x^2}{F} dF, \quad (17)$$

где F – площадь поперечного сечения трубы; S_x и J_x – статический момент и момент инерции поперечного сечения трубы. Как показывают расчеты, безразмерный коэффициент η для труб может быть принят равным 1,5.

5. Энергия деформаций от действия изгибающего момента M_n

Напряжения в металле трубы от действия изгибающего момента M_n определяются по формуле (18):

$$\sigma_n = \frac{y M_n}{J_x} = k r \sin \varphi, \quad (18)$$

где $k = \frac{M_n}{J_x}$; $y = r \sin \varphi$ – расстояние от оси трубы до рассматриваемого сечения (координата сечения).

Плотность энергии от действия изгибаемого момента равна (19):

$$\gamma_n = \frac{\sigma_n^2}{2E}, \quad (19)$$

а энергия деформации в конечном элементе –

$$\mathfrak{E}_{n(i)} = \int_V \frac{\sigma_n^2}{2E} dV = \frac{1}{2E} \int_0^h \int_0^{2\pi} \int_{R_B}^{R_H} k^2 r^2 \sin^2 \varphi r dr d\varphi dh = \quad (20)$$

$$= \frac{k^2}{2E} \int_{R_B}^{R_H} r^3 dr \int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi \int_0^h dh = \frac{M_n^2 h}{2E J_x}$$

Суммарная энергия деформации конечного элемента определяется по формуле (21):

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_{(i)} &= \mathfrak{E}_{r(i)} + \mathfrak{E}_{\kappa(i)} + \mathfrak{E}_{N(i)} + \mathfrak{E}_{Q(i)} + \mathfrak{E}_{n(i)} = \\ &= \frac{P^2 F h}{8E} + \frac{P^2 R_B^2 F h}{2E \delta^2} + \frac{N^2 h}{2EF} + \frac{Q^2 \eta h}{2GF} + \frac{M_n^2 h}{2E J_x} \end{aligned} \quad (21)$$

Работа внешних сил

Работа внешних сил A определяется как сумма произведений всех сил, действующих на узлы конечно-элементной сетки, на смещения этих узлов.

На узлы действуют поперечные силы \vec{Q}_i , которые связаны с распределенными нагрузками $\vec{q}(z)$ следующим образом:

$$Q_{x(i)} = h q_x(z_i); Q_{y(i)} = h q_y(z_i); Q_{z(i)} = h q_z(z_i). \quad (22)$$

Распределенные нагрузки $\vec{q}(z)$ учитывают вес грунта и отпор в зависимости от направлений смещений трубопровода. Моделирование взаимодействия грунта с трубой принято в соответствии с [7].

Работу внешних сил на элементе i можно записать в виде:

$$A_{(i)} = Q_{x(i)} \delta u_{(i)} + Q_{y(i)} \delta v_{(i)} + Q_{z(i)} \delta w_{(i)}, \quad (23)$$

где $\delta u_{(i)}$, $\delta v_{(i)}$, $\delta w_{(i)}$ – вариации узлов i -го элемента в направлении осей x , y , z соответственно.

Численная реализация математической модели

Рассмотрим далее выражения, показывающие зависимость различных составляющих энергии деформаций от положений узлов.

Энергия элемента (i) за счет действия внутреннего давления P , определяемая с использованием формул (6) и (8), не зависит явно от координат узлов, а при смещении узлов вариация этой энергии равна нулю: $\delta \mathcal{E}_{P(i)} = 0$. Следовательно, при построении конечно-элементных уравнений равновесия эта часть энергии не участвует.

Энергия элемента (i) за счет действия осевой силы определяется по формуле (10), где сила N_i для i -го элемента вычисляется по формулам:

$$N_i = (\sigma_0 + \varepsilon_i E) F; \sigma_0 = \mu \sigma_{\text{кц}} + E \alpha (t - t_0), \quad (24)$$

где μ – коэффициент Пуассона металла трубы; $\sigma_{\text{кц}}$ – кольцевое напряжение (7); E – модуль упругости металла трубы; $\alpha = 0,00012 \text{ град}^{-1}$ – коэффициент температурного расширения; t , t_0 – температура трубопровода при эксплуатации и укладке соответственно, °С:

$$\varepsilon_i = \frac{\ell_i - \ell_{0i}}{\ell_{0i}} \text{ – осевая деформация конечного элемента } (i); \quad (25)$$

$\ell_i = \sqrt{(u_{(i+1)} - u_{(i)})^2 + (v_{(i+1)} - v_{(i)})^2 + (w_{(i+1)} - w_{(i)} + h)^2}$ – длина i -го элемента в текущем состоянии (в процессе решения); (26)

$\ell_{0i} = \sqrt{(u_{0(i+1)} - u_{0(i)})^2 + (v_{0(i+1)} - v_{0(i)})^2 + (w_{0(i+1)} - w_{0(i)} + h)^2}$ – длина i -го элемента в начальном (ненапряженном) состоянии трубопровода; (27)

w – удлинение трубы по оси трубопровода:

В начальном состоянии $w_{0(i+1)} = w_{0(i)}$, поэтому:

$$\ell_{0i} = \sqrt{(u_{0(i+1)} - u_{0(i)})^2 + (v_{0(i+1)} - v_{0(i)})^2 + h^2}. \quad (28)$$

Аналогично можно записать формулы энергий для всех других элементов. Но при варьировании одного узла (i) изменения претерпевают только энергии двух смежных узлов с номерами ($i-1$) и (i). Поэтому достаточно рассмотреть сумму энергий только этих двух элементов (29):

$$\mathfrak{E}_N = \mathfrak{E}_{N(i-1)} + \mathfrak{E}_{N(i)}. \quad (29)$$

При вычислении энергии $\mathfrak{E}_{N(i-1)}$, деформации $\varepsilon_{(i-1)}$, длин $\ell_{(i-1)}$ и $\ell_{0(i-1)}$ можно пользоваться соответствующими формулами для элемента (i), сделав перестановки (i) \rightarrow ($i-1$) и ($i+1$) \rightarrow (i).

Энергия i -го элемента за счет действия внешней поперечной (перерезывающей) силы Q определяется по формуле (15). Сила Q , участвующая в формулах, связана со смещениями следующими уравнениями:

$$Q_{x(i)} = EJ_y \frac{d^3 u}{dz^3}; \quad Q_{y(i)} = EJ_x \frac{d^3 v}{dz^3}; \quad Q_{(i)}^2 = Q_{x(i)}^2 + Q_{y(i)}^2, \quad (30)$$

где конечно-разностные аппроксимации определены из соотношений [7]:

$$\left. \frac{d^3 u}{dz^3} \right|_{(i)} = \frac{u_{(i+2)} - 3u_{(i+1)} + 3u_{(i)} - u_{(i-1)}}{h^3}; \quad \left. \frac{d^3 v}{dz^3} \right|_{(i)} = \frac{v_{(i+2)} - 3v_{(i+1)} + 3v_{(i)} - v_{(i-1)}}{h^3}. \quad (31)$$

Из формул (29)-(30) можно видеть, что смещение узла (i) приводит к изменению энергии группы элементов ($i-1$), (i), ($i+1$), ($i+2$). Энергии других элементов не зависят от положения узла (i). Поэтому достаточно рассматривать сумму энергий этих четырех элементов

$$\mathfrak{E}_Q = \mathfrak{E}_{Q(i-1)} + \mathfrak{E}_{Q(i)} + \mathfrak{E}_{Q(i+1)} + \mathfrak{E}_{Q(i+2)}. \quad (32)$$

При вычислении энергии $\mathcal{E}_{Q(i-1)}$ можно пользоваться теми же формулами, что и для элемента (i) , понизив номера всех узлов на 1, а $\mathcal{E}_{Q(i-2)}$ – на 2. При вычислении энергии $\mathcal{E}_{Q(i+1)}$ необходимо повысить номера всех узлов на 1.

Энергия элемента (i) за счет действия изгибающего момента M_n определяется по формуле (19). Изгибающий момент M_n находится из выражений:

$$M_{n(i)}^2 = M_{x(i)}^2 + M_{y(i)}^2; \quad M_{x(i)} = EJ_y \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right); \quad M_{y(i)} = EJ_x \left(\frac{d^2 v}{dz^2} \right). \quad (33)$$

Для решения уравнения (32) используются конечно-разностные аппроксимации [7]:

$$\left. \frac{d^2 u}{dz^2} \right|_{(i)} = \left(\frac{u_{(i+1)} - 2u_{(i)} + u_{(i-1)}}{2h^2} \right); \quad \left. \frac{d^2 v}{dz^2} \right|_{(i)} = \left(\frac{v_{(i+1)} - 2v_{(i)} + v_{(i-1)}}{2h^2} \right). \quad (34)$$

Из группы формул (32)-(33) видно, что смещение узла (i) приводит к изменению энергии группы элементов $(i-1)$, (i) , $(i+1)$. Поэтому для получения условий локального равновесия узла (i) достаточно рассматривать сумму энергий этих трех элементов.

$$\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_{n(i-1)} + \mathcal{E}_{n(i)} + \mathcal{E}_{n(i+1)}. \quad (35)$$

При вычислении энергии $\mathcal{E}_{n(i-1)}$ можно пользоваться соответствующими формулами для элемента (i) , понизив номера всех узлов на 1. При вычислении энергии $\mathcal{E}_{n(i+1)}$ необходимо повысить номера всех узлов на 1.

Просуммируем все слагаемые энергий деформаций, в которых явным образом участвуют координаты узла (i) :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{(i)} = & \mathcal{E}_{N(i-1)} + \mathcal{E}_{N(i)} + \\ & + \mathcal{E}_{Q(i-1)} + \mathcal{E}_{Q(i)} + \mathcal{E}_{Q(i+1)} + \mathcal{E}_{Q(i+2)} + \\ & + \mathcal{E}_{n(i-1)} + \mathcal{E}_{n(i)} + \mathcal{E}_{n(i+1)}. \end{aligned} \quad (36)$$

В каждом из слагаемых выражения (32) участвует хотя бы одна из координат узла (i) : $u_{(i)}$, $v_{(i)}$, $w_{(i)}$.

Условию равновесия трубопровода соответствует минимум функции Лагранжа (1). Вместо общей функции используем локальные функции в виде (2). Минимизируя последовательно выражение (2) с учетом зависимостей (22) и (35) для всех узлов, получим координаты упругой линии трубопровода. При этом следует учитывать тот факт, что часть узлов конечно-элементной сетки необходимо размещать в пределах интервала измерений с заданной точностью

планово-высотного положения трубопровода. Поэтому при проведении итераций по минимизации функции эти точки могут изменять координаты только в пределах заданного интервала, определяемого точностью измерений.

Минимизация функции Лагранжа проводится методом последовательных приближений. Суть метода заключается в следующем: задаются начальные значения исходных параметров, включая координаты трубопровода по данным измерений при обследовании и нагрузки по данным эксплуатационной и проектной документации.

По этим данным, предполагая силы постоянно действующими, получается первое приближение положения упругой линии. По полученному первому приближению производится уточнение реакции грунта и других действующих сил, зависящих от смещения трубопровода. Одновременно уточняется удлинение трубопровода, вызванное продольными и поперечными смещениями, рассчитывается относительная продольная деформация $\Delta\varepsilon_z$, соответствующие продольные напряжения и изменение продольной силы ΔN . Затем проводится новое решение задачи, которое можно назвать вторым приближением. Оценка погрешности второго приближения от первого проводится с использованием локальной функции $L_{(i)}$.

Если параметр $L_{(i)}$ минимальный, то решение можно считать удовлетворительным, в противном случае следует получить следующее приближение, уточнив действующие силы. После этого рассматриваемый узел закрепляется в найденном положении, освобождается следующий узел сетки, и определяется таким же образом положение следующего узла. Такая процедура применяется ко всем узлам конечно-элементной сетки, после чего система переходит в состояние, близкое к равновесному, что в итоге приводит к определению положения упругой линии трубопровода.

Затем по формуле (7) определяются кольцевые напряжения, по (17) – продольные напряжения от изгибающего момента, а по (8) и (21) – продольные осевые напряжения.

Интенсивность напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ вычисляется из уравнения

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{кц}}^2 - 2\sigma_{\text{пр}}\sigma_{\text{кц}}}, \quad (37)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – суммарные продольные напряжения, включающие напряжения осевые и от изгибающего момента; $\sigma_{\text{кц}}$ – кольцевые напряжения.

На основе предложенной математической модели разработан программно-расчетный модуль (ПРМ) определения НДС трубопровода по данным измерений планово-высотного положения линейной части.

Примеры расчета пространственного расположения упругой линии трубопровода и графической зависимости максимальной интенсивности напряжений в сечении от расстояния представлены на рисунках 2 и 3.

Расчеты выполнены для подземного магистрального нефтепровода с основными характеристиками: диаметром – 1,22 м; толщиной стенки – 9 мм; температурным перепадом – 18,8 град.; рабочим давлением – 1,6 МПа; пределом текучести материала трубы – 460 МПа. Физико-механические свойства грунтов приняты в соответствии с таблицей 1.

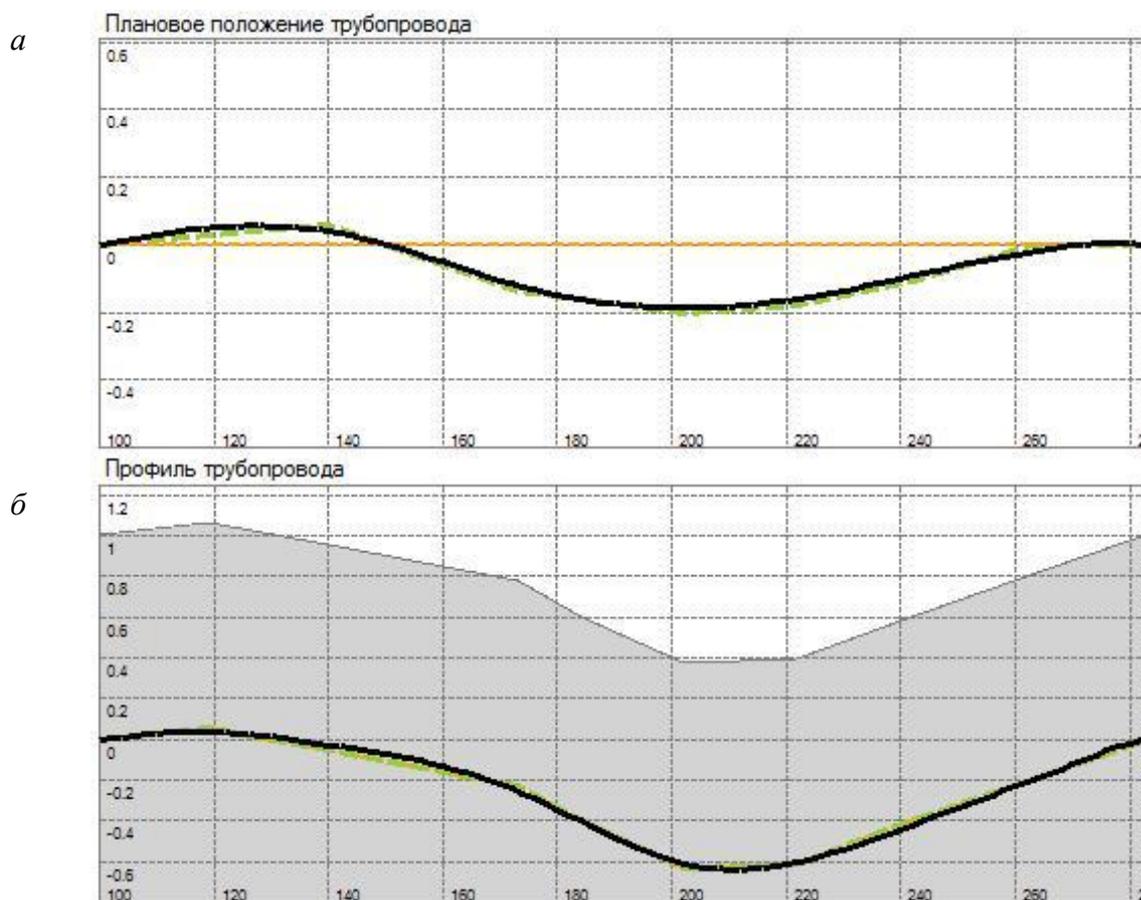


Рисунок 2. Расчетное положение трубопровода в плане (*a*) и по высоте (*б*)

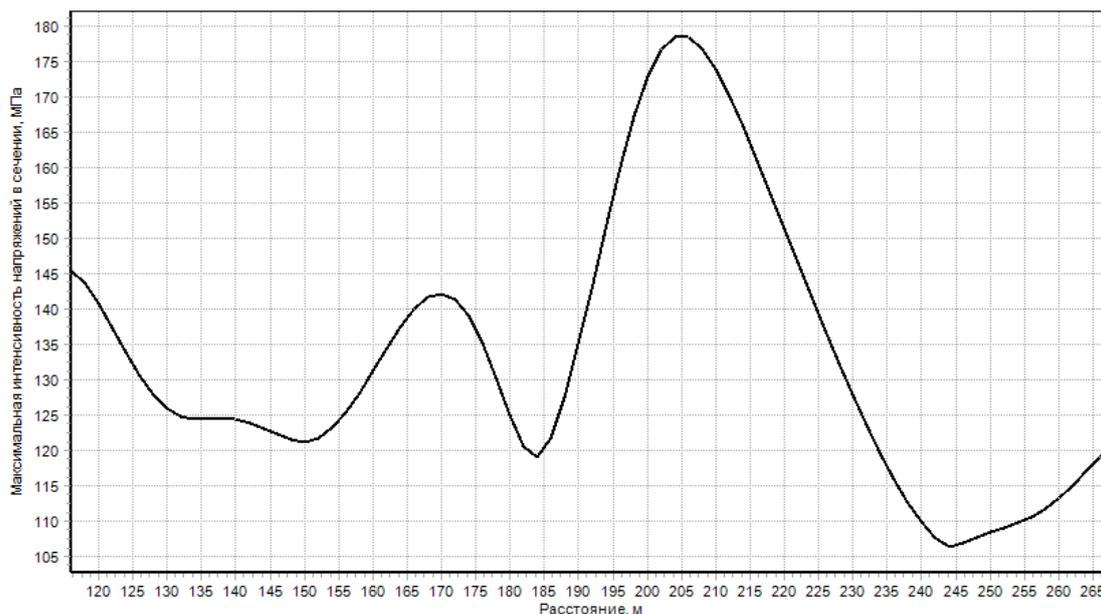


Рисунок 3. Графическая зависимость максимальной интенсивности напряжений в сечении от расстояния

Верификация математической модели

Верификация заключается в установлении правильности основных положений математической модели посредством их эмпирической проверки. Верификация математической модели определения НДС нефтепровода по данным измерений ПВП линейной части осуществлялась в два этапа.

На первом этапе проводились работы по сбору фактических данных для моделирования взаимодействия трубопровода с грунтом. Выбор участка трубопровода для натурных исследований был обусловлен наличием на середине рассматриваемого участка интеллектуальной вставки¹ для контроля НДС нефтепровода (ИВ).

Первый этап включал проведение полевых и камеральных работ.

В ходе выполнения полевых работ определялось плано-высотное положение трубопровода на участке длиной 180 м геодезическим способом с отрывкой шурфов до верхней образующей трубы и проводился отбор грунта из шурфов на разных глубинах (рисунок 4). Погрешность геодезических измерений составляла 10 см.

¹ Интеллектуальная вставка представляет собой отрезок трубы с измерительными датчиками, установленный в трубопровод и предназначенный для непрерывного или периодического измерения деформаций стенок трубопровода с целью дальнейшего анализа, оценки и прогнозирования его технического состояния, определения режима ограничения его эксплуатации. Показания датчиков ИВ передается на диспетчерский пункт.

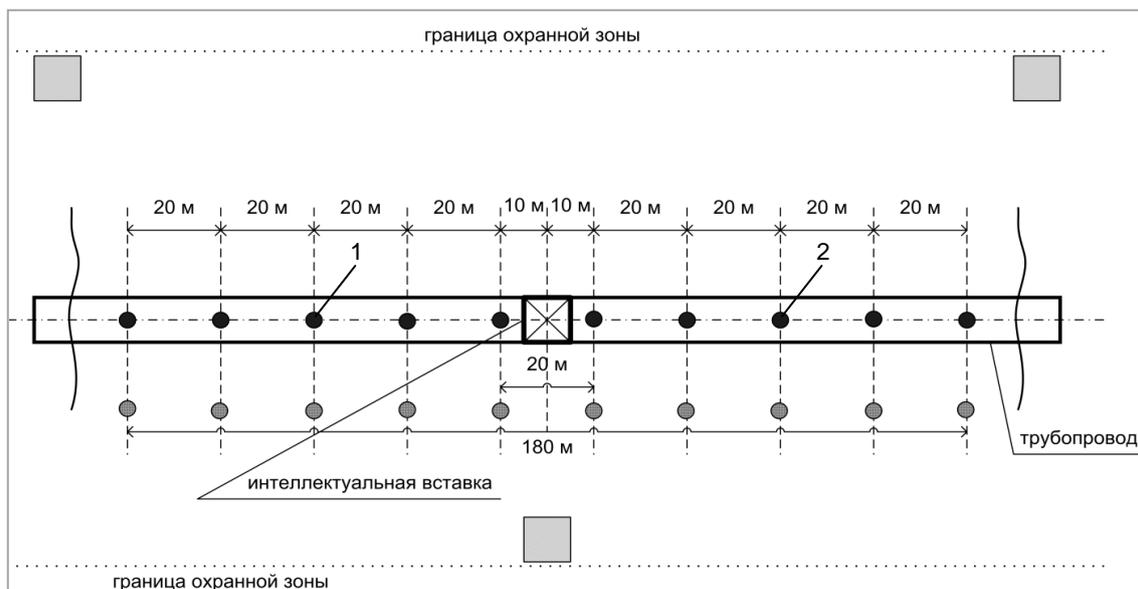


Рисунок 4. Схема определения планово-высотного положения трубопровода геодезическим способом

1, 2 шурфы для отбора грунтов;

□ – долговременный репер; ○ – точка съемочного обоснования; ● – вешка

Шурфы для отбора грунтов отрывались до глубины 0,5 м от нижней образующей трубопровода. Для анализа грунта взято 32 пробы на различных уровнях по высоте: на уровне верхней образующей; на уровне оси трубопровода; на уровне нижней образующей и на расстоянии 0,5 м от нижней образующей.

В ходе выполнения камеральных работ проводилось лабораторное определение физико-механических свойств грунтов (таблица 1).

Таблица 1. Средние значения физико-механических свойств грунтов

№ шурфа	Наименование грунта	γ , Н/м ³	n , б/р	$R_{пред}$, кПа	E , МПа	C , МПа	φ , град	μ , б/р
1	Песок средней крупности, средней плотности	18293	0,57	433	39,1	0,005	34,7	0,32
2	Песок мелкий, средней плотности	17901	0,701	283	22,1	0,021	28,3	0,34

Здесь приняты следующие обозначения для свойств грунтов: γ – объемный вес; n – коэффициент пористости; $R_{пред}$ – несущая способность; E – модуль упругости; C – удельное сцепление; φ – угол внутреннего трения; μ – коэффициент Пуассона.

На втором этапе проводились расчеты интенсивности напряжений с применением программно-расчетного модуля и сопоставление результатов

расчетов с показаниями интеллектуальных вставок. Достоверность определялась из выражения:

$$100\% - \Delta\sigma_{\text{ПРМ}}, \quad (38)$$

здесь $\Delta\sigma_{\text{ПРМ}} = 100\% \left| \frac{\sigma_{\text{расч}} - \sigma_{\text{изм}}}{\sigma_{\text{расч}}} \right|$ – погрешность ПРМ по расчету интенсивности напряжений, %.

Результаты сравнения вычислений с помощью ПРМ с показаниями ИВ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты проверки точности результатов расчетов с применением ПРМ

№ п/п	Интенсивности напряжений, МПа		Точность ПРМ по расчету интенсивности напряжений, %
	По данным датчиков, установленных на ИВ $\sigma_{\text{изм}}$, МПа	Результаты расчетов с применением ПРМ $\sigma_{\text{расч}}$, МПа	
1	108,05	108,04	99,99
2	137,25	138,51	99,09
3	129,95	130,03	99,94
4	137,25	136,17	99,21
5	137,25	137,74	99,64
6	151,85	155,55	97,62
7	151,85	153,24	99,09
8	137,25	135,26	98,53
9	133,60	131,10	98,09
10	151,85	159,75	95,05

Выводы

Разработанный на основе предложенной математической модели программно-расчетный модуль позволяет оценить прочность трубопровода по данным измерений пространственного положения линейной части с достоверностью не менее 95%. В целом, учитывая точность измерения ПВП, суммарная ошибка показателя прочности трубопровода будет составлять не более 15%.

Литература

1. Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Гумеров К.М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 2001. 305 с.
2. Гумеров К.М., Идрисов Р.Х., Гумеров И.К. Оценка напряженного состояния и допустимого рабочего давления на подводном переходе магистрального нефтепровода // Материалы III республиканского научно-технического семинара. Уфа, 2002. С.53-60.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 544 с.
5. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.
6. Татур Г.К. Курс сопротивления материалов. Ч.II. М.: Высшая школа, 1963. 215 с.
7. Численные методы /Данилина Н.И.и др. М.: Высшая школа, 1976. 368 с.

MATHEMATICAL MODEL OF DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE OIL PIPELINE BY MEASUREMENTS OF THE LINEAL PART'S PLANNED-ALTITUDINAL LOCATION

Yu.V. Larionov

Emergency Situations Research Center, Moscow, Russia

e-mail: ydnepra@yandex.ru

Abstract. In order to assess the impact of ground changes on the stress-strain state of underground pipelines a mathematical model based on the minimization of the Lagrange function was offered. The accuracy of its results was analyzed by comparison with the results of on-site surveys of the underground main oil pipeline on the sections with intellectual embeddings. The results of the verification were presented. It was found that the model allowed to determine the actual safety factor and residual life of the pipeline with reasonable accuracy based on the measurement data of the planned-altitudinal location, to identify in the shortest period by calculation potentially dangerous and critical areas of the facility that need the engineering protection or reconstruction.

Keywords: oil pipeline, main, planned-altitudinal location, lineal part, stress-strain state, ground changes, intellectual embedding.

References

1. Gumerov A.G., Gumerov R.S., Gumerov K.M. Bezopasnost' dlitel'no yekspluatiruemyh magistral'nyh nefteprovodov. M.: Nedra, 2001. 305 p.
2. Gumerov K.M., Idrisov R.Kh., Gumerov I.K. Ocenka napryazhennogo sostoyaniya i dopustimogo rabocheho davleniya na podvodnom perekhode magistral'nogo nefteprovoda //Materialy III respublikanskogo nauchno-tehnicheskogo seminaru. Ufa, 2002. P.53-60.
3. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti. M.: Nauka, 1979. 560 p.
4. Zienkiewicz O. The finite element method in engineering science. M.: Mir, 1975. 544 p.
5. Darkov A.V., Shpiro G.S. Soprotivlenie materialov. M.: Vysshaya shkola, 1989. 624 p.
6. Tatur G.K. Kurs soprotivleniya materialov. Vol.II. M.: Vysshaya shkola, 1963. 215 p.
7. Danilina N.I., Dubrovskaya N.S., Kvasha O.P. etc. Chislennye metody. M.: Vysshaya shkola, 1976. 368 p.

Сведения об авторе

Ларионов Ю. В. – начальник лаборатории неразрушающего контроля ООО «ЦИЭКС», Москва, Россия.

Y.V. Larionov, head of Laboratory of Nondestructive Testing of the Emergency Situations Research Centre, Moscow, Russia.

8 (495) 221-84-02; ydnepra@yandex.ru