

УДК 622.692.4

А. А. Александров, С. П. Сущев,
П. А. Ревель - Муроз, Д. Ю. Грязнев

МОНИТОРИНГ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОПОЛЗНЕВЫХ УЧАСТКАХ

Рассмотрен способ мониторинга магистральных трубопроводов на оползнеопасных участках с использованием геотехнических измерительных приборов. Геотехнический мониторинг оползнеопасных участков трубопровода требует существенных материальных и людских ресурсов. Автоматизация этого трудоемкого процесса позволяет сократить число задействованных в работе специалистов до одного оператора и получить полную и достоверную информацию о состоянии опасных геологических процессов на участках мониторинга.

E-mail: daniel@bmstu.ru

Ключевые слова: трубопровод, магистральный, оползень, опасные геологические процессы, инклинометрический зонд, мониторинг.

Рельеф территории РФ выражен разнообразными формами — горами, низменностями, возвышенностями; достаточно часто происходят оползни, которые угрожают не только зданиям и сооружениям жилого назначения, но и производственным объектам, таким как магистральные трубопроводы.

Геотехнический мониторинг оползнеопасных участков требует существенных материальных и людских ресурсов. В связи с этим предлагается автоматизировать процесс мониторинга состояния грунтового массива с помощью современных измерительных приборов — инклинометрических зондов (рис. 1, а).

Инклинометрические зонды — цилиндрические приборы из коррозионно-стойкой стали, оснащенные двухосным сервоакселеромером. Они измеряют углы наклона в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Инклинометрический зонд оснащен двумя парами направляющих колес, которые при монтаже располагаются в направляющих обсадной трубы (рис. 1, б), что позволяет четко зафиксировать инклинометр относительно измерительной оси.

Для контроля перемещений грунтового массива инклинометрические зонды размещают в обсадной трубе диаметром 70 мм, смонтированной в предварительно пробуренную скважину (рис. 2). Места бурения скважин, число инклинометров и их взаимное расположение определяют, исходя из результатов инженерно-геологических изысканий и

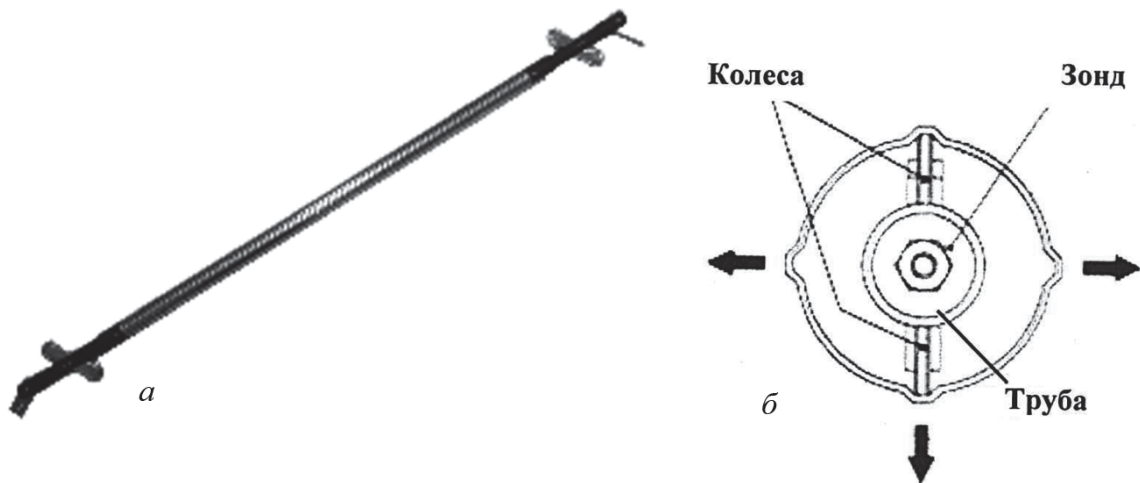


Рис. 1. Инклинометрический зонд (а) в обсадной трубе (б)

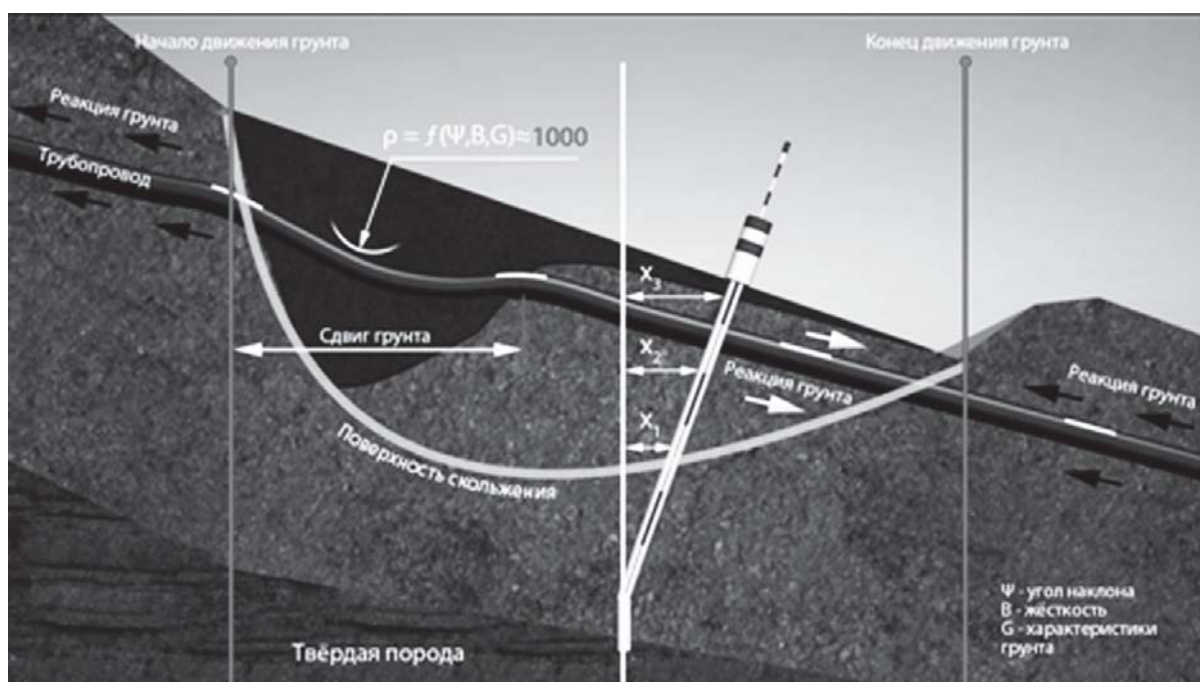


Рис. 2. Принципиальная схема мониторинга грунтового массива

расчетов зеркала скольжения оползня. Для предварительной обработки результатов измерения углов наклона обсадной трубы в инклинометрической скважине используется 24-разрядный АЦП; для передачи данных применяются LPD-радиомодемы с диапазоном рабочих частот от 433,05 до 434,79 МГц; для электропитания применяются взрывозащищенные, высокотемпературные, литий-тионилхлоридные элементы питания повышенной надежности емкостью 18 А·ч.

Скважинный способ размещения оборудования позволяет обеспечить влаго- и термоизоляцию. Измерение и передача данных с участков мониторинга проводятся с настраиваемой периодичностью (квазинепрерывно). За счет применения высокотехнологичного и энергоэффективного оборудования инклинометрическая скважина может находиться в работоспособном состоянии (до полного разряда батарей) в течение двух лет при периодичности измерений один раз в час.

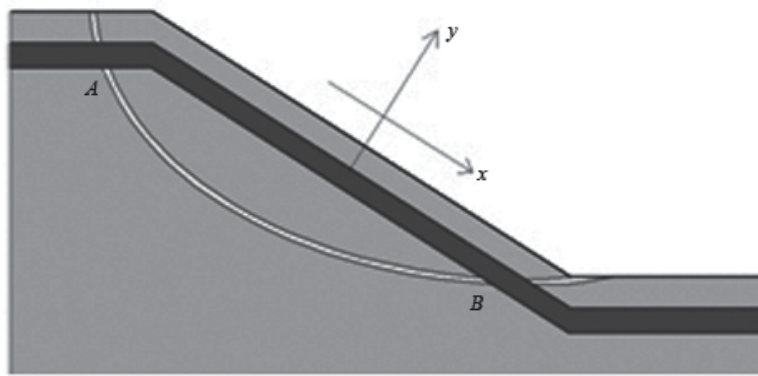


Рис. 3. Схема состояния трубопровода в зоне продольного сдвига грунта

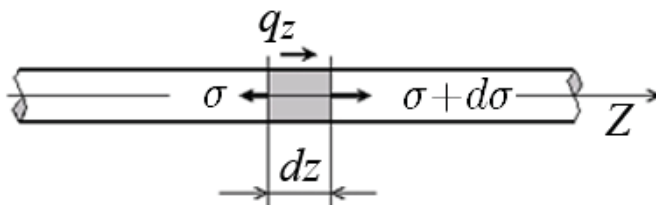


Рис. 4. Элемент трубы и действующие силы

В каждом из установленных инклинометрических зондов происходит преобразование углов наклона в диапазоне $-20^\circ \dots +20^\circ$ в ток в диапазоне $4 \dots 20$ мА. Ток имеет линейную зависимость от синуса угла $I = f(\sin \alpha)$. Специальное программное обеспечение, обрабатывающее результаты измерений, выполняет обратное преобразование $\alpha = \arcsin f(I)$, где I — ток, мА; α — полученный угол отклонения зонда в градусах.

Для пересчета углов наклона, получаемых с помощью инклинометров, в смещение грунта используется следующая зависимость:

$$x_i = x_{i-1} + (Z_{i-1} - Z_i) \sin \alpha, \quad (1)$$

где x_i — смещение грунта на уровне i -го датчика; x_{i-1} — смещение грунта на уровне $(i - 1)$ -го датчика; Z_i — глубина размещения i -го датчика; Z_{i-1} — глубина размещения $(i - 1)$ -го датчика; α — результат измерения угла, полученный с i -го датчика.

Для мониторинга изменения положения трубопровода могут применяться горизонтальные инклинометрические зонды, закрепляемые на теле трубопровода при помощи хомутов и контролирующие угол его наклона, который используется для расчета изменения высотного положения трубопровода.

Рассмотрим состояние трубопровода при продольном сдвиге грунта (рис. 3).

Уравнение состояния трубопровода при продольном сдвиге получим из условия равновесия элемента трубы длиной dz (рис. 4). Сила, с которой действует грунт на поверхность элемента трубы dz

$$dQ = dz \cdot q_z, \quad (2)$$

где q_z — распределенная по площади поверхности трубы продольная сила со стороны окружающего грунта (реакция грунта в продольном направлении, отнесенная к единице длины трубы).

В данной задаче силы q_z , Q и dQ направлены параллельно оси трубопровода.

Сила, с которой действуют на элемент dz остальные части трубопровода (слева и справа):

$$dN = \pi D \delta_T d\sigma, \quad (3)$$

где D — наружный диаметр трубопровода; δ_T — толщина трубы; σ — продольное напряжение, определяемое как

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{dw}{dz},$$

здесь E — модуль деформации стали; ε — относительная деформация; w — продольное смещение трубы.

Условие равновесия элемента длиной dz имеет вид

$$dQ + dN = 0. \quad (4)$$

Преобразуем зависимость (4) с учетом (2) и (3):

$$dzq_z + \pi D \delta_T d\sigma = 0; \quad \frac{d\sigma}{dz} = -\frac{q_z}{\pi D \delta_T}.$$

Получаем дифференциальное уравнение смещения трубопровода при продольном сдвиге грунта

$$\frac{d^2w}{dz^2} = -\frac{q_z}{\pi D E \delta_T} \quad (5)$$

Решение уравнения зависит от вида функции q_z , описывающей распределение сил сцепления между грунтом и трубопроводом, которые возникают из-за продольного сдвига грунта относительно трубы. Характер этих сил показан на рис. 5.

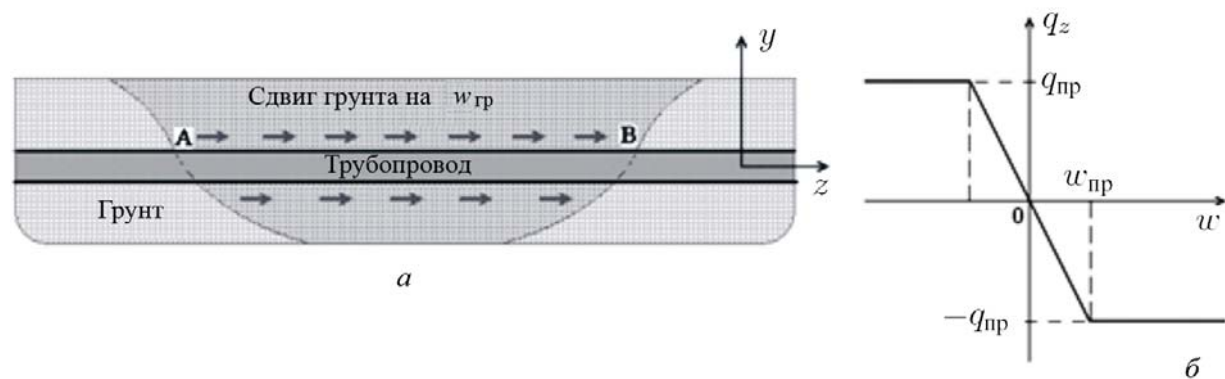


Рис. 5. Моделирование реакции грунта при продольном сдвиге:
 a — расчетная схема; b — реакция грунта

Природа сил сцепления (реакции грунта) q_z подобна природе сил трения. Они растут с увеличением давления грунта снаружи трубы $P_{гр}$ и сдвига трубы относительно грунта. Однако этот рост может происходить только до определенного предела; при дальнейшем сдвиге грунта реакция остается на достигнутом предельном уровне $q_{пр}$. Если смещение трубы обозначить w , сдвиг грунта $w_{гр}$ (рис. 5, а), то относительный сдвиг выражается как разность

$$\Delta w = (w - w_{гр}). \quad (6)$$

Реакция упругого грунта описывается выражением

$$q_z = -C_w \pi D \Delta w, \quad (7)$$

где C_w — коэффициент постели при продольном сдвиге; Δw — сдвиг трубы относительно грунта.

Предельная реакция при продольном сдвиге грунта определяется по формуле [1]

$$q_{пр} = (q_{св} + 2\gamma_{гр}^{зас} c_h \pi D^2) \operatorname{tg} \varphi_{гр}^{зас} + 0,6\pi D c_{гр}^{зас};$$

$$q_{св} = -\frac{\pi \gamma_T}{4} [D^2 - (D - 2\delta_T)^2] - \frac{\pi \gamma_H}{4} (D - 2\delta_T)^2 - \pi \gamma_{и} \delta_{и} (D + \delta_{и}), \quad (8)$$

где $q_{пр}$ — предельная сила смещения; $q_{св}$ — собственный вес трубопровода; γ_T , γ_H , $\gamma_{и}$ и $\gamma_{гр}^{зас}$ — удельные веса металла трубы, нефти, изоляции и грунта/засыпки.

Приведем численный метод получения решений, пользуясь методом конечных элементов.

Метод конечных элементов основан на минимизации функции Лагранжа для участка трубопровода, находящегося под действием заданных сил. Минимуму функции Лагранжа в пределах всего трубопровода соответствует минимум на каждом отдельном малом участке, входящем в состав всего трубопровода в целом.

Участок трубопровода разделим на конечные элементы длиной h (рис. 6). Рассмотрим два соседних элемента с общим узлом i и составим условие минимума функции Лагранжа.

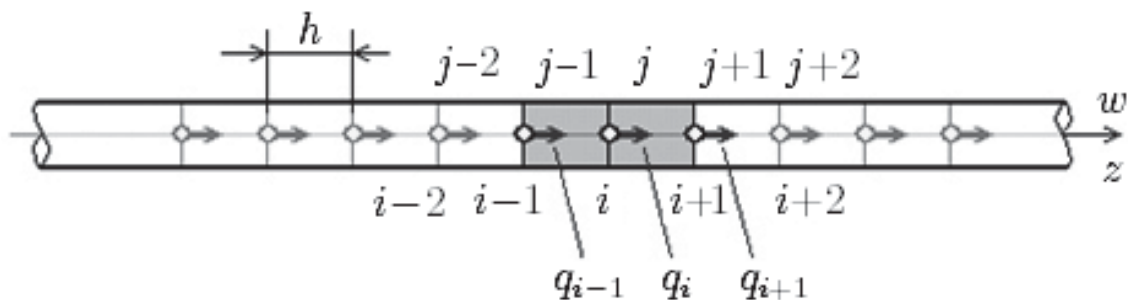


Рис. 6. Конечно-элементная сетка при продольном сдвиге грунта

Введем необходимые обозначения: h — размер конечного элемента; $i, i-1, i+1, \dots$ — номера узлов конечно-элементной сетки; $j, j-1, j+1, \dots$ — номера конечных элементов; $q_i, q_{i-1}, q_{i+1}, \dots$ — продольные силы, действующие на конечные элементы длиной h (значения погонной силы).

Запишем функцию Лагранжа двухэлементной системы как

$$L = \mathcal{E} - A, \quad (9)$$

где \mathcal{E} — энергия деформации этой системы; A — работа сил, приложенных к этой системе.

Условие минимума функции Лагранжа имеет вид

$$\delta L = 0; \quad \delta \mathcal{E} - \delta A = 0; \quad (10)$$

здесь δ — знак вариации при изменении положения узла i .

Энергия деформации двухэлементной системы описывается уравнениями [2]

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{j-1} + \mathcal{E}_j, \quad (11)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\pi D \delta_T h}{2} (\sigma_{j-1} \varepsilon_{j-1} + \sigma_j \varepsilon_j) = \frac{\pi D \delta_T h E}{2} (\varepsilon_{j-1}^2 + \varepsilon_j^2).$$

Используя выражения для деформаций

$$\varepsilon_{j-1} = \frac{dw}{dz} = \frac{w_i - w_{i-1}}{h}; \quad \varepsilon_j = \frac{w_{i+1} - w_i}{h}, \quad (12)$$

продолжаем преобразование выражений для \mathcal{E} и $\delta \mathcal{E}$:

$$\mathcal{E} = \frac{\pi D \delta_T h E}{2} \cdot \frac{1}{h^2} [(w_i - w_{i-1})^2 + (w_{i+1} - w_i)^2]; \quad (13)$$

$$\delta \mathcal{E} = \frac{d\mathcal{E}}{dw_i} \delta w_i. \quad (14)$$

Здесь варьируем только положением центрального узла при “закрепленных” положениях всех других узлов, поэтому в качестве переменного выступает только w_i :

$$\delta \mathcal{E} = \frac{\pi D \delta_T h E}{h^2} (2w_i - w_{i-1} - w_{i+1}) \delta w_i. \quad (15)$$

Вариация работы внешних сил при изменении положения узла i

$$\delta A = h q_i \delta w_i. \quad (16)$$

Подставив выражения (15) и (16) в (10), получим

$$\frac{\pi D \delta_T h E}{h^2} (2w_i - w_{i-1} - w_{i+1}) \delta w_i - h q_i \delta w_i = 0;$$

$$\frac{\delta_T E}{h^2} (2w_i - w_{i-1} - w_{i+1}) - q_i = 0;$$

$$w_i = \frac{1}{2} \left(w_{i-1} + w_{i+1} + \frac{q_i h^2}{\pi D \delta_T E} \right). \quad (17)$$

Таким образом, формула (17) выражает условие локального равновесия узла i (при заданных положениях других узлов).

Применяя выражение (17) последовательно ко всем узлам конечно-элементной сетки, получаем первое приближение к точному решению. Повторив многократно эту процедуру, получим второе, третье, ..., n -е приближение. Причем, каждое последующее приближение будет ближе к точному решению.

Затем вычисляются деформация и напряжение в трубопроводе для всех i -х элементов рассматриваемого участка:

$$\varepsilon_z(i) = \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2h}; \quad \sigma_z(i) = E\varepsilon_z(i). \quad (18)$$

Для примера рассмотрим задачу о продольном сдвиге грунта, вмещающего трубопровод.

Диаметр трубопровода составляет 1220 мм, толщина стенки трубы — 18 мм. Температурный перепад “эксплуатация–укладка” равен +20 °С. На участке AB (см. рис. 3) произошел сдвиг грунта с координатами 100...160 м, сдвиг вдоль трубопровода составляет 5 м. Глубина залегания трубопровода 1 м. Модуль упругости материала $2,06 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент температурного расширения материала трубы $1,2 \cdot 10^{-5}$; рабочее давление в трубе 5 МПа.

Удельные веса, Н/м³: стали — 77000; нефти — 8700; изоляции — 11000; грунта — 17600. Предел текучести материала трубы 500 МПа. Коэффициент постели грунта 2,37 МПа/м; предельная реакция грунта 42700 Н/м.

Результаты расчетов приведены на рис. 7. Как следует из графиков, в районе сдвига грунта основные показатели напряженно-деформированного состояния трубопровода соответственно равны: кольцевое напряжение 164,44 МПа; максимальное смещение по оси Z $6,3099 \cdot 10^{-3}$ м на отметке 154 м; максимальное продольное осевое напряжение 129,33 МПа на отметке 149 м; максимальная интенсивность напряжений 150,00 МПа на отметке 149 м; максимальная продольная осевая деформация $6,2780 \cdot 10^{-4}$ на отметке 149 м; коэффициент запаса по пределу текучести составляет 3,33.

Выводы. 1. Предложен способ автоматизированного мониторинга оползнеопасных склонов на участках прокладки трубопроводов.

2. Предложена математическая модель воздействия грунта на подземный трубопровод на участке оползня при продольном сдвиге.

3. Разработан алгоритм решения полученных уравнений и программа расчета. Решение построено на основе метода конечных элементов, что позволяет в процессе решения определять напряженно-деформированное состояние трубопровода.

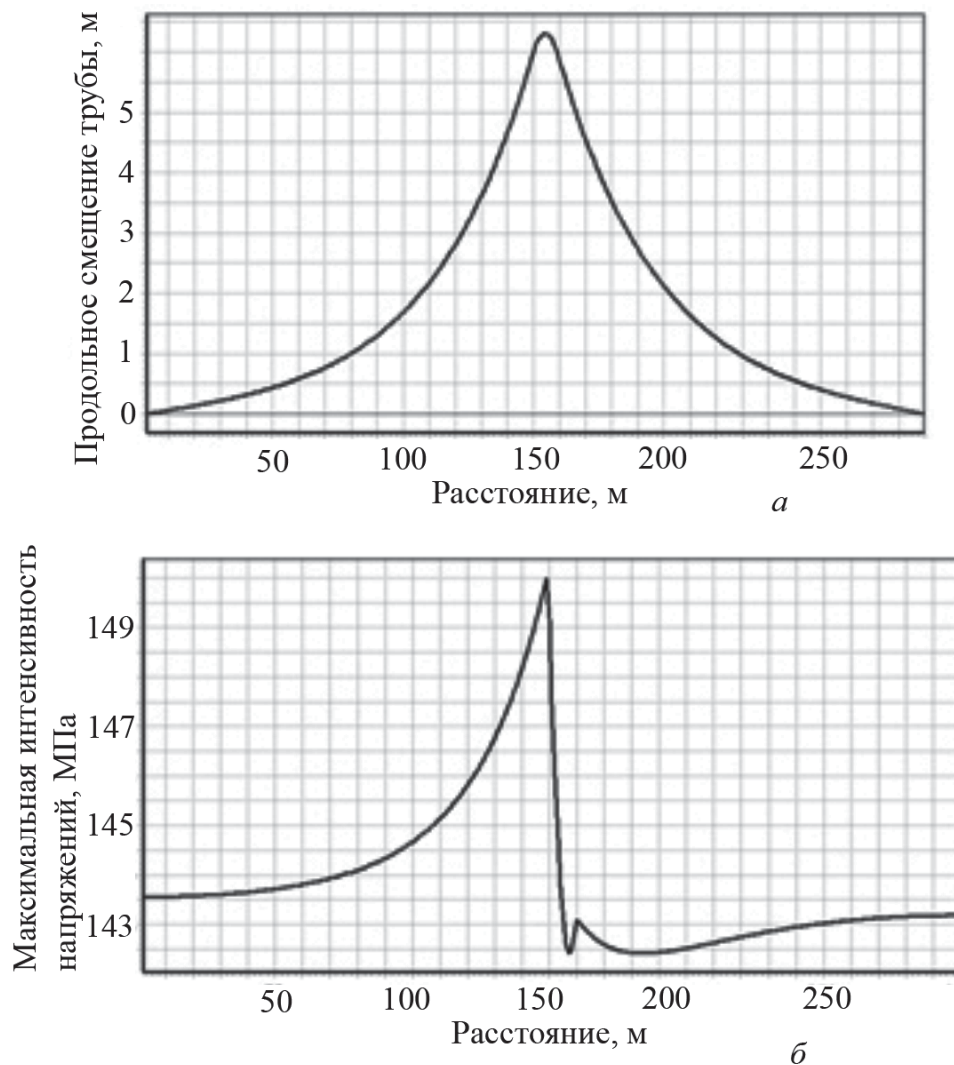


Рис. 7. Графическая зависимость продольного смещения (а) и осевой деформации (б) трубы от расстояния

4. Установлено, что зона возмущения поля напряжений в трубопроводе распространяется на несколько сот метров за пределы участка оползня.

Работа, результаты которой использованы в данной научной публикации, выполнена по заказу ОАО “АК “Транснефть” при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаммазов А. М., Зарипов Р. М., Чичелов В. А. и др. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. Т. 1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов. – М.: Интер, 2005. – 706 с.
2. Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Гумеров К. М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. – М.: Недра, 2001. – 305 с.

Статья поступила в редакцию 25.06.2012

Анатолий Александрович Александров окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. 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 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, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.

Сергей Петрович Сушев в 1981 г. окончил 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 и эксплуатации опасных производственных объектов.

S.P. Sushchev graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. 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, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.

Павел Александрович Ревель-Муроз в 2000 г. окончил Уфимский государственный нефтяной технический университет. Вице-президент ОАО “АК “Транснефть”

P.A. Revel'-Muroz graduated from the Ufa State Oil Technical University. Vice-president of ОАО “АК Transneft”.

Данил Юрьевич Грязнев в 2009 г. окончил Российский государственный социальный университет. Младший научный сотрудник Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

D.Yu. Gryaznev graduated from the Russian State Social University in 2009. Junior researcher of the Scientific and Educational Center of Extremal Situation Study of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 15 publications in the field of industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.