

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕМОНТИРУЕМОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

НИКОЛАЕВ В. В.

УМГ «Черкасытрасгаз»

E-mail: nikolaev-vv@utg.ua

Надежность бесперебойной эксплуатации магистральных трубопроводов является актуальной проблемой на этапе их эксплуатации. Решение этой задачи заключается в разработке эффективной системы предупреждения поломок и аварий магистральных трубопроводов как при проектировании и эксплуатации, так и при выборочном ремонте. Изменение прямолинейного, не нагруженного изгибающими моментами расположения приводит к изменению напряженно-деформированного состояния трубопровода. При этом нужно определить и контролировать напряженно-деформированное состояние в процессе проведения ремонтных работ.

Приведена математическая модель деформирования участка трубопровода в вязкоупругой постановке с учетом ползучести грунтов и моментального напряженного состояния трубопровода с целью оценки напряжений и несущей способности ремонтного участка трубопровода в зависимости от времени. Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода включает определение осевых (продольных) и окружных (кольцевых) напряжений с учетом осесимметричного деформирования и выполнен на основе полубезмоментной теории оболочек. Для обоснования достоверности данных выполнено сравнение результатов расчета с результатами решений аналитическими методами для различных случаев (деформация длинномерного участка трубопровода только под влиянием поперечного действия; деформация длинномерного участка под влиянием продольного напряжения; деформация длинномерного участка трубопровода, который лежит на упругом основании, под влиянием поперечного действия). Результаты сравнения показали, что погрешность расчетов не превышает 3 %.

С использованием разработанной модели выполнен анализ изменения напряженно-деформированного состояния участка трубопровода, который показал увеличение прогиба пролета по сравнению с решением задачи в упругой постановке. Расчетами также показано, что для корректной оценки условий эксплуатации трубопровода необходимо учитывать изменение ореола реологических процессов почв. На основании комплексного расчета трубопровода определены напряжения и зависимость прогиба трубопровода от времени для двух почв с различными реологическими свойствами.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, участок трубопровода, математическая модель деформирования.

Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

STRESS AND STRAIN STATE OF REPAIRING SECTION OF PIPELINE

NIKOLAEV V. V.

GPM "Cherkassitransgaz"

Reliability of continuous operation of pipelines is an actual problem. For this reason should be developed an effective warning system of the main pipelines' failures and accidents not only in design and operation but also in selected repair. Changing of linear, unloaded by bending position leads to the change of stress and strain state of pipelines. And besides this, the stress and strain state should be determined and controlled in the process of carrying out the repair works.

The article presents mathematical model of pipeline's section straining in viscoelastic setting taking into account soils creep and high-speed stress state of pipeline with the purpose

of stresses evaluation and load-supporting capacity of repairing section of pipeline, depending on time. Stress and strain state analysis of pipeline includes longitudinal and circular stresses calculation with account of axis-asymmetrical straining and was fulfilled on the base of momentless theory of shells. To prove the consistency of data there were compared the calculation results and the solution results by analytical methods for different cases (long pipeline's section strain only under influence of cross-axis action; long pipeline's section strain under influence of longitudinal stress; long pipeline's section strain; which is on the elastic foundation, under influence of cross-axis action). Comparison results shows that the calculation error is not more than 3 %.

Analysis of stress-strain state change of pipeline's section was carried out with development of this model, which indicates the enlargement of span deflection in comparison with problem's solution in elastic approach. It is also proved, that for consistent assessment of pipeline maintenance conditions, it is necessary to consider the areolas of rheological processes of soils. On the base of complex analysis of pipelines there were determined stresses and time-deflection relation for two types of soils with different rheological properties.

Keywords: stress and strain state, pipeline's section, mathematical model of deformation.

Fig. 6. Tab. 2. Ref.: 10 titles.

Введение. На Украине функционирует более 40 тыс. км магистральных трубопроводов, предназначенных для транспортировки нефти и газа. Многие из них отработали четверть века и более. Под влиянием внутренней нагрузки от транспортируемых по ним продуктов, внешней среды и режима эксплуатации постепенно снижается несущая способность трубопроводов, что неизбежно приводит к их износу и требует ремонта дефектных участков, которые появляются в процессе длительной эксплуатации, к замене этих участков трубопроводов новыми. В отдельных случаях приходится снижать рабочее давление, которое значительно отличается от проектного, что, в свою очередь, приводит к сокращению объемов транспортировки нефти или газа.

Немалый возраст трубопроводов объективно связан с увеличением риска аварий и отказов при эксплуатации в случае отсутствия эффективной системы их предупреждения. Повышение надежности трубопроводов длительной эксплуатации является актуальной проблемой на этапе их эксплуатации. Решение этой задачи заключается в разработке эффективной системы предупреждения отказов магистральных трубопроводов как при проектировании и эксплуатации, так и при выборочном ремонте. Ремонты с остановкой транспортирования газа или нефти, с выпуском газа из участка в атмосферу или удалением нефти и очисткой трубопровода, подлежащего ремонту, вырезанием и ввариванием технологической катушки приводят к значительным потерям газа или нефти и к невыполнению плана транспортировки, расходам на проведение огневых работ и т. п. [1, 2]. Поэтому актуальными являются методы ремонта без прекращения транспорта продукта.

Статистический анализ аварий показал, что одна из причин снижения надежности стальных трубопроводов – механические повреждения и коррозия металла труб [3]. Большая часть дефектов далека друг от друга, поэтому для их устранения требуется выборочный ремонт.

В технологический цикл ремонта линейной части магистрального трубопровода включается создание ремонтного котлована. При проведении земляных работ по раскопке трубопровода на открытом участке трубопро-

вод меняет свое проектное положение. Изменение прямолинейного, не нагруженного изгибающими моментами расположения приводит к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода. Это связано с тем, что при выемке грунта он провисает. Изменение температурного поля, в свою очередь, приводит к появлению дополнительных осевых усилий, действующих на трубопровод [4–7]. Кроме того, изменяется податливость основы почвы на краях котлована.

СНиП 2.05.06–85 [8] не дает прямых указаний или методических рекомендаций по определению напряжений в наиболее нагруженном сечении трубопровода с учетом изменения во времени несущей способности грунта на ремонтном участке. При этом требуется разработка математических моделей и методов расчета НДС ремонтного участка трубопровода, учитывающая влияние реологических процессов почв. Это позволит в большем объеме отображать действительные условия работы и решать проблемы прогнозирования конструктивной надежности трубопроводной системы уже на стадии проектирования.

Математическая модель деформирования участка трубопровода на вязкоупругой основе с учетом ползучести грунтов и моментального напряженного состояния трубопровода на границах ремонтного котлована приводится автором. Уравнение продольно-поперечного изгиба длинномерного участка трубопровода ($L/l > 3$) на вязкоупругой основе получено с учетом развития теории продольно-поперечного изгиба балки на упругом основании

$$El(x)\frac{d^4w}{dx^4} - N(x)\frac{d^2w}{dx^2} + \alpha(x, t)w = q(x), \quad (1)$$

где w – прогиб трубопровода; $El(x)$ – жесткость трубопровода на изгиб; $N(x)$ – сжимающее продольное усилие от внутреннего давления; $q(x)$ – интенсивность внешнего напряжения; $\alpha(x, t)w$ – реакция почвы в сечении x трубопровода в период времени t .

При этом на границах участка трубопровода длиной L (рис. 1) наложены граничные условия в виде перемещений δ_1, δ_2 и углов поворота сечений φ_1, φ_2 в зависимости от профиля трассы.

Учет ползучести грунтов на границах ремонтного котлована длиной l_1 (рис. 1) представлен теорией Л. Больцмана [9] и имеет вид интегрального уравнения Вольтера 2-го рода

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{гр}} + \frac{1}{E_{гр0}} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau. \quad (2)$$

Из уравнения (1) получили выражение для модуля деформации грунта

$$E_{гр}(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{E_{гр0}}{1 + \frac{1}{\sigma(t)} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau}, \quad (3)$$

где $E_{гр0}$ – модуль деформации грунта в момент времени $t = 0$; $\sigma(t)$ – контактное напряжение.

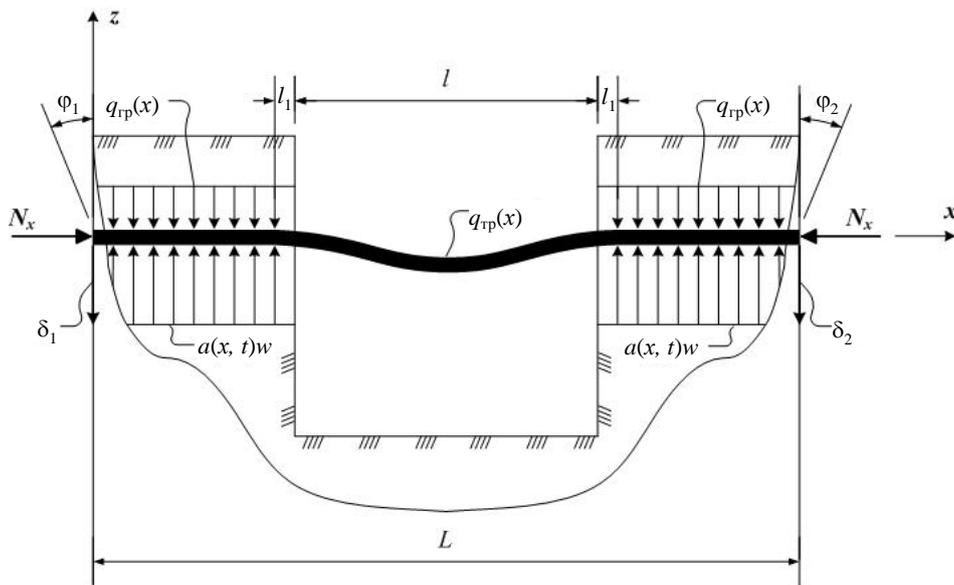


Рис. 1. Схема длинномерного участка трубопровода на вязкоупругом основании:
 $q_{гр}(x)$ – собственный вес трубопровода; $q_{гр}(x)$ – то же грунта;
 $N(x)$ – продольная сжимающая сила; $a(x, t)w$ – реакция основы почвы;
 L – длина ремонтного участка трубопровода; l – то же ремонтного котлована;
 l_1 – то же участка учета ползучести грунта; δ_1, δ_2 и φ_1, φ_2 – смещения
и углы поворота сечений на границах длинномерного участка трубопровода

Достаточно удовлетворительным и необходимым условием является слабосингулярное ядро А. Р. Ржаницына [8, 10]:

$$K(t - \tau) = Ae^{-\beta(t-\tau)}(t - \tau)^{\gamma-1}; \quad (4)$$

$$\int_{\tau}^1 K(t - \tau) d\tau = A \left((\beta e)^{-\gamma} e^{\beta(t-\tau)} \Gamma(\gamma + 1) - \gamma (\beta(e - \tau))^{-\gamma} e^{\beta(t-\tau)} \Gamma(\gamma, \beta(t - \tau)) \right) / \gamma, \quad (5)$$

где A, γ, β – параметры ядра ползучести, которые определяются методом наложения экспериментальной и теоретической кривых ползучести.

Числовое решение (3), (5) возможно только в случае, если известен закон изменения контактных напряжений $\sigma(t)$ по поверхности конструкции в зоне контакта с грунтом. Взаимодействие трубопровода с грунтом описывается зависимостью сопротивления грунта $q_{гр}$ от поперечного смещения трубы w в момент времени t

$$q_{гр} = -dc(t)w \quad \text{при} \quad |w| \leq \frac{q_{нр}}{dc(t)}, \quad (6)$$

где $c(t)$ – коэффициент нормального сопротивления грунта; d – наружный диаметр трубы.

Соотношение (6) справедливо до того времени, пока сопротивление грунта меньше его несущей способности

$$q_{гр} = q_{нр} \quad \text{при} \quad |w| > \frac{q_{нр}}{dc(t)}; \quad q_{нр} = R_{гр}d, \quad (7)$$

где $R_{гр}$ – условная несущая способность грунта.

Величина жесткости грунта α зависит от коэффициента нормального сопротивления грунта c и ширины сопротивляющейся поверхности (наружного диаметра трубопровода d) в момент времени t рассматриваемого сечения трубопровода x

$$\alpha(t) = c(t)d. \quad (8)$$

Зависимость коэффициента нормального сопротивления грунта от его физико-механических свойств и времени записывается в виде

$$c(t) = \frac{012E_{\text{гр}}(t)n}{(1 - \nu_{\text{гр}})^2} \sqrt{l_0 d}, \quad (9)$$

где $E_{\text{гр}}(t)$ – модуль деформации грунта неразрушающей структуры; n – коэффициент снижения модуля деформации грунта засыпки в сравнении с почвой неразрушающей структуры; $\nu_{\text{гр}}$ – коэффициент Пуассона грунта; l_0 – единичная длина трубопровода ($l_0 = 1$ м); d – наружный диаметр трубы.

В зависимости от нагрузок, воздействий и относительной жесткости трубопровода на всей глубине участка почва работает только в стадии, которая характеризуется условием (6).

Расчет балки на вязкоупругой основе определяет только продольные напряжения. На самом деле, при действии внутреннего давления в трубе возникают как осевые (продольные), так и окружные (кольцевые) напряжения. Поэтому расчет НДС при изгибе осесимметричной цилиндрической оболочки ведется по безмоментной теории. Для контроля осесимметричного деформирования трубопровода на краях ремонтного котлована (рис. 1) применяли полубезмоментную теорию оболочек, которая позволила определить дополнительно возникающие кольцевые напряжения от действия грунта. Изменение реакции почвы во времени соответствовало $\alpha(x, t)$ дифференциального уравнения балки на вязкоупругой основе (1).

Дифференциальные уравнения равновесия тонкостенной цилиндрической оболочки запишем в смещениях в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{D}{r^3} \left(\frac{\partial^4 W}{\partial \varphi^4} \right) + B_{11} \left(W + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - p_z r &= 0; \\ B_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} r + B_{33} \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial \varphi} \right) + p_x r &= 0; \\ \frac{B_{11}}{r} \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + B_{33} r \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi \partial x} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) - \frac{D}{r^3} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right) + p_s r &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где W , U , V – соответственно радиальное, осевое и кольцевое смещения средней поверхности цилиндрической оболочки; B_{11} , B_{33} – величины интегральных характеристик жесткости; D – цилиндрическая жесткость; p_z , p_x , p_s – радиальная, осевая и окружная составляющие напряжения.

Граничные условия для жесткого зажима:

- геометрические условия: $W = 0$; $U = 0$; $V = 0$;
- статические условия: $M = 0$; $N = 0$.

Предельное состояние надземного участка напорного трубопровода соответствует условию равновесия максимальных продольных напряжений предела текучести металла. Несущую способность трубопровода (результатирующие напряжения) определяли по энергетической теории.

Обоснование расчета длинномерного участка трубопровода на упругом основании. Обоснование достоверности полученных результатов по расчету длинномерного участка трубопровода на упругом основании делали путем сравнения результатов расчета методом конечных разностей с результатами решений аналитическим способом. Для этого общую задачу разделили на несколько отдельных задач, имеющих точное решение:

- а) деформация длинномерного участка трубопровода только под влиянием поперечного действия;
- б) деформация длинномерного участка под влиянием продольного напряжения;
- в) деформация длинномерного участка трубопровода, который лежит на упругом основании, под влиянием поперечного действия.

Расчеты по отдельным текстовым задачам показывают, что различия по искомой функции прогиба w не превышают 1,5 %, если количество узлов метода конечных разностей более 80. Для обоснования внутреннего схождения результатов расчета НДС цилиндрической оболочки по полубезмоментной теории провели тестовый расчет прямоугольной пластины методом конечных разностей. Расчет погрешностей выполнен по средней точке для величины прогиба и моментов на изгиб, по средней крайней точке для величины, пересекающей силы сечения. Результаты расчета показывают, что при количестве узлов более 90 относительные погрешности составили не более 2 %.

Достоверность результатов расчета напряжений σ_s в окружном направлении обосновывали сравнением с результатом расчета σ_s по теории безмоментного напряженного состояния (решение Лапласа). При расчете конечных разностей погрешность вычисления составила 1 % при количестве более 100 узлов метода конечных разностей.

Алгоритм решения задачи деформирования во времени отработывали на тестовой задаче изгиба круглой пластины под влиянием сконцентрированной силы в центральной точке. Результаты оценивали в сравнении с решением методом аппроксимаций А. А. Ильюшина. Максимальное отклонение в исследуемом интервале времени ($(t - \tau) - 0,3$ мес.) не превышало 3,5 %. Также выполнен сравнительный анализ с аналитическим решением дифференциального уравнения (1) без учета сжимающей силы по способу функций Крылова. Различие по искомой функции изгиба составило 3 %.

Расчет НДС трубопровода длиной $L = 50$ м, пролетом $l = 10$ м. Модуль деформации грунта принят $E_{гр} = 800$ МПа; коэффициент Пуассона грунта $\nu_{гр} = 0,4$; параметры ядра ползучести грунта: $\gamma = 0,1456$ 1/ч; $A = 3,2949$ 1/год; $\beta = 0,1440$; коэффициент сопротивления грунта $c = 0,11316$ МПа/мм. Трубопровод выполнен наружным диаметром $d = 1020$ мм; толщина стенки $h = 12$ мм; внутреннее давление $p = 3$ МПа;

предел прочности материала трубы $\sigma_{\text{вр}} = 600$ МПа; предел текучести $\sigma_{\text{т}} = 420$ МПа; модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Исследование изменений НДС во времени (рис. 2, 3) доказывает, что для наземного участка трубопровода прогиб посередине пролета в момент времени $t = 1440$ ч увеличился на 172 %, напряжение изгиба от поперечного действия – на 82 %, по сравнению с упругим решением ($t = 0$ ч).

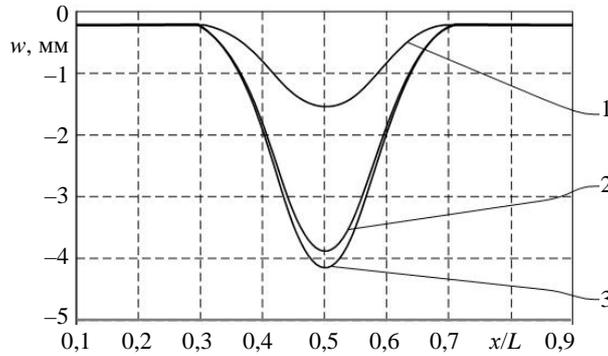


Рис. 2. График изменения прогиба w трубопровода при периоде времени: 1 – $t = 0$; 2 – 7 ч; 3 – 1440 ч

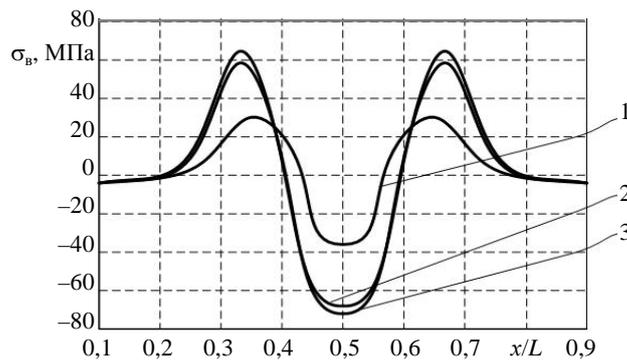


Рис. 3. График изменения продольных напряжений изгиба σ_v при периоде времени: 1 – $t = 0$; 2 – 7 ч; 3 – 1440 ч

Результаты расчета цилиндрической оболочки от действия максимального значения реакции почвы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение прогиба и напряжений оболочки во времени

Показатель	Период времени t , ч	
	0,17	1440
Прогиб w , мм	-0,0206	-0,0239
Осевое напряжение σ_x , МПа	-8,1530	-9,4700
Окружное напряжение σ_s , МПа	-0,1430	-0,1430

Результирующие прогибы и напряжения отображены на рис. 4, 5.

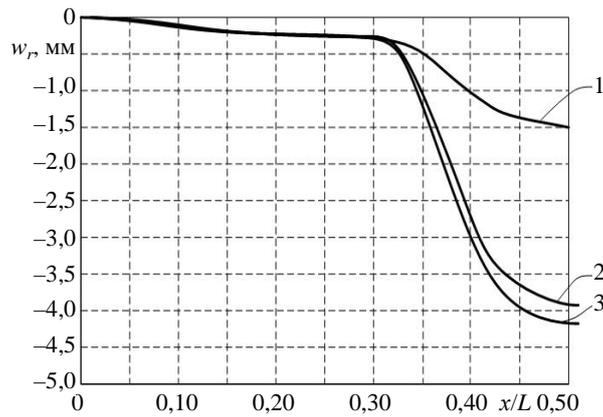


Рис. 4. График изменения результирующих прогибов w_r при периоде времени:
1 – $t = 0$; 2 – 7 ч; 3 – 1440 ч

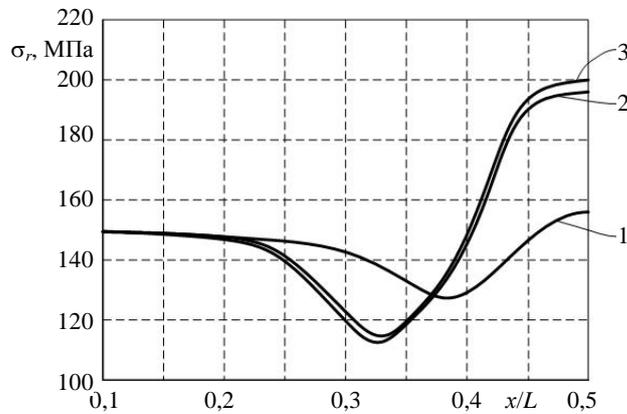


Рис. 5. График изменения результирующих прогибов σ_r при периоде времени:
1 – $t = 0$; 2 – 7 ч; 3 – 1440 ч

При $x = l/2$ (рис. 2) и $t = 1440$ ч значения результирующих величин:
 $w_r(x, t) = 4,15$ мм; $\sigma_r(x, t) = 208$ МПа.

Увеличение размера l_1 реологических процессов на краях ремонтного котлована (рис. 1) приводит к повышению прогиба длиномерного участка трубопровода (табл. 2).

Таблица 2

Изменение прогиба посередине пролета трубопровода ($x = l/2$) при различных значениях l_1 (рис. 2): $l_{11} = 2$ м; $l_{12} = 4$ м; $l_{13} = 5$ м

Прогиб, мм	Период времени t , ч						
	0	0,17	4	24	240	720	1440
w_{11}	-1,525	-3,727	-3,846	-3,994	-4,064	-4,112	-4,130
w_{12}	-1,525	-6,282	-6,778	-7,640	-8,012	-8,400	-8,544
w_{13}	-1,525	-7,228	-8,034	-9,392	-10,019	-10,744	-11,026

Выполнен комплексный расчет трубопровода длиной $L = 100$ м, пролетом $l = 32$ м. Модули деформации грунтов $E_{гр1} = E_{гр2} = 2000$ МПа, коэффи-

коэффициенты Пуассона грунтов $\nu_{гр1} = \nu_{гр2} = 0,4$. Расчетные коэффициенты нормального сопротивления грунтов $c_1 = c_2 = 0,11316$ МПа/мм в момент времени $t = 0$, расчетные параметры ядер ползучести грунтов: $\gamma_1 = 0,1477$ 1/ч; $A_1 = 9,4500$ 1/ч; $\beta_1 = 0,1472$ и $\gamma_2 = 0,1475$ 1/ч; $A_2 = 9,8866$ 1/ч; $\beta_2 = 0,1475$. Трубопровод выполнен из труб $d = 1420$ мм с толщиной стенки $h = 16,5$ мм, имеющих предел прочности $\sigma_{вр} = 600$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 470$ МПа, модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Трубопровод соответствует III категории. Интенсивность расчетных вертикальных напряжений: $q_{гр} = 10$ Н/мм; $q_{гр} = 20$ Н/мм. Рабочее давление в трубопроводе $p = 7,5$ МПа, расчетное кольцевое напряжение $\sigma_{кц} = 346,8$ МПа.

Зависимость прогиба трубопровода от времени для двух почв с незначительной разницей по реологическими свойствами приведена на рис. 6.

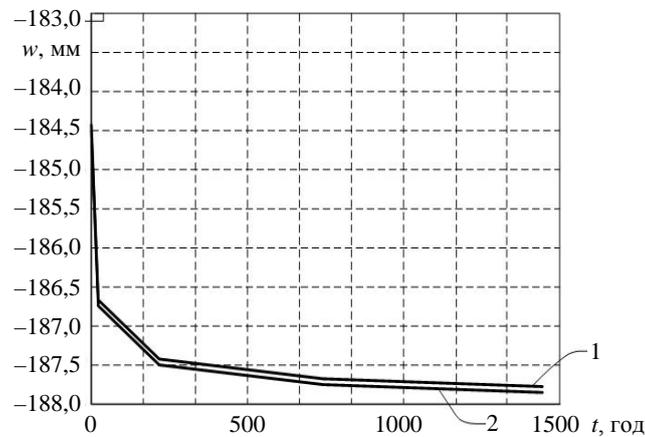


Рис. 6. Деформирование трубопровода во времени ($x = l/2$):

1 – почва: $\gamma_1 = 0,1477$ 1/ч; $A_1 = 9,4500$ 1/ч; $\beta_1 = 0,1472$;

2 – почва: $\gamma_2 = 0,1475$ 1/ч; $A_2 = 9,8866$ 1/ч; $\beta_2 = 0,1475$

В момент времени $t = 0$ максимальный прогиб посередине пролета $w = 12,4$ мм, а при времени 1440 ч составит: $w_1 = 18,8$ мм; $w_2 = 18,9$ мм.

Исследования изменения НДС ремонтного участка трубопровода во времени показывают, что для надземного участка трубопровода прогиб посередине пролета с учетом реологических процессов почв в момент времени $t = 1440$ ч (60 сут.) увеличился на 52 % по сравнению с упругим решением ($t = 0$ ч), а напряжение изгиба от поперечного действия – на 12 %. Максимальные продольные осевые результирующие напряжения составили 198 МПа при расчетном сопротивлении материала трубы $R_2 = 274,7$ МПа. Значения результирующих величин максимальных прогибов и напряжений ($x = l/2$ и $t = 1440$ ч): $w_r(x, t) = 19$ мм; $\sigma_r(x, t) = 472$ МПа.

ВЫВОДЫ

1. Математическая модель деформирования ремонтного участка трубопровода на вязкоупругой основе позволила оценить уровень напряжений и несущую способность ремонтного участка трубопровода во времени.

2. С учетом ползучести грунтов выполнен анализ изменения напряженно-деформированного состояния участка трубопровода, при этом произошло увеличение прогиба посередине пролета для первого и второго расчетов соответственно на 52 и 172 %, расчетных продольных напряжений – на 12 и 82 % по сравнению с упругим решением.

3. Исследование влияния моментного напряженного состояния тонкостенной цилиндрической оболочки с позиции полубезмоментной теории при переменном коэффициенте постели грунта во времени на напряженно-деформированное состояние ремонтного участка трубопровода показало увеличение прогиба цилиндрической оболочки (на 22 %) и результирующих напряжений (на 23 %) по сравнению с решением по теории стержня на вязкоупругой основе.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния ремонтного участка выполнен с учетом изменения ореола (l_1) реологических процессов почв. Расчет трубопровода (длина $L = 50$ м; пролет $l = 10$ м; наружный диаметр $d = 1020$ мм; толщина стенки $h = 12$ мм; длина $l_1 = 2$ м; внутреннее давление $p = 3$ МПа) показывает, что увеличение ореола реологии грунта (l_2) до 4 м допустимо. Дальнейшее увеличение значения до l_3 приведет к нарушению условий эксплуатации трубопровода.

5. Прогнозирование деформирования ремонтного участка трубопровода (длина $L = 100$ м; пролет $l = 32$ м; наружный диаметр $d = 1420$ мм; толщина стенки $h = 16,5$ мм; длина $l_1 = 2$ м; внутреннее давление $p = 7$ МПа) с учетом реологии грунтов (параметры ползучести грунта: $\gamma_2 = 0,1475$ 1/ч; $A_1 = 9,8866$ 1/год; $\beta_1 = 0,1475$) показало, что по истечении 60 сут. повышение уровня напряженно-деформированного состояния участка трубопровода находится в допустимых пределах. Дальнейшее увеличение ореола реологии грунта до l_2, l_3 в указанный период времени приводит к нарушению нормативных условий эксплуатации данного участка трубопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы міцності трубовідного транспорту / Ю. Є. Якубовський [і інш.]. – СПб.: Недра, 2003. – 200 с.
2. Груздз, В. Я. Обслуговування і ремонт газопроводів / Груздз, В. Я. [і інш.]. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – С. 553–555.
3. Майоров, В. В. Повышение ресурса эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов ОАО «Белтрансгаз» / В. В. Майоров // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2013. – № 5. – С. 76–81.
4. Галкін, В. О. Аналіз математичних моделей / В. О. Галкін. – М.: Біном. Лабораторія знань, 2011. – С. 82–86.
5. Мухелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – С. 707.
6. Мухелишвили, Н. И. Сингулярные интегральные уравнения / Н. И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1968. – С. 511.
7. Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації: ГБН В.3.1-00013741-12:2011. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – С. 40–48.
8. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85: взамен СНиП II-45-75: введ. 01.01.86. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 52 с.

9. Махненко, В. И. Ремонт магистральных трубопроводов сваркой без вывода их из эксплуатации / В. И. Махненко, В. С. Бут, О. И. Олейник // Проблемы прочности. – 2009. – № 5. – С. 86–100.

10. Бут, В. С. Основные направления развития технологии ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации под давлением / В. С. Бут, О. И. Олейник // Автоматическая сварка. – 2007. – № 5. – С. 42–50.

REFERENCES

1. Yakubovskiy, Yu. E., Maliushin, H. A., Iakubov'ska, C. B., & Platonov, O. M. (2003) *Problems of Pipeline Transport*. Saint Petersburg, Nedra. 200 p. (in Ukrainian).

2. Grudz, V. Ya., Tymkiv, D. F., Mykhalkiv, V. B., & Kostiv, V. V. (2009) *Maintenance and Repair of Pipelines*. Ivano-Frantsisk, Lileya-NV, 553–555 (in Ukrainian).

3. Maiorov, V. V. (2013) Efficiency Increasing of Operation Reliability of Main Pipelines OJSC “Beltransgas”. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 5, 76–81 (in Russian).

4. Galkin, V. O. (2011) *Analysis of Mathematical Models*. Moscow, Binom. Laboratory of Knowledge, 82–86 (in Ukrainian).

5. Muskhelishvili, N. I. (1966) *Some Significant Problems of Mathematical Theory of Elasticity*. Moscow, Nauka. 707 p. (in Russian).

6. Muskhelishvili, N. I. (1968) *Singular Integral Equation*. Moscow, Nauka. 511 p. (in Russian).

7. G B N B.3.1-00013741–12:2011 *Magistral'ni Gazoprovodi. Remont Dugovim Zvartuvanniam v Umovakh Eksploatatsii* [Natsionalny Standard Ukrainy. HBN B.3.1-00013741–12:2011. The Main Gas Pipelines. Repair by Arc Welding Under Operation Conditions]. Kiev: Minregionbud Ukraine, 2011, 40–48 (in Ukrainian).

8. S N i P 2.05.06-85. *Stroitel'nye Normy i Pravila. Magistral'nye Truboprovody* [SNiP 2.05.06–85. Building Regulations. The Main Pipelines]. Moscow: TSITP SSSR State Construction Committee, 1985. 52 p. (in Russian).

9. Maхненко, В. И., Бут, В. С., & Oleinik, O. I. (2009) Repair of the Main Pipelines in Operation by Welding. *Problemy Prochnosti* [Strength Problems], 5, 86–100 (in Russian).

10. Бут, В. С., & Oleinik, O. I. (2007) The Main Directions of Repair Technologies Development of the Main Pipelines under Stress. *Avtomaticheskaiia Svarka* [Automatic Welding], 5, 42–50 (in Russian).

Поступила 24.07.2014