

На правах рукописи

ПОНОМАРЁВА  
Татьяна Михайловна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
РЕМОНТИРУЕМОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА**

05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2008

Работа выполнена на кафедре теоретической и прикладной механики  
Тюменского государственного нефтегазового университета

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Якубовская Светлана Васильевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент  
Мальцева Татьяна Владимировна;  
кандидат технических наук, доцент  
Соколов Владимир Григорьевич

Ведущая организация: Уральский государственный технический  
университет (УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург)

Защита состоится «\_\_\_» декабря 2008 г. в «\_\_\_» часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.274.14 при Тюменском государственном  
университете по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15А, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского  
государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бутакова Н.Н.

### Актуальность темы.

На территории России протяженность магистральных газопроводов составляет 150 тыс. км, магистральных нефтепроводов – 48 тыс. км, нефтепродуктопроводов - более 30 тыс.км. Многие из них эксплуатируются длительное время в сложных геолого-климатических условиях, что приводит к техногенным воздействиям данных систем на окружающую среду.

Проблема обеспечения надежности трубопроводов объективно связана с увеличением риска аварий и отказов. Это ведёт к значительным экономическим потерям и серьезным экологическим последствиям. В 1995 году в России число отказов по различным причинам на магистральных и промысловых трубопроводах превысило 100 тысяч случаев. Решение этой проблемы заключается в разработке эффективной системы их предупреждения как в периоды проектирования и эксплуатации, так и во время выборочного ремонта магистральных трубопроводных сетей.

Статистический анализ аварий показал, что основными причинами снижения надежности стальных трубопроводов являются механические повреждения и коррозия металла труб. В цикл современной муфтовой технологии, позволяющей производить ремонт без остановки перекачки транспортируемого продукта, включается создание ремонтного котлована. То есть часть подземного трубопровода освобождается от грунта, и условия деформирования во времени этого участка существенно меняются по сравнению с проектным положением. Это связано с тем, что при выемке грунта трубопровод подвергается изгибу и изменяется податливость основания грунта на краях котлована.

СНиП 2.05.06-85 не дает прямых указаний и методических рекомендаций по определению напряжений в наиболее нагруженном сечении трубопровода с учетом изменения во времени несущей способности грунта на ремонтируемом участке.

Поэтому необходима разработка математических моделей и методов расчета напряженно-деформированного состояния ремонтируемого участка подземного трубопровода, учитывающих влияние реологических процессов грунтов. Это позволит более полно отражать действительные условия работы и решать проблемы прогнозирования конструктивной надежности трубопроводной системы уже на стадии проектирования.

Цель диссертационной работы заключается в прогнозировании деформирования во времени ремонтируемого участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах.

В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

- создать математическую модель деформирования во времени длинномерного участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах и моментного напряженного состояния трубопровода на краях ремонтного котлована;

- разработать методику расчета напряженно-деформированного состояния длинномерного участка трубопровода с учетом моментного напряженного состояния и переменного коэффициента нормального сопротивления грунта на краях ремонтного котлована;

- дать оценку напряженно-деформированного состояния длинномерного участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах.

На защиту выносятся:

- математическая модель деформирования во времени ремонтируемого участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах;

- методика расчета напряженно-деформированного состояния участка трубопровода с учетом ползучести грунта и моментного напряженного состояния трубы на краях ремонтного котлована;

- результаты исследования напряженно-деформированного состояния участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах.

Научная новизна состоит в следующем:

- разработана математическая модель деформирования во времени участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах и моментного напряженного состояния трубопровода на краях ремонтного котлована;
- разработана методика учета реологических процессов (ползучести) в грунтах на краях ремонтного котлована;
- разработана методика учета моментного напряженного состояния трубопровода на краях ремонтного котлована при переменном коэффициенте нормального сопротивления грунта;
- решена задача о деформировании участка трубопровода с учетом моментного напряженного состояния и ползучести грунтов на краях ремонтного котлована.

Достоверность результатов подтверждена сопоставлением численных результатов расчета с решениями частных задач другими методами. Дана оценка внутренней сходимости результатов решения методом конечных разностей при удержании различного количества узловых точек на исследуемом интервале.

Практическая ценность работы.

Разработанная методика расчета деформирования участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах может быть использована в проектных и научно-исследовательских организациях при проектировании и разработке современных технологий ремонта подземных магистральных трубопроводов.

Разработано прикладное программное обеспечение для расчета напряженно-деформированного состояния ремонтируемого участка трубопровода с учетом реологических процессов в грунтах.

Проведен анализ влияния реологических процессов в грунтах на деформированное состояние ремонтируемого участка трубопровода.

### Внедрение результатов.

Разработанная методика учета вязкоупругих свойств материала использована институтом «Нефтегазпроект» (ОАО) в проектировании выборочного ремонта нефтепроводов с использованием композитно-муфтовой технологии без остановки перекачки транспортируемого продукта.

### Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- региональной научно-практической конференции «Проблемы эксплуатации систем транспорта» (г. Тюмень, 24 ноября, 2006 г.);
- международной научно-технической конференции «Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли» (г. Тюмень, 27-29 марта 2007 г.);
- семинарах кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Тюменского государственного нефтегазового университета, 2006- 2008г.г.

### Публикации.

Основные положения работы опубликованы в 10 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, четырёх приложений прикладных программ, списка использованных источников, включающего 102 наименования. Объем работы составляет 151 страницы машинописного текста, 38 страниц рисунков и 6 страниц таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении содержится обоснование актуальности выбранной темы, определены цели работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов исследований. Даны основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе в работах А.Б.Айнбиндера, В.Л.Березина, П.П.Бородавкина, С.С.Вялова, А.И. Горковенко, Н.Н.Маслова, Л.Е.Мальцева, Л.Т.Роман, Тер-Степаняна, С.Б.Ухова, В.Е.Шутова, В.А.Флорина,

Н.А.Цытовича и других авторов описано поведение грунтов под воздействием внешних и внутренних нагрузок разного рода, приведены данные о реологии грунтов, изложены методы расчета на прочность и устойчивость оболочек трубопроводов. Однако несущая способность трубопроводов связанная с ползучестью грунтов исследована не достаточно полно. В работах С.В.Бояршинова, В.З.Власова, А.А.Ильюшина, М.А.Колтунова, В.И.Кучерюка, Т.В.Мальцевой, В.В.Новожилова, А.Н.Платонова, В.И.Самуля, Ю.Г.Сысоева, С.П.Тимошенко, А.Р.Ржаницына, А.П.Филина, Ю.Е.Якубовского, С.В.Якубовской и других авторов рассмотрены вопросы оценки напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек.

Сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрена математическая модель деформирования участка трубопровода на вязкоупругом основании с учетом ползучести грунтов и моментного напряженного состояния трубопровода на краях ремонтного котлована.

Уравнение продольно-поперечного изгиба длинномерного участка трубопровода ( $L/l > 3$ ) на вязкоупругом основании получено с учетом развития теории продольно-поперечного изгиба балки на упругом основании и представлено в виде

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

где  $w$  - прогиб трубопровода;  $EI(x)$  - жесткость трубопровода на изгиб;  $N(x)$  - сжимающее продольное усилие от внутреннего давления;  $q(x)$  - интенсивность внешней нагрузки;  $\alpha(x, t)w$  - реакция грунта в сечении  $x$  трубопровода в момент времени  $t$ .

При этом на границах участка трубопровода длиной  $L$  (рис. 1) наложены граничные условия в виде перемещений  $\delta_1, \delta_2$  и углов поворота сечений  $\varphi_1, \varphi_2$  в зависимости от профиля трассы.

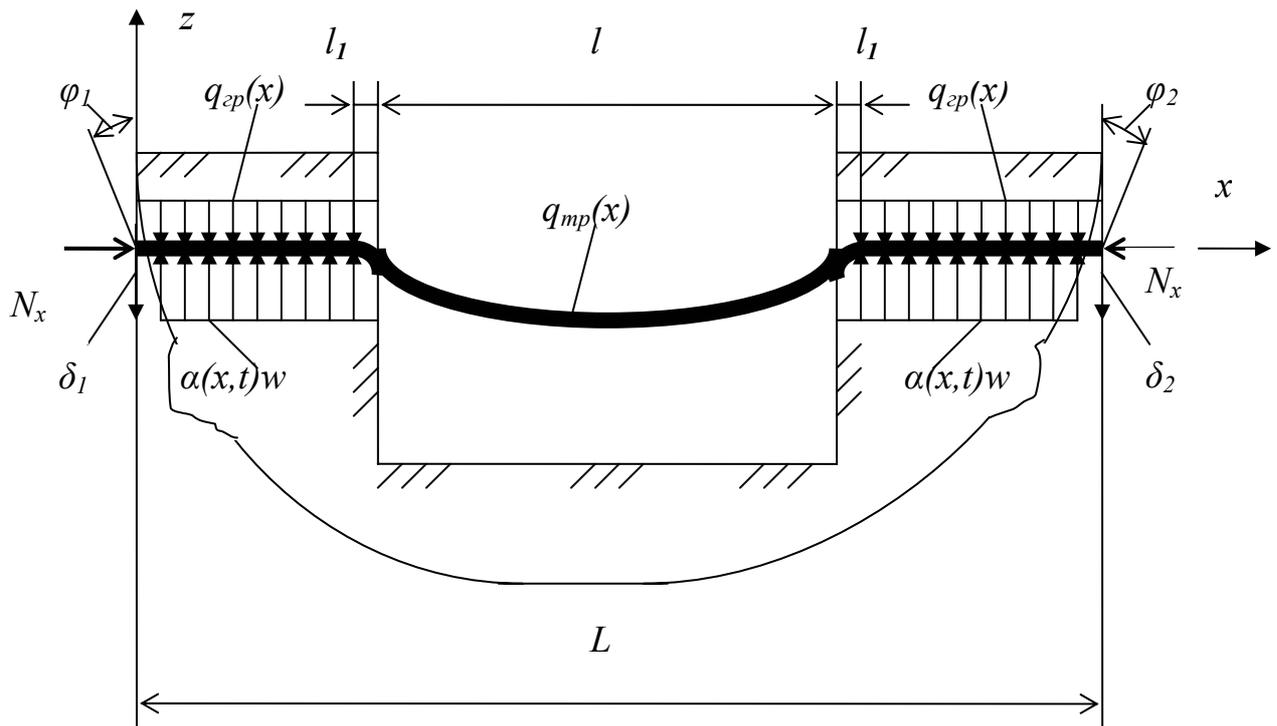


Рис. 1. Схема длиномерного участка трубопровода  
на вязкоупругом основании

$q_{mp}(x)$ - собственный вес трубопровода с продуктом;  $q_{zp}(x)$ - собственный вес грунта;  $N(x)$ - продольная сжимающая сила;  $\alpha(x, t)w$  - реакция основания грунта;  $L$  - длина ремонтируемого участка трубопровода;  $l$  - длина ремонтного котлована;  $l_1$  - длина участка учета ползучести грунта;  $\delta_1, \delta_2$  - перемещения и  $\varphi_1, \varphi_2$  - углы поворота сечений на границах длиномерного участка трубопровода

Учет ползучести грунтов на краях ремонтного котлована длиной  $l_1$  (рис. 1) представлен наследственной теорией Л.Больцмана и имеет вид интегрального уравнения Вольтерры 2-го рода:

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

где  $\varepsilon(t)$  - деформация грунта по вертикали (осадка);  $\sigma(t)$  - контактные напряжения;  $E_{zp}$  - модуль деформации грунта;  $t$  - момент времени

наблюдения;  $\tau$  - предшествующее моменту наблюдения время;  $K(t-\tau)$  - функция влияния ползучести.

Из уравнения (1) получили выражение для модуля деформации грунта

$$E_{zp}(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{E_{zp.0}}{1 + \frac{1}{\sigma(t)} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau}, \quad (3)$$

где  $E_{zp.0}$  - модуль деформации грунта в момент времени  $t=0$ ;  $\sigma(t)$  - контактные напряжения.

Достаточно удовлетворяющим необходимым требованиям является слабо сингулярное ядро А.Р.Ржаницына

$$K(t-\tau) = A \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot (t-\tau)^{\gamma-1}, \quad (4)$$

где  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  - параметры ядра ползучести, определяемые методом наложения экспериментальной и теоретической кривых ползучести.

Интеграл выражения (3) с учетом (4) аппроксимирован функцией вида:

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

Численное решение (3, 5) возможно только в случае, если известен закон изменения контактных напряжений  $\sigma(\tau)$  по поверхности конструкции в зоне контакта с грунтом.

Взаимодействие трубопровода с грунтом описывается зависимостью сопротивления грунта  $q_{zp}$  от поперечного перемещения трубы  $w$  в момент времени  $t$ :

$$q_{zp} = -d \cdot c(t) \cdot w, \quad \text{при } |w| \leq \frac{q_{np}}{d \cdot c(t)}, \quad (6)$$

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

Соотношение (6) справедливо до тех пор, пока сопротивление грунта меньше его несущей способности:

$$q_{zp} = q_{np}, \text{ при } |w| > \frac{q_{np}}{d \cdot c(t)}; q_{np} = R_{zp} \cdot d. \quad (7)$$

Здесь  $R_{zp}$  – условная несущая способность грунта.

Величина жёсткости грунта  $\alpha$  зависит от коэффициента нормального сопротивления грунта  $c$  и ширины опираемой поверхности (наружного диаметра трубопровода  $d$ ) в момент времени  $t$  рассматриваемого сечения трубопровода  $x$  как:

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

Зависимость коэффициента нормального сопротивления грунта от его физико-механических свойств и времени  $t$  представлена в виде

$$c(t) = \frac{0,12 E_{zp}(t)n}{\left(1 - (\nu_{zp})^2\right) \sqrt{l_0 d}}, \quad (9)$$

где  $E_{zp}(t)$  – модуль деформации грунта ненарушенной структуры;  $n$  – коэффициент снижения модуля деформации грунта засыпки по сравнению с грунтом ненарушенной структуры;  $\nu_{zp}$  – коэффициент Пуассона грунта;  $l_0$  – единичная длина трубопровода ( $l_0 = 1 \text{ м}$ );  $d$  – наружный диаметр трубы.

В зависимости от нагрузок, воздействий и относительной жесткости трубопровода на всей глубине рассматриваемого участка грунт работает только в стадии характеризуемой условием (6).

Расчет балки на вязкоупругом основании определяет только продольные напряжения. На самом деле при действии внутреннего давления в трубе возникают, как осевые (продольные), так и окружные (кольцевые) напряжения. Поэтому расчет напряженно-деформированного состояния при изгибе осесимметричной цилиндрической оболочки ведётся по безмоментной теории. Для учета осенесимметричного деформирования трубопровода на краях ремонтного котлована (рис. 1) применили

полубезмоментную теорию оболочек, позволяющую определить дополнительно возникающие окружные напряжения от действия грунта. Изменение реакции грунта во времени соответствует  $\alpha(x, t)w$  дифференциального уравнения балки на вязкоупругом основании (1).

Дифференциальные уравнения равновесия тонкостенной цилиндрической оболочки записаны в перемещениях в цилиндрической системе координат:

$$\frac{D}{r^3} \left( \frac{\partial^4 W}{\partial \varphi^4} \right) + B_{11} \left( W + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - p_z r = 0;$$

$$B_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} r + B_{33} \left( \frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial \varphi} \right) + p_x r = 0; \quad (10)$$

$$\frac{B_{11}}{r} \left( \frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + B_{33} r \left( \frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi \partial x} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) - \frac{D}{r^3} \left( \frac{\partial^3 W}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + p_s r = 0,$$

где  $W, U, V$  – соответственно радиальное, осевое и окружное перемещения срединной поверхности цилиндрической оболочки;  $B_{11}, B_{33}$  - величины интегральных характеристик жесткости;  $D$  –цилиндрическая жесткость;  $p_z, p_x, p_s$  - соответственно радиальная, осевая и окружная составляющие нагрузки.

Граничные условия для жёсткого защемления:

геометрические условия  $W=0; V=0; U=0;$

статические условия  $M=0; N=0.$

Предельное состояние надземного участка напорного трубопровода соответствует условию равенства максимальных продольных напряжений пределу текучести металла. Несущая способность трубопровода (результатирующие напряжения) определится по энергетической теории.

В третьей главе дается обоснование достоверности полученных результатов по расчету длинномерного участка трубопровода на упругом основании путем сравнения результатов расчета методом конечных разностей с результатами решения аналитическим способом. Для этого

общая задача разбивалась на ряд частных задач, имеющих точное решение: а) деформация длиномерного участка трубопровода только от действия поперечной нагрузки; б) деформация длиномерного участка трубопровода от действия продольной нагрузки; в) деформация длиномерного участка трубопровода, лежащего на упругом основании, от действия поперечной нагрузки.

Расчеты по частным тестовым задачам показали, что расхождение по искомой функции прогиба  $w$  не превышает 1,5%, если количество узлов метода конечных разностей более 80.

Для обоснования внутренней сходимости результатов расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки по полубезмоментной теории выполнен тестовый расчет прямоугольной пластины методом конечных разностей. Расчет погрешностей произведен по средней точке для величины прогиба и изгибающих моментов, по средней крайней точке для величины перерезывающих сил. Результаты расчета показали, что при количестве узлов больше 90 относительные погрешности составили не более 2%.

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

Алгоритм решения задачи деформирования во времени отработывался на тестовой задаче изгиба круглой пластины под действием сосредоточенной силы в центральной точке. Результаты оценивались в сравнении с решением методом аппроксимаций А.А. Ильюшина. Максимальное отклонение в исследуемом интервале времени  $(t-\tau)$  - 0,3 мес. не превышает 3,5 %. Также выполнен сравнительный анализ с аналитическим решением

дифференциального уравнения (1) без учета сжимающей силы по способу функций Крылова. Расхождение по искомой функции прогиба составило 3%.

В четвертой главе представлен расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода длиной  $L = 50$  м, пролетом  $l = 10$  м. Модуль деформации грунта  $E_{zp} = 800$  МПа, коэффициент Пуассона грунта  $\nu_{zp} = 0.4$ , параметры ядра ползучести грунта  $\gamma = 0,1456$  1/час;  $A = 3,2949$  1/час;  $\beta = 0,1440$  и коэффициент сопротивления грунта  $c = 0.11316$  МПа/мм. Трубопровод наружного диаметра  $d=1020$  мм и толщиной стенки  $h=12$  мм,  $p=3$  МПа, временное сопротивление материала трубы  $\sigma_{ep} = 600$  МПа, предел текучести  $\sigma_T = 420$  МПа, модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $\nu = 0.3$ .

Исследование изменений НДС во времени (рис. 2, 3) показало, что для надземного участка трубопровода прогиб по середине пролета в момент времени  $t = 1440$  час увеличился на 172%, напряжения изгиба от поперечной нагрузки на 82 % по сравнению с упругим решением ( $t = 0$  час).

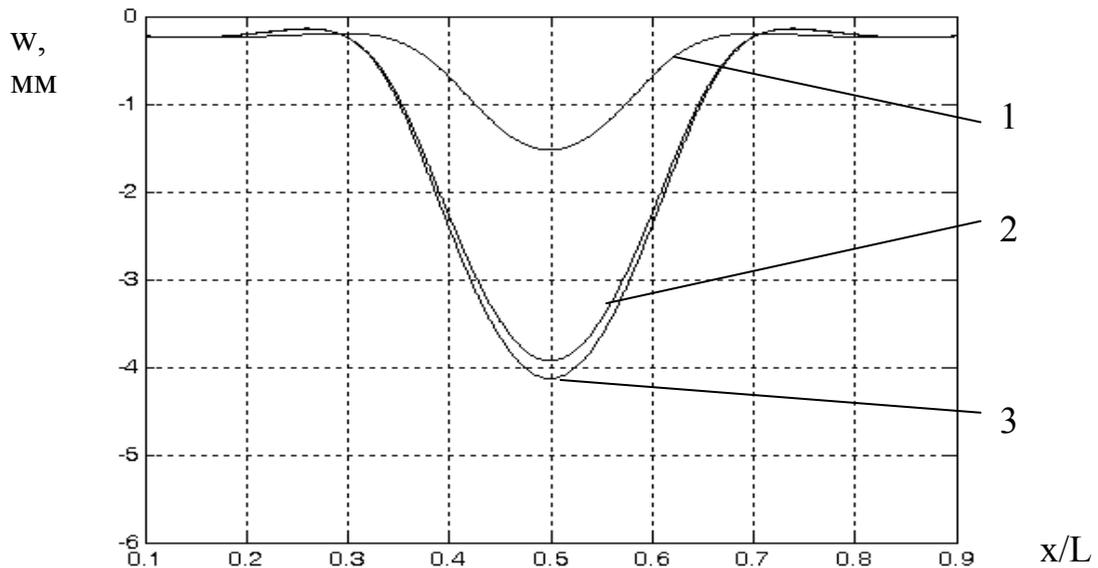


Рис. 2. График изменения прогиба  $w$  трубопровода:  
1 – время  $t = 0$  час; 2 – время  $t = 7$  час; 3 - время  $t = 1440$  час

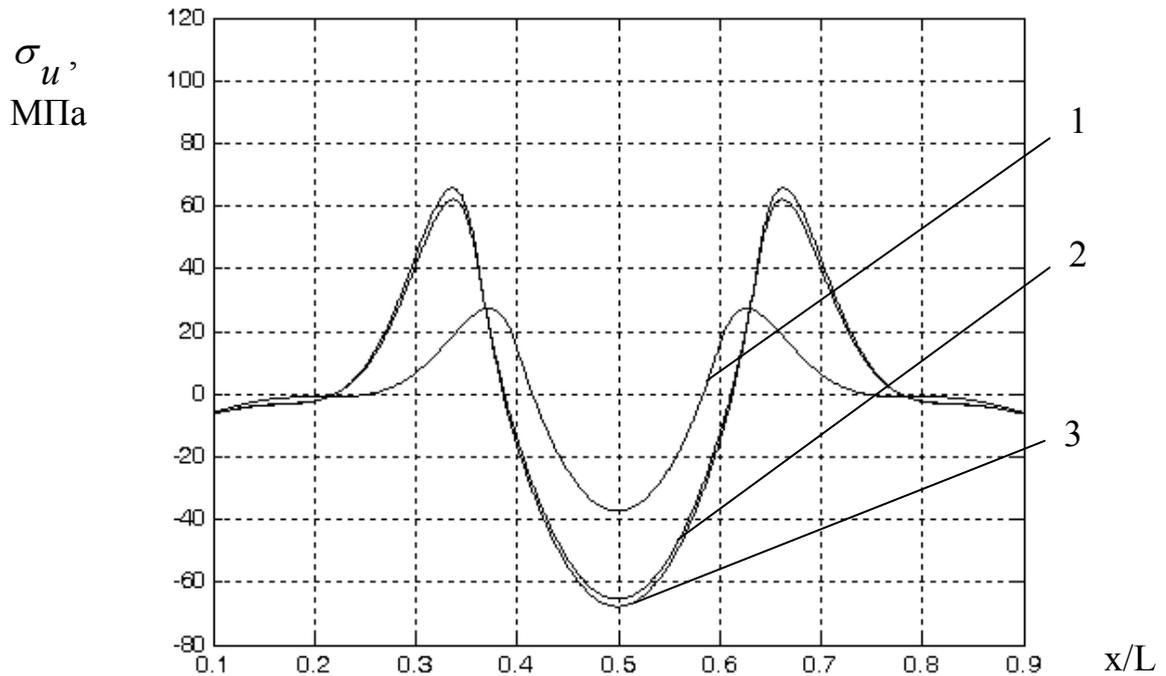


Рис. 3. График изменения продольных напряжений изгиба  $\sigma_u'$  :  
 1 – время  $t = 0$  час; 2 – время  $t = 7$  час; 3 - время  $t = 1440$  час

Результаты расчета цилиндрической оболочки от действия максимального значения реакции грунта  $q$  отражены в табл. 1.

Таблица 1

Изменения прогибов и напряжений оболочки во времени

Показатели	Время $t$ , час	
	0,17	1440
Прогиб $W$ (мм)	- 0,0206	-0,0239
Осевые напряжения $\sigma_x$ (МПа)	-8,153	-9,470
Окружные напряжения $\sigma_s$ (МПа)	-0,143	-0,143

На рис. 4, 5 изображены результирующие прогибы и напряжения.

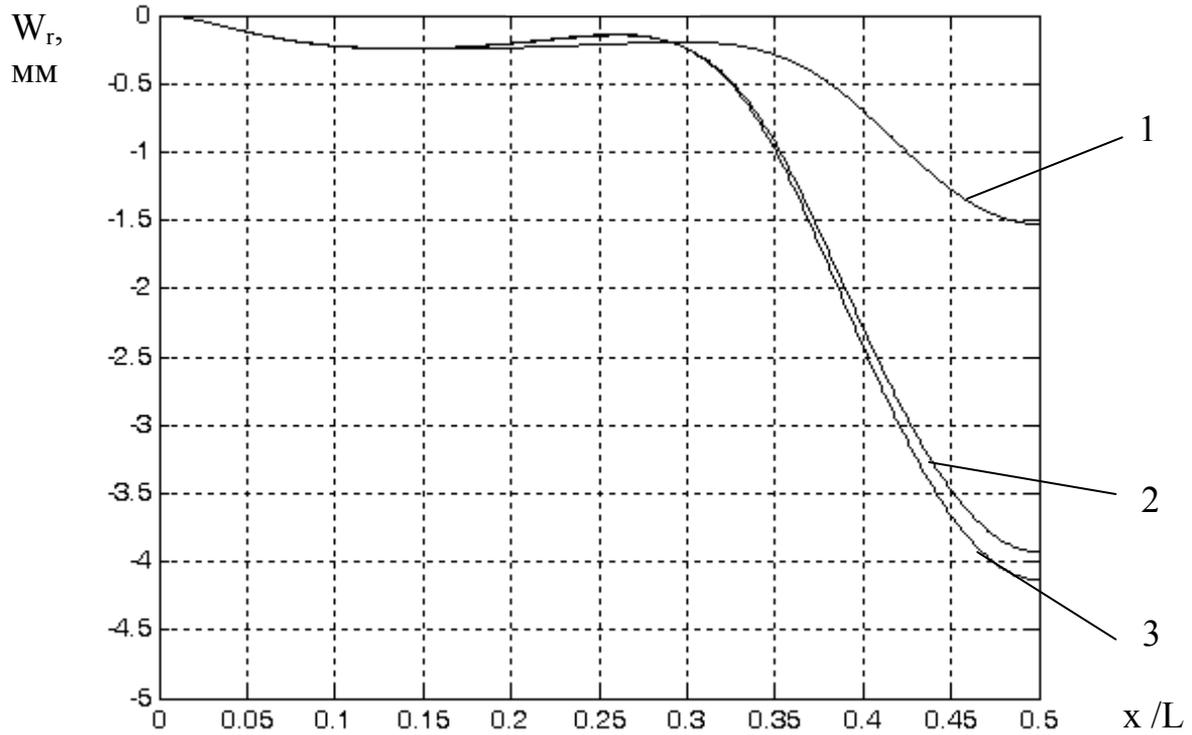


Рис. 4. График изменения результирующих прогибов  $W_r$ .

Значения моментов времени: 1 -  $t = 0$  час; 2 -  $t = 7$  час; 3 -  $t = 1440$  час

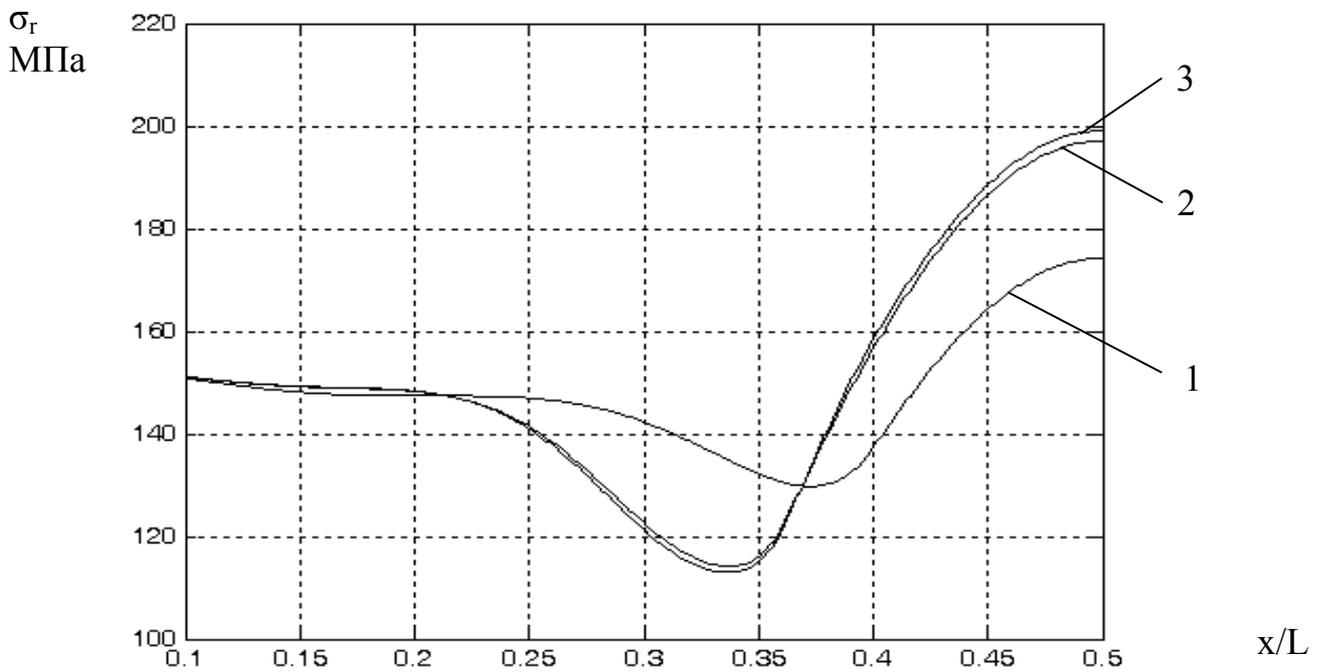


Рис. 5. График изменения результирующих напряжений  $\sigma_r$ .

Значения моментов времени: 1 -  $t = 0$  час; 2 -  $t = 7$  час; 3 -  $t = 1440$  час

При  $x = l/2$  (рис. 2) и  $t = 1440$  час -  $W_r(x,t) = 4,15$  мм;  $\sigma_r(x,t) = 208$  МПа.

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

Таблица 2

Изменение прогиба по середине 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	Время t, час						
	0	0.17	4	24	240	720	1440
w <sub>11</sub>	-1,525	-3,727	-3,846	-3,994	-4,064	-4,112	-4,130
w <sub>12</sub>	-1,525	-6,282	-6,778	-7,640	-8,012	-8,400	-8,544
w <sub>13</sub>	-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  $E_{sp1} = E_{sp2} = 2000$  МПа, коэффициенты Пуассона грунтов  $\nu_{sp1} = \nu_{sp2} = 0,4$ . Расчетные коэффициенты нормального сопротивления грунтов  $c_1 = c_2 = 0.11316$  МПа/мм в момент времени  $t = 0$  час, расчетные параметры ядер ползучести грунтов  $\gamma_1 = 0,1477$  1/час;  $A_1 = 9,4500$  1/час;  $\beta_1 = 0,1472$  и  $\gamma_2 = 0,1475$  1/час;  $A_2 = 9,8866$  1/час;  $\beta_2 = 0,1475$ . Трубопровод выполнен из труб  $d = 1420$  мм и  $h = 16,5$  мм, имеющих временное сопротивление  $\sigma_{sp} = 600$  МПа, предел текучести  $\sigma_T = 470$  МПа, модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Трубопровод относится к участку III категории. Интенсивность расчетных вертикальных нагрузок  $q_{mp} = 10$  н/мм и  $q_{sp} = 20$  н/мм. Рабочее давление  $p = 7,5$  МПа. Расчетные кольцевые напряжения  $\sigma_{кц} = 346,8$  МПа.

На рис. 6 показана зависимость прогиба трубопровода от времени для двух грунтов с незначительно отличающимися реологическими свойствами.

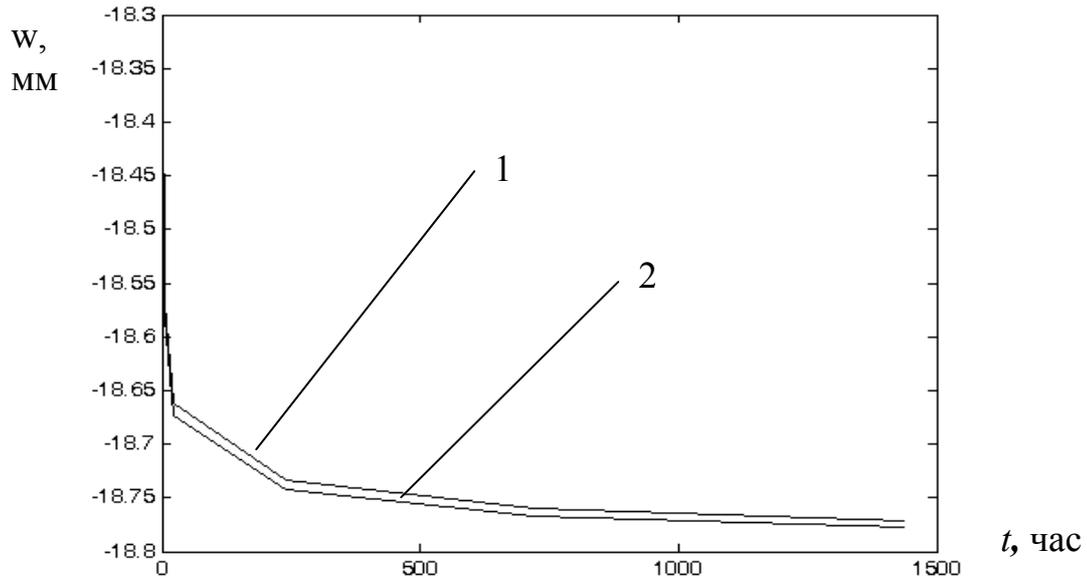


Рис. 6. Деформирование во времени трубопровода ( $x = l/2$ ):

1 – грунт ( $\gamma_1 = 0,1477$  1/час;  $A_1 = 9,4500$  1/час;  $\beta_1 = 0,1472$ );

2 – грунт ( $\gamma_2 = 0,1475$  1/час;  $A_2 = 9,8866$  1/час;  $\beta_2 = 0,1475$ )

В момент времени  $t = 0$  час максимальный прогиб по середине пролета  $w = 12,4$  мм, а по истечении 1440 часов –  $w_1 = 18,8$  мм и  $w_2 = 18,9$  мм.

Исследование изменения НДС ремонтируемого участка трубопровода во времени показало, что для надземного участка трубопровода прогиб по середине пролета с учетом реологических процессов грунтов в момент времени  $t = 1440$  час (60 суток) увеличился на 52% по сравнению с упругим решением ( $t = 0$  час), а напряжения изгиба от поперечной нагрузки увеличились 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 (при  $x = l/2$  и  $t = 1440$  час) составили:  $W_r(x, t) = 19$  мм;  $\sigma_r(x, t) = 472$  МПа.

### Основные результаты и выводы

1. Разработанная математическая модель деформирования

ремонтируемого участка трубопровода на вязкоупругом основании позволила оценить уровень напряжений и несущую способность ремонтируемого участка трубопровода во времени.

2. Учет ползучести грунтов позволил выполнить анализ изменения напряженно-деформированного состояния участка трубопровода: произошло увеличение прогиба по середине 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 учета моментного напряженного состояния тонкостенной цилиндрической оболочки с позиций полубезмоментной теории при переменном коэффициенте постели грунта во времени на НДС восстанавливаемого участка трубопровода показало: увеличение прогиба цилиндрической оболочки составило 22 %, результирующих напряжений-23% по сравнению с решением по теории стержня на вязкоупругим основании.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния ремонтируемого участка трубопровода выполнен с учетом изменения ореола ( $l_1$ ) реологических процессов грунтов. 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) показал, что увеличение ореола реологии грунта ( $l_2$ ) до 4 м допустимо. Последующее увеличение значения до  $l_3$  ведёт к нарушению условий эксплуатации трубопровода.

5. Прогнозирование деформирования восстанавливаемого участка трубопровода (длина  $L=100$  м; пролет  $l=32$  м; диаметр трубы  $d=1420$  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/час;  $A_2=9,8866$  1/час;  $\beta_2=0,1475$ ) выявило, что по истечении 60 суток увеличение 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.

### **Список опубликованных работ**

1. Якубовский Ю.Е., Платонов А.И., Пономарева Т.М. Расчет участка трубопровода в период проведения ремонтных работ // Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли: тез. докл. межд. семинара, Тюмень, ТюмГНГУ - 2002. - С. 244-248.

2. Якубовская С.В., Пономарева Т.М., Перов В.К. Экспериментальные исследования вязкоупругих свойств армированного полиэтилена // Нефтепромысловое дело. – М.:ОАО «ВНИИОЭНТ», 2003, №. 1. - С. 56-61.

3. Якубовская С.В., Пономарева Т.М. Исследование прочностных свойств армированных полиэтиленовых труб // Нефть и газ Западной Сибири: тез. докл. межд. конференции, Тюмень, ТюмГНГУ - 2003, т.1. - С.153.

4. Пономарева Т.М. Определение параметров ядер ползучести армированного полиэтилена // Нефть и газ Западной Сибири: тез. докл. межд. конференции, Тюмень, ТюмГНГУ - 2003, т.2. - С.48.

5. Пономарева Т.М., Пономарев Р.В. Изменение механических свойств труб из армированного полиэтилена при транспортировке нефтегазопродуктов // Новые технологии в системах транспорта: материалы рег. конференции, Тюмень, ТюмГНГУ - 2004, т.2. - С.35 - 38.

6. Пономарева Т.М. О прочности трубопровода во время ремонтных работ // Нефть и газ Западной Сибири: тез. докл. межд. конференции, Тюмень, ТюмГНГУ - 2005, т.1. - С.133.

7. Якубовский Ю.Е., Пономарева Т.М., Дорофеев Е.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния однопролетного

перехода нефтегазопровода по полубезмоментной теории // Известия вузов. Нефть и газ. ТюмГНГУ – 2006, №5. - С. 44-49.

8. Пономарева Т.М. Моделирование деформирования во времени длинномерного участка трубопровода // Проблемы эксплуатации систем транспорта: материалы региональной научно-практической конференции, Тюмень, ТюмГНГУ - 2006. - С. 228-232.

9. Пономарева Т.М. Учет ползучести грунта при расчете деформирования длинномерного участка трубопровода // Геологические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли: материалы международной конференции, Тюмень, ТюмГНГУ, 2007. - С. 69-71.

10. Пономарева Т.М. Деформирование длинномерного участка трубопровода с учетом реологических процессов мерзлых грунтов // Известия вузов. Нефть и газ. ТюмГНГУ– 2007, №3. - С. 78-82.

Подписано к печати  
Тираж 100 экз.  
Заказ №

Усл. Печ.л. 1  
Уч. Изд.л.1

---

**Издательство «Нефтегазовый университет»**  
Тюменского государственного нефтегазового университета  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38  
Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»,  
650039, г. Тюмень, ул. Киевская, 52.