

# НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

**Быков Л.И., Шувалов В.Ю.**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

Наиболее опасными участками линейной части трубопроводов, определяющими их надежность в целом, являются участки, находящиеся в сложном напряженном состоянии – участки трубопровода на продольном склоне в зоне действия оползней, переходы трубопроводов под авто и железными дорогами, переходы трубопроводов через водные преграды и болота, криволинейные участки, надземные переходы и т.п.

Эксплуатация трубопроводов в условиях резко пересеченной местности представляет собой сложную инженерно – техническую задачу. В период активизации оползней становится актуальным выявление наиболее опасных оползневых участков, изучение их напряженно – деформированного состояния, разработка рекомендаций по дальнейшей их эксплуатации и конструктивных решений, снижающих нагрузки на трубопровод от воздействия оползня. Схемы трубопроводов на продольном склоне в зоне действия оползня и основные расчетные формулы приведены в таблице 1.

Все расчетные схемы переходов трубопроводов на продольном склоне учитывают пластическую связь трубопровода с грунтом. Схема, учитывающая подвижки грунта по всему продольному склону при нулевых продольных перемещениях граничных сечений участка (см. табл. 1, а), достаточно широко известна и описана в литературе [1, 2, 3, 4].

В качестве временной, неотложной меры, способствующей незамедлительному снижению уровня действующих в трубопроводе усилий и напряжений, предложено вскрытие трубопровода в средней его части и разработкой в последующем соответствующих долговременных технических решений (см. табл. 1, б). В этом случае участок трубопровода на продольном склоне считается состоящим из трех силовых участков – двух крайних, в пределах которых существует пластическая связь трубопровода с грунтом, и среднего ненагруженного участка. Постоянные интегрирования определяются из условий равенства продольных усилий и перемещений на границах смежных силовых участков и равенства нулю продольных перемещений в граничных сечениях участка трубопровода на продольном склоне.

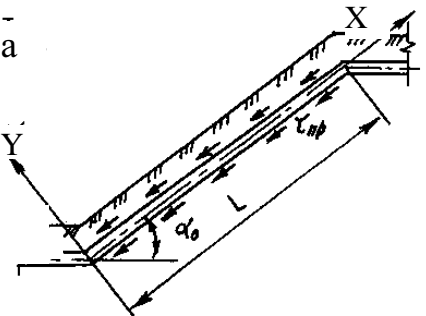
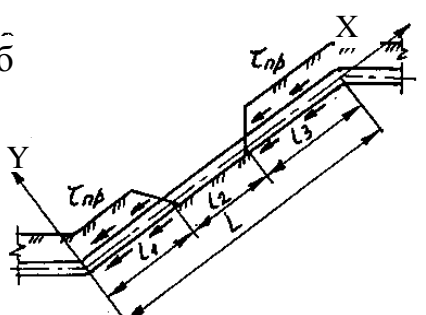
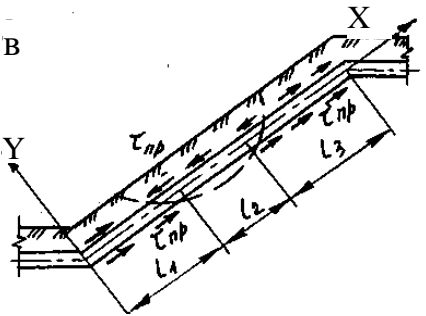
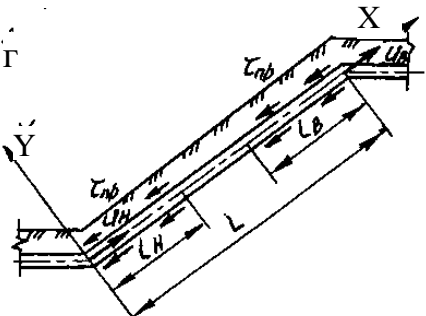
Кроме того, подвижки оползающего грунта могут происходить не по всему продольному склону, а только по части его (см. табл. 1, в).

Трубопровод считается состоящим из трех силовых участков – среднего оползневого и двух крайних, частично или полностью, в зависимости от соотношения длин силовых участков, воспринимающих нагрузку от воздействия оползня. Граничные сечения участка трубопровода на продольном склоне также считаются неподвижными.

Участок трубопровода на продольном склоне подвергается воздействию прилегающих прямолинейных участков (см. табл. 1, г). Нами представлена расчетная схема трубопровода с учетом перемещений его граничных сечений от многократного изменения температуры и давления перекачиваемого продукта и предельном бесконечном числе циклов нагружения.

Таблица 1

**СХЕМЫ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОДОЛЬНОМ СКЛОНЕ  
В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЯ**

Расчетная схема	Область применения	Величины, определяющие прочность трубопровода
	<p>Подвижки грунта одновременно по всей длине склона</p>	$N_{\max} = \pm \frac{\pi D_H \tau_{\text{пр}}}{2}$
	<p>Подвижки грунта одновременно по всей длине склона, имеющего вскрытый участок в средней его части для уменьшения уровня на-</p>	<p>при <math>l_1 &gt; l_3</math></p> $N_{\max} = -\frac{\pi D_H \tau_{\text{пр}}}{2} \left[ 1 - \frac{l_2^2 + 2l_2 l_3}{L^2} \right]$ <p>при <math>l_3 &gt; l_1</math></p> $N_{\max} = -\frac{\pi D_H \tau_{\text{пр}}}{2} \left[ 1 - \frac{l_2^2 + 2l_2 l_1}{L^2} \right]$
	<p>Подвижки грунта по части продольного склона</p>	<p>при <math>l_1 &gt; l_2/2</math>; <math>l_3 &gt; l_2/2</math></p> $N_{\max} = \pm \frac{\pi D_H \tau_{\text{пр}} l_2}{2}$ <p>при <math>l_1 &lt; l_2/2</math>; <math>l_3 &lt; l_2/2</math></p> $N_{\max} = -\frac{\pi D_H \tau_{\text{пр}}}{2L} (l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 + 2l_2 l_3)$ <p>или</p> $N_{\max} = \frac{\pi D_H \tau_{\text{пр}}}{2L} (-l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_1)$
	<p>Вынужденные перемещения граничных сечений</p>	$N_{\max} = -\sqrt{2\pi D_H \tau_{\text{пр}} EA  U_A }$ <p>или</p> $N_{\max} = -\sqrt{2\pi D_H \tau_{\text{пр}} EA  U_B }$

Используя результаты расчетов, полученных по схеме (г), совместно с результатами, полученными по схемам (а), (б) или (в) (см. табл. 1), рассчитываем участок трубопровода на продольном склоне с учетом воздействия прилегающих участков.

Расширение сети автомобильных дорог приводит к необходимости пересечения существующих трубопроводов строящимися автодорогами, что обуславливает необходимость разработки новых конструктивных схем переходов таких трубопроводов под дорогами, обеспечивающих как надежность и безопасность их эксплуатации, так и снижение трудоемкости и сроков строительства. Выбор рационального конструктивного решения переходов под дорогами должен быть обоснован оценкой их напряженно – деформированного состояния с учетом реальных условий работы. Схемы переходов трубопроводов под дорогами, области применения этих схем и основные результаты расчетов представлены в таблице 2.

При расчете трубопроводов под автодорогами V категории на малопросадочных грунтах принята симметричная расчетная схема (см. табл. 2, а), состоящая из двух силовых участков – среднего, нагруженного дополнительной нагрузкой от веса насыпи автодороги, полотна дороги и веса проходящего автотранспорта, и крайнего участка. Средний участок работает под действием дополнительной нагрузки как балка на упругом основании винклеровского типа конечной длины [5], крайний – как полубесконечная балка на упругом основании. Постоянные интегрирования определяются из равенства функции прогибов и их первых производных на границах смежных участков и условия симметрии.

На автодорогах I ... IV категории участки трубопроводов в местах пересечения с дорогой должны прокладываться в защитных кожухах из стальных или железобетонных труб. Концы защитного кожуха должны быть выведены на расстояние не менее 2 м от подошвы насыпи.

Для расчета переходов трубопроводов в защитном кожухе на малопросадочных грунтах предложена симметричная расчетная схема (см. табл. 2, б), состоящая из трех силовых участков -- среднего, нагруженного дополнительной распределенной нагрузкой от веса полотна дороги, насыпи и проходящего транспорта и работающего как балка на упругом основании конечной длины, и двух крайних участков различной жесткости на изгиб: второго конечной длины и третьего полубесконечного.

При расчете переходов трубопроводов под дорогами, уложенными в грунт без защитного кожуха на просадочных грунтах пригодна симметричная расчетная схема, состоящая из полубесконечных балок на упругом основании на крайних участках и балки, работающей на продольно – поперечный изгиб, на среднем (см. табл. 2, в).

Для расчета переходов с защитным кожухом на просадочных грунтах использована схема из трех участков – среднего, работающего на продольно – поперечный изгиб, и крайних участков различной жесткости поперечного сечения на изгиб (см. табл. 2, г). Участок II считается балкой на упругом основании конечной длины, участок III – полубесконечной балкой на упругом основании. Постоянные интегрирования получены аналогично из условия симметрии и условий равенства прогибов и углов поворота трубопровода на границах смежных участков.

Таблица 2

## СХЕМЫ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ДОРОГАМИ

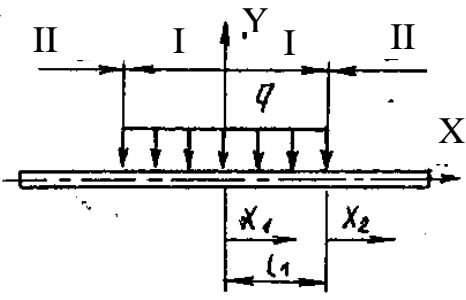
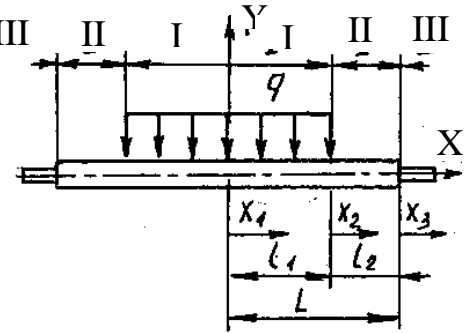
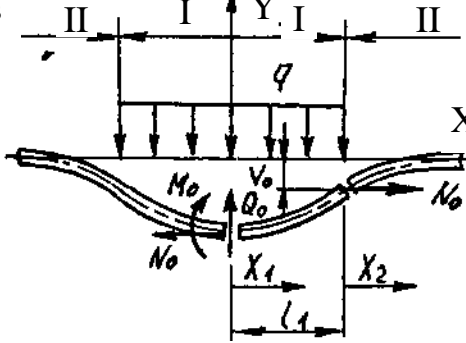
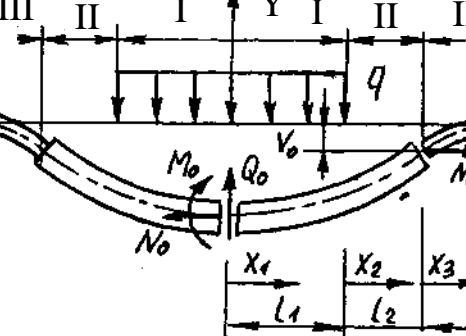
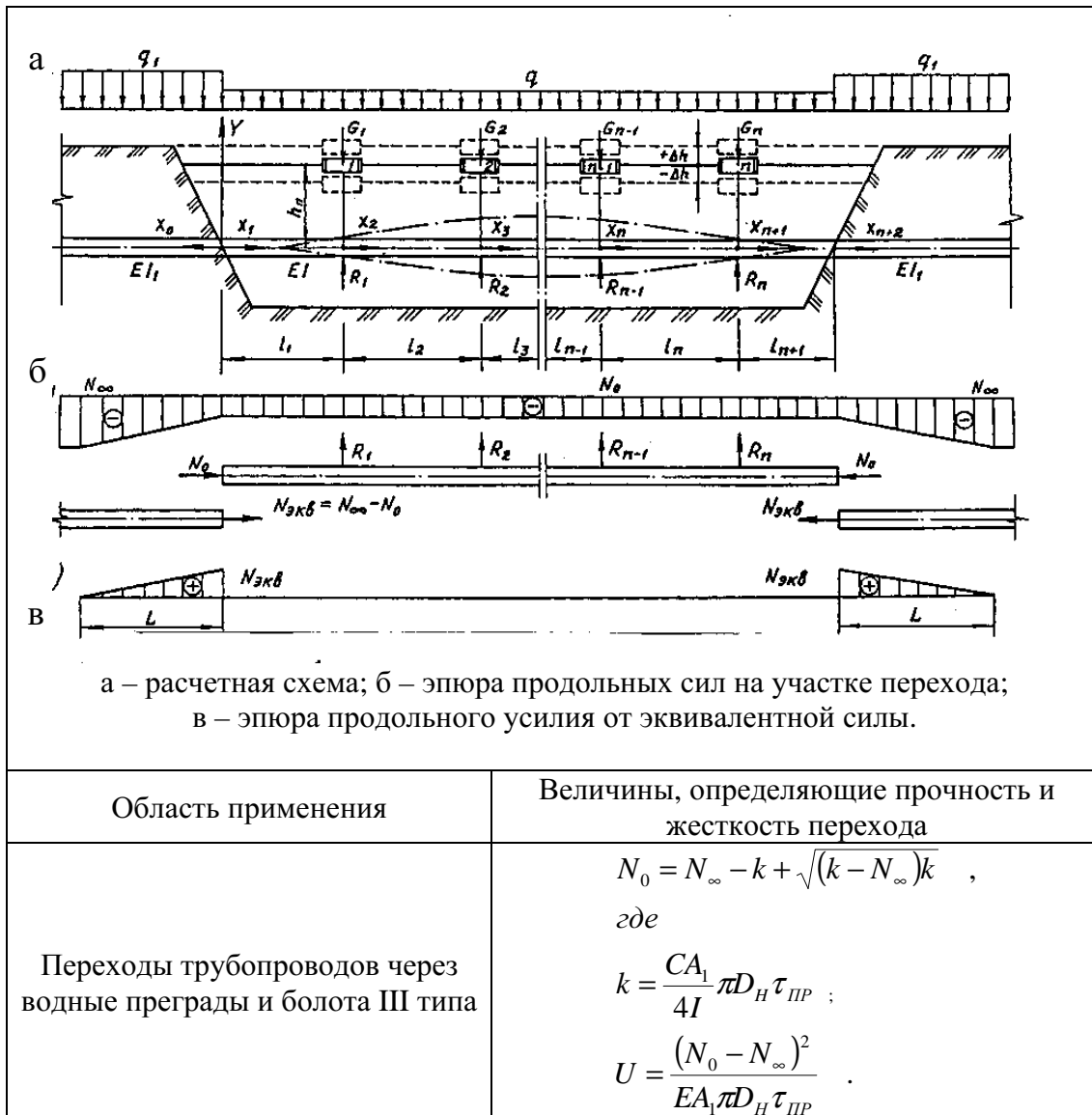
Расчетная схема	Область применения	Величины, определяющие прочность и жесткость перехода
<p>а</p> 	<p>Переходы строящихся и существующих трубопроводов под автодорогами V катего-</p>	$M_{\max} = \frac{q}{2k^2} \sin kl_1 e^{-kl_1}$ $V_{\max} = \frac{q}{4k^4 EI} (e^{-kl_1} - 1)$
<p>б</p> 	<p>Переходы строящихся трубопроводов под автодорогами I ... IV категорий, ма-</p>	$M_{\max} = 2EI_1 k_1^2 (D_1 - B_1)$ $V_{\max} = A_1 + C_1 - \frac{q}{4k_1^4 EI_1}$
<p>в</p> 	<p>Переходы строящихся и существующих трубопроводов под автодорогами V катего-</p>	$M_{\max} = \frac{qEI}{N_0} + 2C_1 N_0$ $V_{\max} = V_0 + \frac{qEI}{N_0^2} - \frac{M_0}{N_0} + 2C_1$ <p>где</p> $M_0 = \frac{q}{\alpha^2} + \frac{ql_1^2}{2} + 2C_1 N_0 \operatorname{ch} \alpha l_1$
<p>г</p> 	<p>Переходы строящихся трубопроводов под автодорогами I ... IV категорий, про-</p>	$M_{\max} = \frac{qEI}{N_0} + 2C_1 N_0$ $V_{\max} = V_0 + \frac{qEI}{N_0^2} - \frac{M_0}{N_0} + 2C_1$ <p>где</p> $M_0 = \frac{q}{\alpha^2} + \frac{ql_1^2}{2} + 2C_1 N_0 \operatorname{ch} \alpha l_1$

Таблица 3

**СХЕМА ПЕРЕХОДА ТРУБОПРОВОДА  
ЧЕРЕЗ ВОДНЫЕ ПРЕГРАДЫ И БОЛОТА НА ПЛАВАЮЩИХ ОПОРАХ**



Здесь:  $q$  – распределенная нагрузка от собственного веса трубы с изоляцией и веса перекачиваемого продукта;  $q_1$  – то же и вес грунта над трубопроводом;  $h_{\text{П}}$  – высота понтона;  $l_i$  – расстояние между понтонами в  $i$ -том пролете;  $N_\infty$  – усилия в заземленном бесконечном трубопроводе от изменения температуры и давления;  $N_0$  – усилие на границе подводного участка трубопровода;  $N_{\text{экв}}$  – эквивалентное усилие, под действием которого происходят перемещения прилегающих участков.

Прокладка трубопроводов через водные преграды и болота представляет собой сложную инженерную задачу, решать которую при традиционных способах прокладки приходится с привлечением специальной строительной-монтажной техники. Одним из способов упрощения строительства является использование схемы прокладки трубопровода на понтонах, при котором береговые участки располагаются в траншее подземно, а переход через озера или болота с малой несущей способностью осуществляется плетью трубопровода с подвешенными к ней понтонами [7]. Расчетная и конструктивная схемы такого перехода и основные результаты расчетов приведены в таблице 3.

Предложена методика расчета напряженно – деформированного состояния трубопровода на понтонах с учетом сезонных колебаний уровня воды и воздействия прилегающих береговых участков. Береговые участки считаются полубесконечными балками на упругом основании, участки трубы между понтонами и между крайним понтоном и берегом – как балки на упругих опорах – понтонах, работающие на изгиб под действием равномерно распределенной нагрузки от веса трубы с изоляцией и перекачиваемого продукта.

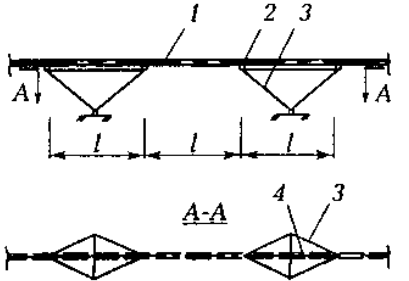
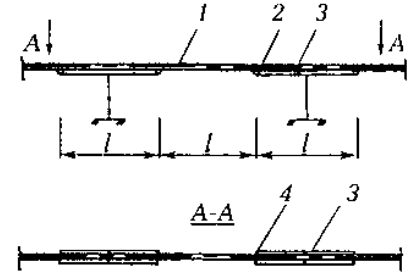
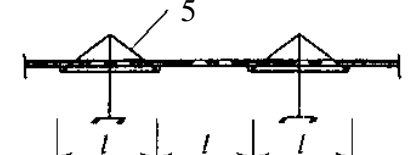
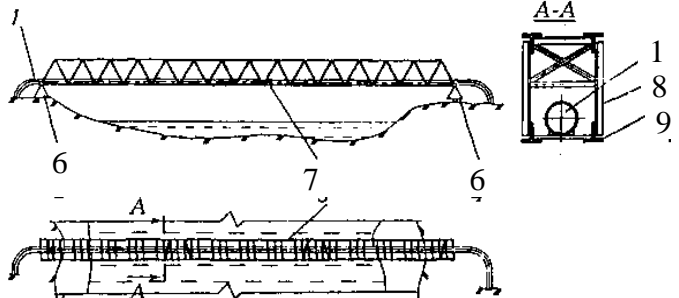
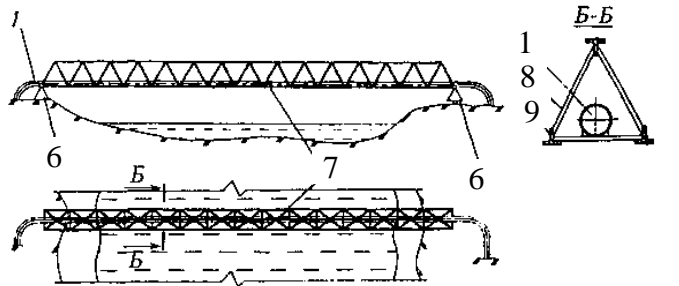
Предусмотрена возможность учета продольных перемещений прилегающих береговых участков. В этом случае подводные участки работают на продольно – поперечный изгиб под действием граничного продольного усилия и поперечной нагрузки от веса трубы и продукта. Граничное продольное усилие определяется из условия равенства продольных перемещений прилегающих береговых участков и продольных перемещений подводных участков перехода на плавающих опорах, вызванных совместным действием продольных и поперечных нагрузок.

При сооружении трубопроводов приходится пересекать реки, ущелья, овраги и другие естественные и искусственные препятствия. В этих случаях нередко бывает единственно возможна надземная прокладка. Разнообразие условий строительства требует применения соответствующих конструктивных схем переходов и методов их проектирования. Общеизвестны такие схемы надземных переходов, как балочные; арочные; висячие, вантовые системы и системы в виде «провисающей нити». В результате работ, выполненных на кафедре сопротивления материалов УГНТУ под руководством Л.И. Быкова, по дальнейшему поиску конструктивных схем переходов, появились надземные трубопроводные переходы с консольными опорами и с поддерживающим элементом в виде фермы. Конструктивные схемы этих переходов представлены в таблице 4. Конструктивные схемы с консольными опорами позволяют увеличить перекрываемый пролет в 3 – 5 раз и снизить материалоемкость в сравнении с балочными системами, усиленными кожухом или трубой над рабочим органом [4].

Следующие конструкции трубопроводного перехода состоят из концевых опор и содержат поддерживающий элемент в виде фермы, которая может иметь прямоугольное поперечное сечение, образованное двумя плоскими фермами, соединенными между собой с помощью поперечных и диагональных связей в единую жесткую конструкцию, или сечение в виде равнобедренного треугольника, благодаря чему такая конструкция обладает меньшей металлоемкостью. Внутри фермы размещается трубопровод. Пояса ферм могут иметь тавровое поперечное сечение, решетка может быть выполнена из уголков. Наличие фермы позволяет увеличить длину перекрываемого пролета в 2 – 3 раза без устройства промежуточных опор при достаточной горизонтальной жесткости. Конструкция трубопроводного перехода может предусматривать наличие эксплуатационного мостика.

Таблица 4

### КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ НАДЗЕМНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Схема	Конструктивные особенности
	<p>Балочный трубопроводный переход с балансирно – пространственными консольными опорами</p>
	<p>Балочный трубопроводный переход с Т-образными консольными опорами</p>
	<p>Балочный трубопроводный переход с вантовыми консольными опорами</p>
	<p>Трубопроводный переход с поддерживающим элементом рабочего трубопровода в виде фермы прямоугольного сечения</p>
	<p>Трубопроводный переход с поддерживающим элементом рабочего трубопровода в виде фермы треугольного сечения</p>

Примечания: 1 – трубопровод; 2 – продольно – подвижные опорные части; 3 – стержневая рама; 4 – верхний пояс; 5 – ванта; 6 – концевые опоры; 7 – ферма; 8 – решетка фермы; 9 – пояса фермы.

Разработаны новые методики расчета сложных участков трубопроводов как на стадии проектирования, так находящихся в условиях длительной эксплуатации по результатам замеров планового и высотного их положения с учетом данных внутритрубной диагностики. Расчет выполняется методом конечных элементов с использованием прямолинейных конечных элементов [6]. Предусмотрена возможность учета многократного изменения температуры и давления перекачиваемого продукта за счет применения моделей взаимодействия трубопровода с грунтом на прилегающих участках при упругой, упруго – пластичной и чисто пластичной связи трубы с грунтом и многократных нагружениях, изменения механических характеристик материала трубы вследствие коррозионного и временного факторов, работы материала трубы в упруго – пластической стадии при использовании условной диаграммы напряжений с линейным упрочнением.

Данные методики, схемы и технические решения использованы при обследованиях, расчетах и выдаче рекомендаций по дальнейшей эксплуатации:

- оползневых участков продуктопроводов Невинномыск – Ставрополь и Невинномыск – Эркин Шахар Северо – Кавказского управления магистральных нефтепродуктопроводов;
- переходов сборных нефтепроводов Федоровского НГДУ через озера протяженностью до 140 м;
- переходов трубопроводов под дорогами РБ и Сургутской области.
- надземных переходов нефтепровода Уса – Ухта и Уса – Ярославль через реки Иоссер, Тобысь, Морель АО «Северные магистральные нефтепроводы»;
- надземных переходов нефтепроводов «Малгобек – Тихорецк» через реку Кубань и «Лисичанск – Тихорецк 1» через реку Кагальник ОАО «Черномартранснефть» АК «Транснефть».

## Литература

1. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). - М.: Недра, 1982. – 384 с.
2. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
3. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. - М.: Недра, 1984. 245 с.
4. Быков Л.И., Мустафин Ф.М., Рафиков С.К., Нечваль А.М., Лаврентьев А.Е. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: Учеб. Пособие. – Санкт – Петербург: Недра, 2006. – 824 с., ил.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно – теоретический. 2 – е изд. перераб. и доп. Под ред. А.А. Уманского: в 2 т. – М.: Стройиздат, 1973. – Т.1. – 599 с.
6. Быков Л.И., Григоренко П.Н., Шувалов В.Ю. Оценка напряженно - деформированного состояния сложных участков трубопроводов// Межвузовский сборник научных статей «Нефть и газ». Уфа: УГНТУ, 1997. - №1 – С.145-147.
7. Шувалов В.Ю. Расчет переходов трубопроводов на плавающих опорах через водные внутриболотные комплексы// Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – Сб. науч. тр. ИПТЭР. – Уфа: ИПТЭР, 1995. С. 114 – 118.