

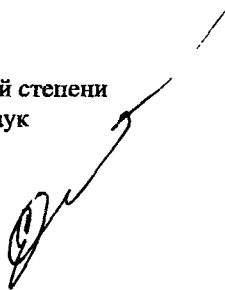
*На правах рукописи*

**САПОЖНИКОВ ЕВГЕНИЙ ВИССАРИОНОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ РЕМОНТ-  
НЫХ СЕКЦИЙ В ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ ТРУБО-  
ПРОВОДОВ**

25.00.19 – Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Тюмень, 2003г.

**Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете**

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор, Заслуженный деятель  
науки РФ  
Иванов Вадим Андреевич

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
профессор, Заслуженный деятель  
науки и техники РФ  
Кушнир Семен Яковлевич

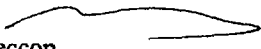
кандидат технических наук  
Дорофеев Михаил Сергеевич

**Ведущая организация:** ООО «Сургутгазпром»

Защита состоится 3 июля 2003 года в 14 часов  
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при  
Тюменском государственном нефтегазовом университете  
по адресу:  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Тюменского государственного нефтегазового университета

Автореферат разослан 3 июня 2003г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
доктор технических наук, профессор  С. И. Челомбитко

2003-А  
10488

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** На сегодняшний день трубопроводный транспорт остается одним из наиболее развитых видов транспорта жидких и газообразных углеводородов. Трубопроводная сеть России является сложной протяженной системой, безопасная эксплуатация которой зависит от множества факторов, основным из которых является своевременное и качественное проведение текущих ремонтов. Магистральный трубопровод на всем протяжении пересекает множество естественных и искусственных препятствий, переходы через которые являются экологически опасными объектами. Следовательно, своевременное и качественное проведение ремонтно-восстановительных работ подводных переходов – одна из главных задач обеспечения надежной их работы.

Существующие традиционные технологии предусматривают проведения большого объема земляных и демонтажно-монтажных работ, что значительно увеличивает сроки выполнения и их стоимость. Техничко-экономические показатели проведения ремонтов подводных переходов ещё более ухудшаются в зимний период, особенно в условиях Западной Сибири.

В последние годы зарубежными и отечественными фирмами разрабатываются качественно новые технологии восстановления изношенных коммуникаций без вскрышных работ по всей длине ремонтируемого подводного перехода. При этом использование высокопрочных и долговечных строительных материалов позволяет увеличить срок эксплуатации восстановленной конструкции до 50 лет.

Оснащение трубопровода вставками является одним из наиболее перспективных методов внутритрубного ремонта. В качестве ремонтных элементов могут использоваться стальные или полиэтиленовые вставки,

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
С.Петербург  
09 1008 акт/120

которые при последовательном наращивании не имеют ограничений по длине ремонтируемого участка.

Известен ряд способов внутритрубного капитального ремонта, использующих современные технические решения по дистанционному соединению полиэтиленовых труб. При этом обеспечивается их герметичное соединение в зоне дефектного участка, значительно удаленного от места вскрышных работ и камер пуска – приема средств очистки и диагностики.

Данная работа посвящена актуальному исследованию процесса транспортировки вставок к месту монтажа и определению основных параметров внутритрубных ремонтных элементов.

**Цель и задачи исследований.** Совершенствование методов внутритрубного ремонта подводных переходов магистральных и промысловых газонефтепроводов и водоводов на основе исследования процесса транспортировки длинномерных внутритрубных ремонтных вставок к месту монтажа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести сравнительный анализ существующих методов ремонта подводных переходов магистральных и промысловых газонефтепроводов и водоводов;
- разработать и исследовать динамическую модель транспортировки ремонтных вставок к месту их монтажа, получить расчетные зависимости с учетом геометрических параметров и конструктивных свойств материала вставки;
- получить аналитические зависимости и разработать программное обеспечение на основе упрощенных моделей, позволяющих вести расчеты и управление параметрами движения в реальном масштабе времени;

– обосновать модели профилей подводных переходов, основанных на аппроксимации рядом аналитических функций. Провести анализ движения ремонтной вставки.

– разработать конструкцию длинномерной полиэтиленовой ремонтной вставки. Получить аналитические зависимости для расчета ее конструктивных и технологических параметров.

**Объектами исследования** являлись разработка методов ремонта подводных переходов магистральных и промысловых газонефтепроводов и водоводов.

**Научная новизна.** На основании выполненных исследований получены следующие результаты:

1. Впервые разработана и исследована динамическая модель длинномерной внутритрубной вставки с учетом ее основных геометрических параметров и физико-механических свойств материала. Получены точное и приближенное решения уравнения движения. Предложен эффективный метод численного решения уравнений, позволяющий проводить расчеты в реальном масштабе времени, с целью управления движением вставки на ремонтируемом подводном переходе.

2. Впервые выявлены закономерности движения длинномерных внутритрубных вставок, движущихся внутри трубопровода по профилю переменной кривизны. Показано, что движение на участках аппроксимированных монотонными функциями имеет неравномерный скачкообразный характер, что особенно проявляется на восходящих участках подводного перехода.

3. Разработана методика моделирования реальных профилей подводных переходов с помощью ряда аналитических функций. Дана оценка степени сходимости результатов расчетов скорости и положения вставки в зависимости от кривизны участка и общей длины перехода.

**Практическая ценность.** Результаты проведенных автором исследований явились основой создания новой методики определения основных параметров движения длинномерных внутритрубных ремонтных элементов и соответствующего программного обеспечения, позволяющего проводить расчеты в реальном масштабе времени, с целью управления их движением при транспортировке к месту монтажа. Получены аналитические зависимости и даны практические рекомендации для определения основных геометрических параметров ремонтных элементов.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения работы были представлены на: научно-практической конференции «Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях» в 2001г., научно-практическом семинаре «Транспортный комплекс-2002» в 2002г., расширенном заседании кафедры «СиРНГО» в 2003г., научно-техническом совете Института Транспорта в 2003г.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 6 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов и 5 приложений. Работа изложена на 138 страницах и содержит 2 таблицы, 43 рисунка и список литературы из 59 наименований.

**Содержание работы:**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность выполненных исследований.

**В первой главе** проведен анализ:

- фактического состояния систем трубопроводного транспорта;
- обзор традиционных методов ремонта подводных переходов;
- обзор внутритрубных методов ремонта подводных переходов;

В настоящее время в России протяженность магистральных трубопроводов составляет более 217 тыс. км, в том числе газопроводных магистралей и газопродуктопроводов – более 151 тыс. км, магистральных нефтепроводов более 48 тыс. км, нефтепродуктопроводов – 19,3 тыс. км (рис.1)

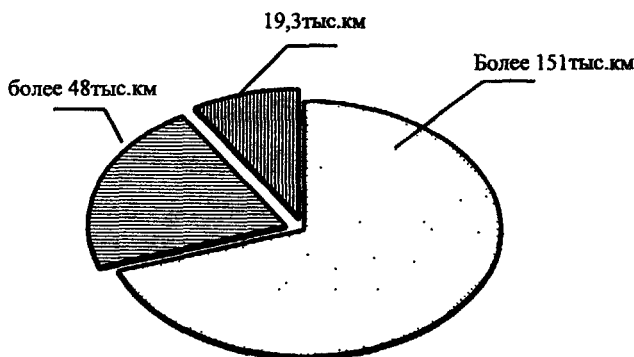


Рис.1. Протяженность магистральных трубопроводов.

Большая часть трубопроводов построена в 60-80 годах. Магистральные трубопроводы в настоящее время имеют значительный срок эксплуатации: 25% трубопроводов эксплуатируются уже более 20 лет, 38% - 10-20 лет, а 5% преодолели планку нормативного срока эксплуатации – 33 года.

На всем протяжении магистральные трубопроводы пересекают различные природные и искусственные препятствия (реки, болота, дороги и т.д.). Длина таких переходов колеблется от нескольких метров до нескольких километров. Такие переходы несут особую опасность. Возникновение чрезвычайных ситуаций приводит к необратимым последствиям.

Вследствие значительного срока эксплуатации большинства подводных переходов, встает вопрос о проведении капитального ремонта.

На сегодняшний день различают два основных направления в технологии капитального ремонта подводных переходов:

А. Ремонт с заменой дефектного участка или полностью трубопровода осуществляется с помощью следующих методов:

- ремонт методом протаскивания;
- ремонт методом свободного погружения трубопровода;
- ремонт методом укладки с плавучих опор;
- ремонт с помощью микротонелирования;
- ремонт методом наклонно-направленного бурения.

Б. На основе использования методов внутритрубного ремонта трубопроводов.

- монтаж внутритрубного ремонтного элемента на площадке с последующим протаскиванием (тросами или штангами) или проталкиванием в ремонтируемый трубопровод;
- монтаж внутритрубного ремонтного элемента внутри ремонтируемого трубопровода методом последовательного наращивания.

Во второй главе проведен анализ сил и выведено уравнение движения длинномерной полиэтиленовой ремонтной вставки внутри изогнутого стального трубопровода. Полученное уравнение решено методом конечных разностей, а так же методом Галеркина.

Выявлен характер движения ремонтной вставки на различных участках трубопровода.

При движении на прямолинейном участке (рис.2) уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{EA}{\gamma} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g(\sin \alpha + k \cos \alpha). \quad (1)$$



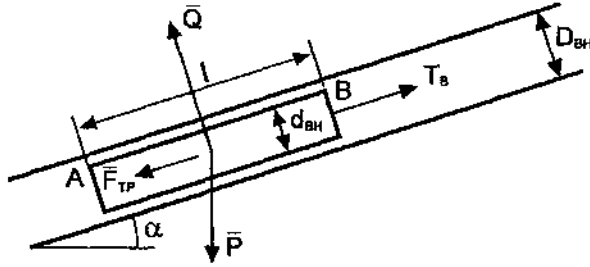


Рис. 2. Силы, действующие на вставку при движении на прямолинейном участке.

$\bar{P}$ ,  $\bar{Q}$  – силы веса и реакции, действующие ремонтную вставку;  $\bar{F}_{тр}$  – сила трения;  $D_{вн}$ ,  $d_{вн}$  – внутренние диаметры трубопровода и ремонтной вставки соответственно.

Определены начальные

$$\begin{aligned} u(x,0) &= 0, \\ \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

и граничные условия:

$$\begin{aligned} EA \frac{\partial u(0,t)}{\partial s} &= T_A = 0, \\ EA \frac{\partial u(l,t)}{\partial s} &= T_B. \end{aligned} \quad (3)$$

Полученное уравнение является неоднородным линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка гиперболического типа. Оно описывает поступательное движение и продольные колебания вставки.

Рассмотрено движение ремонтной вставки на криволинейном участке трубопровода. Будем считать, что ось трубопровода лежит в вертикальной плоскости, а ремонтная вставка во всех точках касается внешнего стального трубопровода. Радиус кривизны оси трубопровода  $R \geq R_{\min}$ , где  $R_{\min}$  – минимальный допустимый радиус упругого изгиба трубопровода,

определенный из условия, что  $\sigma_{\text{вк}} < \sigma_{\text{т}}$ . Движение ремонтной вставки происходит под действием давления воздуха, который подается из нагнетательной станции или ресивера.

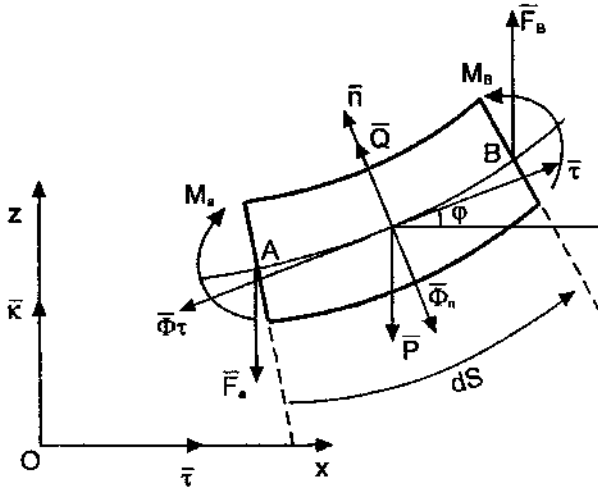


Рис.3. Силы, действующие на элемент ремонтной вставки при движении на криволинейном участке.

$\bar{i}, \bar{k}$  – орты декартовой системы координат  $XOZ$ ;  $\bar{\tau}, \bar{n}$  – единичные векторы, направленные по касательной и по нормали к оси трубы в сторону вогнутости;  
 $\bar{F}_A, \bar{F}_B$  – силы, действующие в сечениях  $A$  и  $B$  трубы, причем  $\bar{F} = T\bar{\tau} + N\bar{n}$ ;  
 $T$  и  $N$  – тангенциальная и перерезывающая силы, соответственно;  
 $M_A, M_B$  – изгибающие моменты в сечении  $A$  и  $B$ ;  $\bar{P}, \bar{Q}$  – силы веса и реакции, действующие на рассматриваемый элемент;  $\bar{\Phi}_\tau, \bar{\Phi}_n$  – силы инерции;  $\bar{F}_{тр}$  – сила трения.

В результате учета факторов, оказывающих первостепенное влияние на процесс движения ремонтной вставки (рис. 3), получено нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных:

$$\begin{aligned} & \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - EJ \chi \frac{d\chi}{ds} + \gamma g \sin \varphi + \\ & + f \left| EJ \frac{d^2 \chi}{ds^2} - EA \chi \frac{\partial u}{\partial s} \pm \gamma g \cos \varphi \right| = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Начальные и граничные условия для рассматриваемой задачи имеют вид:

$$\begin{cases} u(s,0) = 0, \\ v(s,0) = 0, \\ T(0,t) = EA \frac{\partial u}{\partial s} \Big|_{s=0} = 0, \\ T(l,t) = EA \frac{\partial u}{\partial s} \Big|_{s=l} = T_b \end{cases} \quad (5)$$

Аналитическое решение задачи (4) и (5) не представляется возможным, поэтому для решения был применен метод конечных разностей. Наибольший практический интерес представляет определение пройденного ремонтной вставкой расстояния в зависимости от времени и расхода воздуха. Изменяя расход, можно эффективно управлять движением ремонтной вставки. Но для этого необходимо иметь возможность получать решение в реальном масштабе времени. Время решения полученного дифференциального уравнения методом конечных разностей на ПК Pentium 4 с приемлемой точностью для километрового участка составляет около 30 минут, а расчетное время его прохождения составляет примерно 7 минут при требуемой средней скорости 2-3 м/с.

Для сокращения времени решения получено упрощенное решение уравнения методом Галеркина. Время решения уравнения данным методом для аналогичного примера ~5 секунд, т.е. время расчета, сокращается примерно в 100 раз.

При сравнении результатов решения уравнения различными методами расхождение не превышает 5-10%, что говорит о возможности применения метода Галеркина для решения уравнений (4) и (5).

Проведен анализ характера движения ремонтной вставки на различных участках подводного перехода. Для этого подводный переход разделен на три участка  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  (рис.6). Участки  $L_1, L_3$  характеризуются пе-

репадом высотных отметок и отличаются восходящим и нисходящим характером соответственно. Участок  $L_2$  - прямолинейный горизонтальный участок подводного перехода. На рисунках 5 и 6 показан характер изменения параметров движения по участкам подводного перехода.

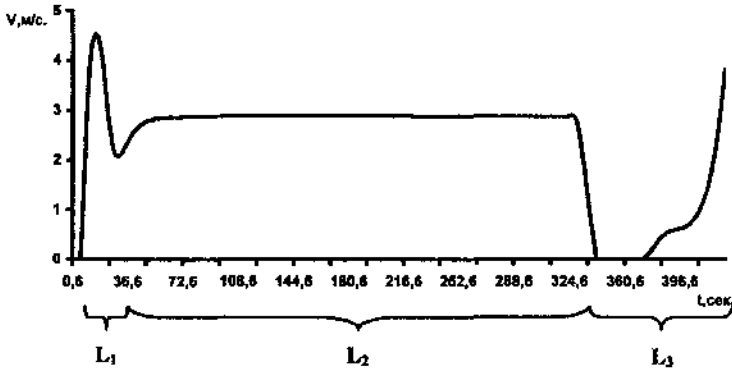


Рис.4. Изменение скорости движения.

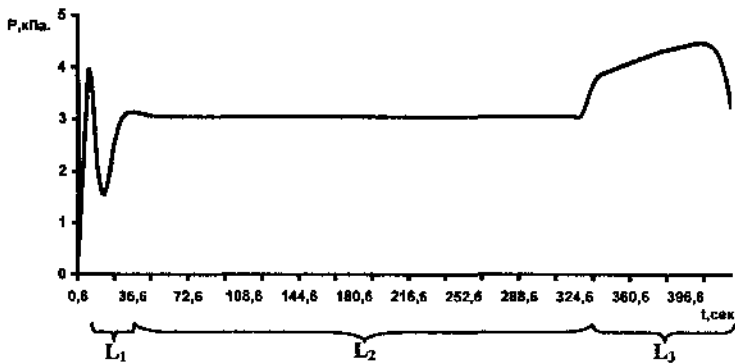


Рис.5. Характер изменения давления по времени.

Из представленных графиков видно, что характер движения на участках  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  различный.

В третьей главе представлены параметры подводного перехода и приведена их классификация, дана методика расчета минимального ра-

диуса упругого изгиба, проведена аппроксимация профиля подводного перехода различными аналитическими функциями и сравнительный анализ параметров движения при различной аппроксимации.

К подводным следует относить трубопроводы, уложенные по дну или ниже отметок дна водоема (рис.6).

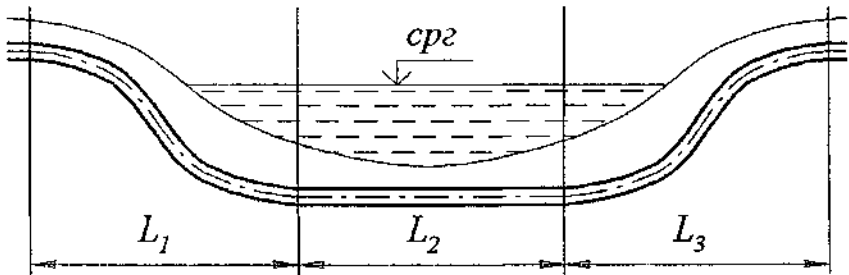


Рис.6. Участки подводного перехода.

Граничная длина подводного перехода определяется из следующих факторов:

- для многониточных переходов - участок, ограниченный камерами пуска приёма средств очистки и диагностики, установленных на берегах;
- для однопунктных переходов - участок, ограниченный запорной арматурой и уровнем вод не ниже отметок 10 % обеспеченности.

В период интенсивного строительства магистральных трубопроводов по существующим в то время технологиям на участки с большим перепадом высотных отметок устанавливались изогнутые вставки. При этом упрощалась конструкция и сокращалось время монтажа. Поэтому большое количество подводных переходов при значительном перепаде высотных отметок имеют изогнутые вставки. Ремонт таких подводных переходов производится по традиционной технологии, т.е. с заменой участка либо перехода полностью. В данной работе рассматриваются переходы, в кото-

рых трубопровод находится в упругоизогнутом состоянии с радиусом изгиба, не превышающим минимальный, рассчитанный по пределу текучести материала трубы.

Для получения уравнения, описывающего движение, а в конечном случае – для определения основных параметров движения ремонтной вставки внутри ремонтируемого трубопровода, необходимо ввести основные геометрические характеристики профиля подводного перехода. Проанализированы возможные модели профилей и проведена аппроксимация их рядом аналитических функций в зависимости от глубины, длины подводного перехода и других параметров трубопровода.

Для сравнения рассмотрены три варианта аппроксимации профиля подводного перехода: синусоида, сопряженные окружности и кубический полином. Для каждого варианта проведен расчет. Результаты расчета представлены на рис.7,8.

Наибольшее расхождение скорости движения ремонтной вставки получается на восходящем участке (рис.7).

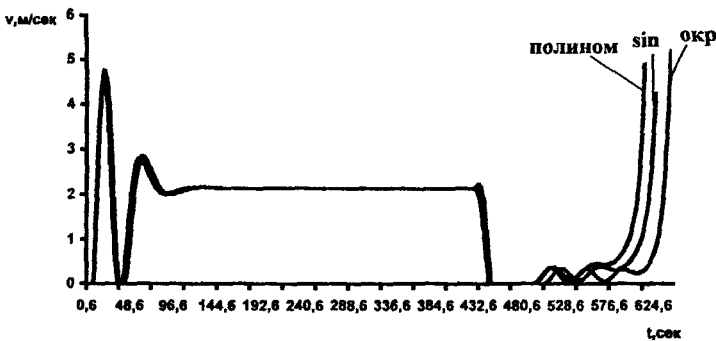


Рис.7. Изменение скорости движения ремонтной вставки.



Рис. 8. Изменение давления по времени.

Из рисунков видно, что на участках  $L_1$ ,  $L_2$  небольшое расхождение результатов. Следовательно, профиль подводного перехода можно представить любой аналитической функцией, так как это оказывает минимальное влияние на динамику движение ремонтной вставки.

В четвертой главе приведены конструктивные особенности ремонтной вставки, геометрические параметры и расчет уплотняющей диафрагмы.

Внутритрубная ремонтная вставка представляет собой трубу из полиэтилена низкого давления.

В передней части полость вставки герметизирована по всему контуру гибкой диафрагмой. Диафрагма, воспринимая давление нагнетаемого воздуха, создает силу для движения вставки.

Передний и задний концы вставки отцентрированы относительно оси трубопровода с помощью центраторов, это необходимо при монтаже нескольких вставок друг за другом. Центраторы конструктивно отличаются друг от друга тем, что передний кроме всего прочего выполняет роль герметизирующей прокладки, которая исключает перетек воздуха через за-

зор между внутренней стенкой трубопровода и наружной стенкой ремонтной вставки.

Наружный диаметр ремонтной вставки подбирается исходя из внутреннего диаметра ремонтируемого трубопровода согласно сортамента труб из полиэтилена низкого давления, в соответствии с ГОСТ 18599-83.

Максимальная длина ремонтной вставки определяется графически исходя из номограмм. На рис.9 представлена номограмма для определения максимальной длины ремонтной вставки при аппроксимации профиля подводного перехода синусоидой.

Герметизирующая диафрагма представляет собой гибкую оболочку, которая в напряженном состоянии образует сферическую поверхность без складок радиуса  $R_d$ , закрепленную по контуру на торце ремонтной вставки.

Толщина диафрагмы определяется из уравнения:

$$h \geq \frac{\eta P d_{вн}}{4\sigma_T \sin \alpha}, \quad (6)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала,  $\eta$  - коэффициент запаса прочности.

Получены зависимости и даны рекомендации по определению геометрических параметров ремонтной вставки.



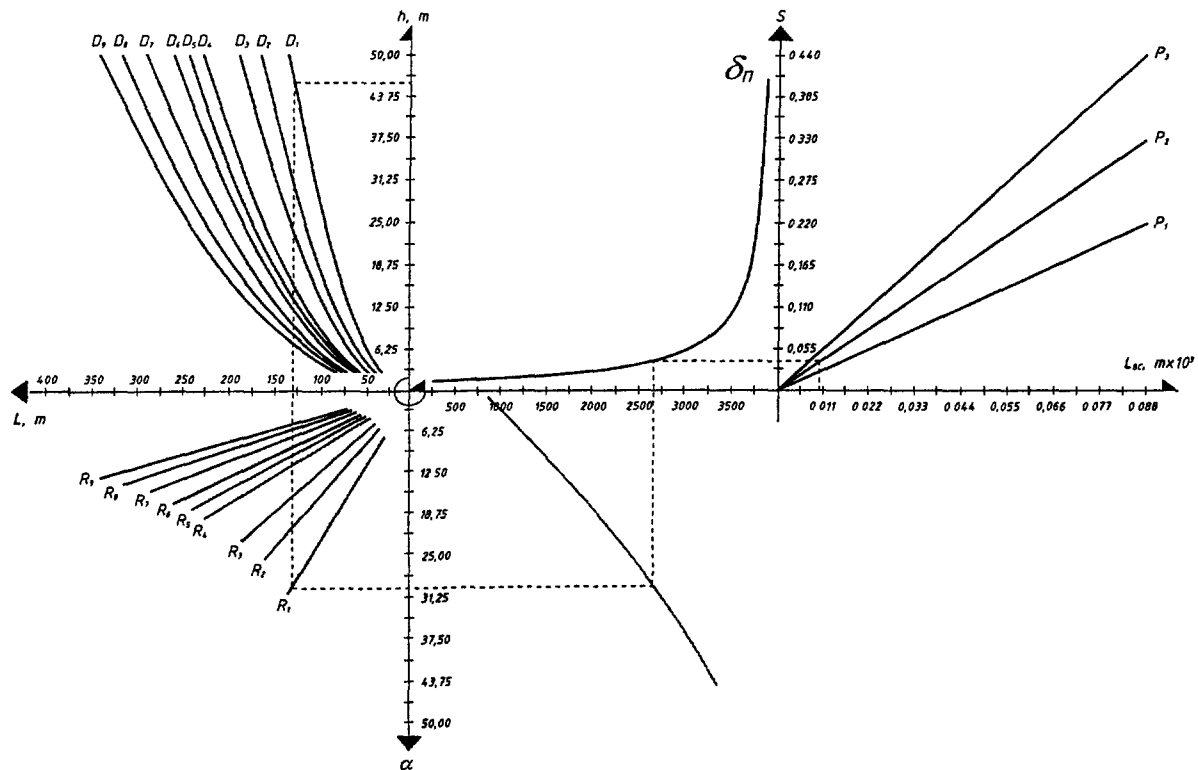


Рис.9. Номограмма для определения максимальной длины ремонтной вставки при аппроксимации пойменной части подводного перехода синусоидой.

**Основные выводы по работе:**

1. Впервые разработана и исследована динамическая модель, описывающая движение длинномерной внутритрубной ремонтной вставки по профилю переменной кривизны с учетом конструктивных свойств и геометрических параметров системы. Получены уравнения движения и их решения методом конечных разностей с помощью разработанных автором программ.

2. Проведенные исследования показали, что скорость движения ремонтной вставки, даже на участках подводных переходов аппроксимированных монотонными функциями, имеет ярко выраженный неравномерный характер. Количество экстремумов и характер изменения функции скорости особенно нестабильны на восходящем участке подводного перехода.

3. Получены приближенные уравнения движения внутритрубной ремонтной вставки. Показано, что в отличие от уравнений, описывающих динамику движения материальной точки, влияние геометрических характеристик вставки учитываются в данных уравнениях в неявном виде через силовые факторы. Предложен эффективный метод численного решения приближенных уравнений, позволяющий проводить расчеты в реальном масштабе времени, с целью управления движением вставки на ремонтируемом участке подводного перехода.

4. Предложена и обоснована методика моделирования реальных профилей подводных переходов с помощью ряда аналитических функций, позволяющих получать решения динамических уравнений движения ремонтных вставок, в том числе и в режиме управления.

5. Показано, что наибольшее расхождение численных значений скорости движения ремонтных вставок при расчетах подводных переходов, моделируемых различными аналитическими функциями, наблюдается

на восходящих участках переходов. На нисходящих и горизонтальных участках отклонения не значительны и практически не зависят от выбора аппроксимирующей функции.

6. Предложены конструктивные решения и обоснованы основные характеристики внутритрубных ремонтных элементов. Получены аналитические зависимости для расчета их технологических и конструктивных параметров.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Торопов С.Ю., Дорофеев С.М., Сапожников Е.В. Транспортировка внутренних полиэтиленовых вставок к месту монтажа // Известия ВУЗов, сер. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, №1, 2003г. С.71-75.
2. Торопов С.Ю., Дорофеев С.М., Сапожников Е.В. Приближенное решение уравнения движения полиэтиленовой трубы внутри трубопровода // Известия ВУЗов, сер. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, №3, 2003г. С.49-53.
3. Салтанов Д.В., Торопов С.Ю., Бердышев В.В., Сапожников Е.В. Расчет сил трения при движении в пространственно искривленных трубопроводах / Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях: Тез. докл. науч. – прак. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. - С. 87-93.
4. Торопов С.Ю., Сапожников Е.В., Сапожникова А.В. Управление движением внутритрубных элементов при ремонте подводных переходов магистральных трубопроводов / Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях: Тез. докл. науч. – прак. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. - С.114-117.
5. Шевнин А.А., Торопов С.Ю., Дорофеев С.М., Сапожников Е.В., Сапожникова А.В. Исследование динамики движения полиэтиленовой

№ 10488

вставки в ремонтируемом трубопроводе / Транспортный комплекс-2002:

Тез. докл. науч. – прак. семина. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. – С. 219-224.

6. Сапожников Е.В., Торопов С.Ю., Дорофеев С.М. Некоторые решения уравнения движения внутритрубных вставок / Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов Западной Сибири. Сб. науч. труд. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. – С. 43-49.

Подписано к печати 3.06.03г.  
Заказ № 361  
Формат 60x84 1/16  
Отпечатано на RISO GR 3750

Бум. лист. №1  
Уч. - изд. л. 120  
Усл. печ. л.  
Тираж 100 экз.

**Издательство «Нефтегазовый университет»**

Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52