

7149868
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА,
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
имени Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ФОМИЧЕВ Владимир Дмитриевич

УДК 533.6.013.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

Специальность 01.02.06

Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва 1987

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ).

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д.т.н., профессор Вольмир А.С.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Светлицкий В.А.
к.т.н., доцент Жислин А.Я.

Ведущее предприятие - ВНИИГаз

Защита состоится "13" апреля 1987 г. в 14³⁰ ч.
на заседании специализированного совета Д 053.15.06 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в МВТУ
им. Н.Э. Баумана

Автор

СПЕЦ

П.К.Полов

11449868

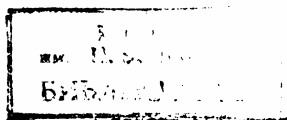
І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Установленные XXII съездом КПСС основные направления развития народного хозяйства предусматривают совершенствование магистрального трубопроводного транспорта. Возрастающее значение нефти и газа в топливно-энергетическом балансе страны предъявляет повышенные требования к надежности МТ. Современные магистральные трубопроводы (МТ) характеризуются большими протяженностями и диаметрами труб, высокими рабочими давлениями. Нагрузки и воздействия в таких трубопроводах, связанные с переходными процессами, возникающими при резком повышении давления и увеличении скоростей движения, существенно возрастают. Вынужденные остановки МТ обуславливаются, в основном, двумя группами причин: снижением несущей способности в связи с дефектами производства, строительства и эксплуатации, и возникновением дополнительных напряжений при перегрузках, связанных с нестационарными режимами (гидравлический удар, движение массы по трубопроводу) и резонансными явлениями (пульсация давления, ветровой резонанс).

89865554
Одним из мероприятий по повышению производительности МТ является очистка их полости от конденсата, выпадающего из газа в процессе эксплуатации, что позволяет увеличить пропускную способность магистральных газопроводов на 5-10%. Необходимость очистки полости возникает также при строительстве МТ, когда после испытаний в них остается вода. В условиях скоростного пропуска очистных устройств, перемещающих перед собой жидкость, в МТ возникают нестационарные процессы, что приводит к появлению дополнительных динамических деформаций и напряжений. Особенно большие динамические перегрузки действуют на криволинейных участках. При эксплуатации пневмотранспортных систем создаются аналогичные динамические нагрузки.

Для обеспечения прочности МТ возникает необходимость в исследовании динамических процессов при действии подвижной нагрузки и определении динамических характеристик элементов МТ.

Такое исследование является современным и актуальным, так как совпадает с задачами технического прогресса в области сооружения МТ. Совершенствование динамических расчетов МТ на стадии проектирования способствует повышению надежности и сокращению стоимости и продолжительности строительства.



Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ).

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д.т.н., профессор Вольмир А.С.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Светлицкий В.А.
к.т.н., доцент Жилин А.Я.

Ведущее предприятие - ВНИИГаз

Защита состоится "13" апреля 1987 г. в 14³⁰ ч.
на заседании специализированного совета Д 053.15.06 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в МВТУ
им. Н.Э. Баумана

Автор

СПЕЦ

П.К.Полов

11449868

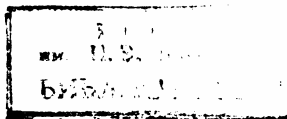
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Установленные XXII съездом КПСС основные направления развития народного хозяйства предусматривают совершенствование магистрального трубопроводного транспорта. Возрастающее значение нефти и газа в топливно-энергетическом балансе страны предъявляет повышенные требования к надежности МТ. Современные магистральные трубопроводы (МТ) характеризуются большими протяженностями и диаметрами труб, высокими рабочими давлениями. Нагрузки и воздействия в таких трубопроводах, связанные с переходными процессами, возникающими при резком повышении давления и увеличении скоростей движения, существенно возрастают. Вынужденные остановки МТ обуславливаются, в основном, двумя группами причин: снижением несущей способности в связи с дефектами производства, строительства и эксплуатации, и возникновением дополнительных напряжений при перегрузках, связанных с нестационарными режимами (гидравлический удар, движение массы по трубопроводу) и резонансными явлениями (пульсация давления, ветровой резонанс).

838656666666
Одним из мероприятий по повышению производительности МТ является очистка их полости от конденсата, выпадающего из газа в процессе эксплуатации, что позволяет увеличить пропускную способность магистральных газопроводов на 5-10%. Необходимость очистки полости возникает также при строительстве МТ, когда после испытаний в них остается вода. В условиях скоростного пропуска очистных устройств, перемещающих перед собой жидкость, в МТ возникают нестационарные процессы, что приводит к появлению дополнительных динамических деформаций и напряжений. Особенно большие динамические перегрузки действуют на криволинейных участках. При эксплуатации пневмотранспортных систем создаются аналогичные динамические нагрузки.

Для обеспечения прочности МТ возникает необходимость в исследовании динамических процессов при действии подвижной нагрузки и определении динамических характеристик элементов МТ.

Такое исследование является современным и актуальным, так как совпадает с задачами технического прогресса в области сооружения МТ. Совершенствование динамических расчетов МТ на стадии проектирования способствует повышению надежности и сокращению стоимости и продолжительности строительства.



Цель работы. Совершенствование динамических расчетов МГ на стадии проектирования, при строительстве и эксплуатации на основе исследования динамических характеристик и процессов при действии подвижной нагрузки.

Основные задачи исследования. 1. Составить математическую модель, описывающую нестационарные динамические процессы в МГ с криволинейными и заземленными в грунте участками и учитывающую сложные конструктивные схемы, включающие промежуточные опоры при действии распределенной на некотором участке подвижной нагрузки.

2. Разработать алгоритмы численного решения дифференциальных уравнений движения, описывающих нестационарные динамические процессы в МГ.

3. Исследовать динамические характеристики некоторых элементов МГ.

4. Разработать методику и провести экспериментальные исследования динамических явлений в трубопроводе при действии подвижной нагрузки и сопоставить экспериментальные и расчетные результаты.

5. Разработать на основе теоретических и экспериментальных исследований методики расчета МГ при действии подвижной нагрузки.

Научная новизна. Представленная работа является комплексным экспериментальным и теоретическим исследованием динамических процессов, происходящих в МГ.

Исследовано влияние заземленных в грунте участков, величины нагрузки и ее скорости движения, различных граничных условий на динамику трубопровода.

Определены частотные характеристики надземного МГ, рассматриваемого как балочная многопролетная система и имеющего заземленные в грунте участки. Учтено влияние внутреннего давления и температурного перепада на собственные частоты.

Использование математической модели, разработанной на основе теории пространственно-криволинейных стержней, и численного решения дифференциальных уравнений движения методом конечных разностей позволило впервые учесть связанность изгибно-крутильных колебаний при нестационарном воздействии распределенной на некотором участке подвижной нагрузки вне плоскости кривизны.

Сопоставление численного решения с экспериментальными данными и известными аналитическими решениями показало их хорошее совпадение, что позволяет рекомендовать применение разработанных методов. Впервые разработана методика расчета пространственно-криволинейного многопролетного МТ на подвижную нагрузку.

Практическая ценность и реализация работы. Разработан метод определения напряжений и деформаций МТ произвольной конфигурации при действии движущейся массы с учетом различных расчетных схем. Применение метода дает возможность правильно выбирать параметры очистки полости и режимы движения контейнерных составов. Полученные частотные характеристики систем МТ могут быть использованы при устранении резонансных колебаний.

Результаты исследования, представленные в форме нормативно-технических документов, используются при проектировании технологических схем строительства и эксплуатации, способствуя повышению надежности МТ, а также сокращению стоимости и продолжительности строительства.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на IX и X конференциях молодых ученых и специалистов ВНИИСТА (Москва, 1975, 1977гг.), на X конференции молодых специалистов института "ГИПРОспецгаз" (Ленинград, 1977г.), на VIII и IX творческом семинаре молодых специалистов и ученых Миннефтегазостроя (Москва, 1975г., Челябинск, 1977г.), а также сделано сообщение в институте ЮНИИГипрогаз (Донецк, 1979г.), ВНИИПИНЕФТЬ (Москва 1980г.), ВНИИММАШ (Москва, 1984, 1985г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложений, изложенных на 177 страницах, включающих 54 рисунка, 105 библиографических наименований.

П. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и дается краткое описание структуры работы.

В первой главе приведен анализ современного состояния вопросов, подлежащих рассмотрению в работе, сформулированы общие направления исследования.

Исследованию динамических процессов в различных конструкциях с движущейся нагрузкой постоянно уделяется большое внимание. Разработки в этой области можно разделить на несколько направлений. Одно из направлений посвящено задаче динамики прямолинейных стержневых конструкций.

Значительный теоретический вклад в этой области сделан В.В.Болотиным, И.И.Гольденблатом, А.П.Филипповым, А.Б.Моргаевским, В.И.Феодосеевым. В основном исследования касались однопролетных систем, что вызвано практическим приложением этих работ в динамике мостов под действием подвижного состава.

Исследование динамики магистральных трубопроводов при действии подвижной нагрузки из-за сложности расчетных схем имеет ряд специфических особенностей, связанных с наличием различных моделей промежуточных опор и заземленных в грунте участков. Этот вопрос, насколько известно автору, в такой постановке не рассматривался в литературе.

Другое направление исследований связано с изучением поведения пространственно-криволинейных стержневых систем. В трудах большинства авторов, относящихся к динамике криволинейных трубопроводных конструкций с протекающей жидкостью, основное внимание уделялось исследованию собственных колебаний отдельных упрощенных конструкций.

Нестационарные изгибно-крутильные колебания, вызванные распределенной на конечном участке движущейся массой, не рассматривались в литературе. Недостаточно также освещены вопросы определения частот собственных колебаний при сложных расчетных схемах, близких к реальным условиям работы трубопровода.

Указанные особенности магистральных трубопроводных систем не позволяют применить традиционные подходы: метод Бубнова-Галеркина, метод интегральных уравнений для исследования задачи о действии подвижной нагрузки из-за необходимости использования большого числа членов ряда в решении при учете реальных расчетных схем. В то же время такие численные методы решения как методы конечных разностей и конечных элементов, получившие широкое применение при решении задач строительной механики и газовой динамики, не были использованы в практике проектирования таких систем.

В данной работе делается попытка восполнить эти пробелы. Во второй главе рассматриваются собственные колебания ба-

лочных бескомпенсаторных переходов трубопровода, получивших широкое применение при строительстве. Дифференциальные уравнения собственных колебаний надземной и подземной частей перехода трубопроводов имеют вид:

$$EJ \frac{\partial^4 W_1}{\partial S_1^4} + T \frac{\partial^2 W_1}{\partial S_1^2} + m^* \frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + m \left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 W_1}{\partial S_1 \partial t} + V^2 \frac{\partial^2 W_1}{\partial S_1^2} \right) = 0; \quad (1)$$

$$EJ \frac{\partial^4 W_2}{\partial S_2^4} + T \frac{\partial^2 W_2}{\partial S_2^2} + m^* \frac{\partial^2 W_2}{\partial t^2} + m \left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 W_2}{\partial S_2 \partial t} + V^2 \frac{\partial^2 W_2}{\partial S_2^2} \right) + \eta W_2 = 0, \quad (2)$$

где W_1 и W_2 - поперечные перемещения надземной и подземной частей трубопровода; t - время; EJ - изгибная жесткость трубопровода; m^* , m - погонная масса трубопровода и транспортируемого продукта; T - продольные сжимающие усилия в стенках трубы от внутреннего давления трубопровода и температурного перепада, одинаковые для подземной и надземной частей в пренебрежении сопротивлением грунта в продольном направлении; η - жесткость подземного участка винклера основания.

После подстановки выбранной функции прогибов и решения обыкновенных дифференциальных уравнений получены зависимости прогиба от координаты. Условия сопряжения участков дают систему однородных трансцендентных уравнений, нетривиальность решения которых приводит к частотному уравнению. Решение велось с помощью ЭВМ.

Приведенные графики и формулы дают возможность по конструкции перехода, жесткости упругого основания, внутреннему давлению, положительному температурному перепаду определить собственные частоты одно- и двухпролетных переходов. Установлено, что давление и температурный перепад оказывают существенное влияние на частоту собственных колебаний. Так, учет рабочего давления приводит к изменению частот на 5%, учет реального температурного перепада - еще на 9%.

Следующий раздел главы посвящен вынужденным колебаниям МГ при действии подвижной нагрузки. Рассматривается многопролетная система, имеющая заделанные в грунте участки винклера основания жесткостью η^p . Предполагается, что усилия, действующие со стороны упругих промежуточных опор жесткостью k^p , распределены на некотором малом участке длиной L_p^{on} . Дифференциальное уравне-

ние изгибных колебаний имеет вид

$$EJ \frac{\partial^4 W}{\partial S^4} + m^T \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - \left[q - m \left(\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 W}{\partial S \partial t} + V^2 \frac{\partial^2 W}{\partial S^2} \right) \right] H^M + \\ + W \sum_1^n \left(\frac{k^p}{L_p^{on}} H_p^{on} + \eta^p H_p \right) + \alpha \frac{\partial W}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где W - динамический прогиб; $\alpha \partial W / \partial t$ - интенсивность сил внутреннего вязкого трения в материале на единицу длины трубопровода; q и m - погонная подвижная нагрузка и ее погонная масса; m^T - погонная масса трубы; V - скорость движения нагрузки; p - номер участка; n - число участков.

Действие на балку нагрузок, распределенных на некотором конечном участке (реакция опор и основания, подвижная нагрузка, обладающая массой), учтено единичной функцией Хевисайда, входящей в H^M , H_p^{on} , H_p .

Численное решение дифференциального уравнения велось с использованием явной схемы МКР с помощью ЭВМ. Безразмерный шаг по времени выбирался таким образом, чтобы решение было устойчивым и сходящимся. Начальные условия выражают равенство нулю исходных прогибов балки. Граничные условия в конечных разностях определяются с помощью величин прогибов во внеконтурных узлах, полученных через значения прогибов во внутренних узлах.

Сравнение с опубликованными в литературе результатами теоретических исследований, полученными с помощью других методов, показало хорошее совпадение.

На рис. 1 приведены прогибы для реального трубопровода диаметром 72 см, толщиной стенки 1,2 см и длиной пролета 30 м при очистке его полости от воды. Рассматривается однопролетный переход с заземленными в грунте примыкающими участками при

$\bar{V} = 0,5$; $\bar{\eta}' = \bar{\eta}^3 = 1,64 \cdot 10^4$. Здесь $\bar{V} = V/V_{кр}$; $\bar{U} = W/\bar{z}$; $\bar{\tau} = t \cdot V_{кр} / \pi L$; $\bar{\xi} = S/L$; $V_{кр} = \pi \sqrt{EJ/m^T} / L$; $\bar{z} = \sqrt{J/F}$; $\bar{\eta}^p = \eta^p L^4 / EJ$; L - средняя длина пролета. Цифрам 1 и 2 соответствуют $\bar{V}\bar{\tau} = 1,5$ и $2,1$. Справа в большем масштабе показаны прогибы на примыкающих участках. Прогибы быстро затухают по мере удаления от опорного сечения перехода. Расчеты показали, что при вычислениях можно ограничиться длиной примыкающего участка, равной длине пролета.

В работе проведено исследование динамики трехпролетной балки на упругих промежуточных опорах. При движении нагрузки

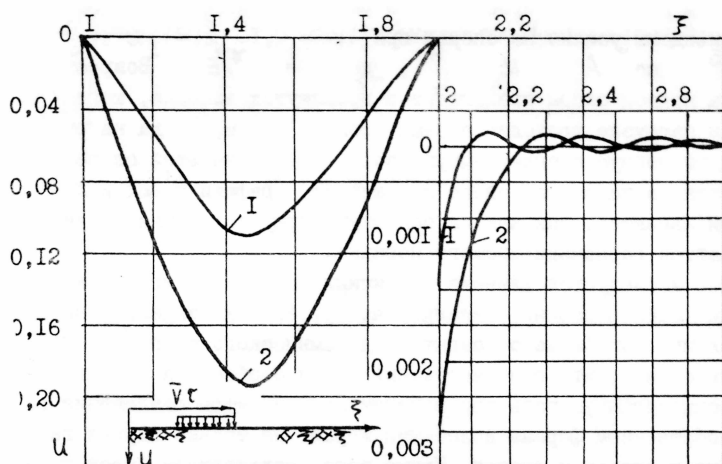


Рис. 1

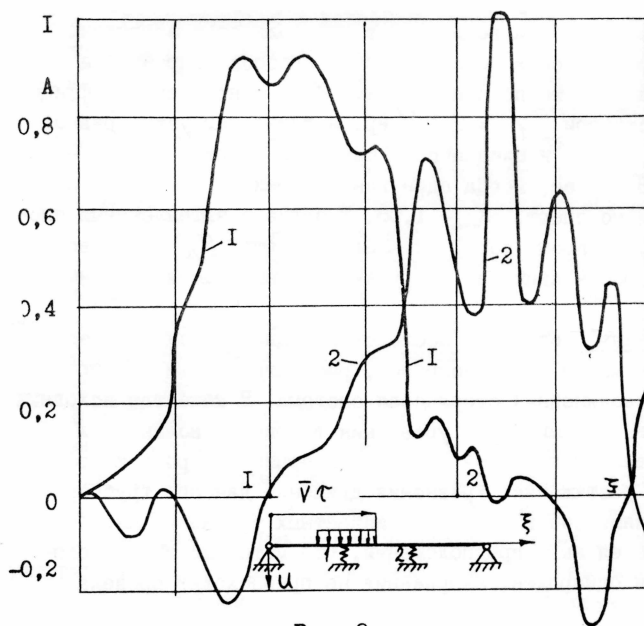


Рис. 2

по пролетам происходит своеобразное раскачивание системы. На рис.2 приведены усилия на опорах при $V = 0,1$, $k' = k'' = 4,6 \cdot 10^5$. Здесь $A = k u / \bar{q} L''$, где $\bar{q} = q L^4 / EJz$. Возрастание усилия на первой опоре происходит в промежуток времени, когда подвижная нагрузка проходит первый пролет. Затем, когда нагрузка проходит первую промежуточную опору, усилие на этой опоре уменьшается, а на второй опоре возрастает. Графики имеют колебательный характер, так как на основную форму колебаний балки накладываются гармоники высшего порядка.

Далее исследуется влияние различных способов опирания концов балки (шарнир-шарнир, заделка-шарнир, заделка-заделка) на распределение изгибающего момента и динамического прогиба.

Установлено, что при нагружении балки особенно в начальный период, существенную роль при решении задачи путем разложения в ряд по собственным формам колебаний играют не только первая гармоника, но и вторая и третья. Кроме того, подтвержден вывод предыдущих исследователей о том, что максимальный динамический эффект достигается не в процессе загрузки движущейся нагрузкой, а несколько позже, когда весь пролет уже полностью загружен.

Далее исследуется вопрос о влиянии способа опирания на коэффициент динамичности по напряжениям K_D . Наибольший коэффициент динамичности при $V = 0,2 \cdot V_{кр.}$ и длине нагрузки, равной длине пролета балки, наблюдается у шарнирно-опертой балки -

$K_D = 1,12$. В случае, когда один конец перехода зашцеplen, а другой - шарнирно оперт, $K_D = 1,08$. В балке с зашцеplенными опорами $K_D = 1,04$. Кроме того, установлено, что K_D существенно зависит от скорости движения нагрузки и длины участка, занимаемого нагрузкой.

Третья глава посвящена исследованию динамического воздействия движущейся массы на трубопровод, рассматриваемый как пространственно-криволинейная стержневая система. В качестве исходных уравнений взяты динамические уравнения теории криволинейных стержней с учетом поперечной инерции, инерции поворота и деформации осевого растяжения. Уравнения движения данного трубопровода представляют собой обобщение известных уравнений Кирхгофа-Клебша. Они выведены в предположении, что материал трубопровода изотропен и однороден, напряжения не превосходят предела упругости.

$$m^T \frac{\partial^2 W_k}{\partial t^2} + \left\{ m \left[\frac{\partial^2 W_k}{\partial t^2} (1 - \delta_{3k}) + \left(2V \frac{\partial \varphi}{\partial t} + V^2 x_j' \right) \epsilon_{j3k} \right] - \mathcal{G}_3 \delta_{3k} - \right. \\ \left. - q \delta_{2k} \right\} H^M + (1 - \varepsilon) \left[P x_j' \epsilon_{j3k} - \frac{\partial T_k}{\partial S} - T_m x_j' \epsilon_{kjm} \right] + \\ + W_k \sum_r^n \left(\frac{k_k^p}{L_p^p} H_p^{\alpha r} + \eta_k^p H_p \right) - q^T \delta_{2k} + \mathcal{L}_k \frac{\partial W_k}{\partial t} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial K_k^T}{\partial t} + \left\{ \left[\frac{\partial K_k}{\partial t} + V(1 - \varepsilon) \frac{\partial K_k}{\partial S} + K_j \theta_n \epsilon_{knj} \right] (1 - \delta_{3k}) + \mathcal{M}_3 \delta_{3k} \right\} H^M - \\ - (1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial M_k}{\partial S} + M_m x_j' \epsilon_{kjm} \right] - T_m \epsilon_{k3m} + \mathcal{L}_{kp} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \delta_{3k} = 0. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) записаны в системе координат $\bar{E}_k$, одна ось которой направлена горизонтально вдоль оси стержня ($k = 3$), вторая - горизонтально и перпендикулярно оси ($k = 1$), третья - вертикально и перпендикулярно оси ($k = 2$). Здесь W_k , φ_k , θ_k , K_k^T , K_k , M_k , T_k - компоненты векторов перемещения, поворота, угловой скорости, момента количества движения трубопровода и движущейся массы, моментов и усилий, действующих в сечениях трубопроводов; δ_{kn} , ϵ_{kjm} - символы Кронекера и Леви-Чивита; η_k^p , k_k^p - жесткости p -го участка винклерова основания и опоры в конце p -го участка в направлении $\bar{E}_k$; P - усилие от внутреннего давления; ε - относительная деформация растяжения оси трубопровода; $\mathcal{G}_3$, $\mathcal{M}_3$ - интенсивность усилий и моментов, обусловленных трением движущейся массы о стенки трубы; $\mathcal{L}_k$, $\mathcal{L}_{kp}$ - коэффициенты вязкого трения при колебаниях в направлениях $\bar{E}_k$ и крутильных колебаниях.

В уравнениях (4), (5) отражены реальные факторы, имеющие существенное значение при исследовании динамики МГ: распределенность нагрузки на некотором участке конечной длины, многопролетность системы с учетом равной длины пролетов, упругость промежуточных опор, заземленность некоторых участков в грунте, давление, температурный перепад и ряд других факторов. При описании поведения движущейся нагрузки учитывается, что она участвует в сложном движении вместе с трубопроводом и относительно него. Учтены перенос-

ное, кориолисово, центростремительное и касательное ускорения подвижной нагрузки. В случае отсутствия упругих промежуточных опор, упругого основания, затухания, а также в предположении, что труба и движущаяся непрерывным потоком масса невесома, уравнения (4) и (5) сводятся к уравнениям В.А.Светлицкого. Если положить также кривизну и кручение равными нулю и исключить слагаемые, учитывающие инерцию поворота, получится многократно исследованное уравнение колебаний прямолинейного трубопровода, содержащего установившийся непрерывный поток несжимаемой идеальной жидкости.

Полученные уравнения движения, описывающие связанные изгибно-крутильные колебания, позволяют исследовать колебания трубопровода при нестационарном действии движущейся массы как в плоскости, так и из плоскости кривизны и учесть деформацию растяжения-сжатия.

В четвертой главе изложен численный метод анализа динамических процессов в криволинейных участках при действии движущейся массы. При построении разностной схемы область непрерывного изменения аргумента (время и продольная координата) заменена некоторым конечным множеством точек, лежащих в этой области. На криволинейных участках пространственного трубопровода, там где изменение функции усилий и перемещений в зависимости от продольной координаты будет происходить быстрее, целесообразно сгустить сетку и сделать ее более редкой на прямолинейных.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений движения с граничными и начальными условиями получена путем замены дифференциальных операторов конечно-разностными аналогами. Присоединение к полученным для каждого узла алгебраическим уравнениям краевых условий в разностном виде приводит к четырем системам уравнений, имеющих порядок, равный числу узлов, на которые разбивается конструкция. Две из них имеют ленточную структуру с пятидиагональными матрицами коэффициентов и относятся к изгибным колебаниям в плоскости и из плоскости кривизны, а две оставшиеся имеют трехдиагональную структуру и относятся к продольным и крутильным колебаниям.

При решении системы алгебраических уравнений возникает трудность, обусловленная тем, что система дифференциальных уравнений движения является связанной. Избежать совместного решения систем позволяет метод раздельной прогонки. Алгоритм исследования построен

таким образом, что на первом этапе расчет ведется только на статистические нагрузки: внутреннее давление, температурный перепад и собственный вес трубы. На втором этапе производится расчет на динамическое воздействие движущейся массы. В этом случае в качестве начальных условий берутся величины прогибов и углов поворотов, полученные на этапе статистического нагружения. Расчет заканчивается при полном сходе движущейся массы с рассматриваемой системы.

Алгоритм неявной конечно-разностной схемы обеспечивает устойчивость и сходимость вычислений в широком диапазоне соотношений шага по времени и координате.

В пятой главе дан анализ результатов численного решения. Проведены вычислительные эксперименты на простейших моделях и дано их сравнение с аналитическими методами. Вычислительные эксперименты проводились для случая шарнирно-опертой балки, по которой с постоянной скоростью движется кусочно-распределенная нагрузка и для случая, когда на стержень действует сжимающее усилие. Результаты численного решения хорошо согласуются с результатами, полученными аналитически.

Исследовалась динамика криволинейных стержней при импульсном нагружении сжимающей силой.

Динамические эффекты, возникающие при действии подвижной нагрузки на криволинейный трубопровод, проиллюстрированы на нескольких примерах, в том числе на примере трубопровода с заземленными концами, имеющего два прямолинейных участка и участок постоянной кривизны.

Безразмерные параметры $\bar{X}_2 = 1$; $\bar{L}_1 = \bar{L}_2 = \bar{L}_3 = 1$; $\bar{V} = 0,5$; $a = 0,5$; $b = 120$; $q = 19,3$. Здесь введены следующие обозначения: $a = m/m^*$; $b = L/c$; $\bar{X}_2 = X_2/L$. Графики рис. 3а, б представляют собой эпюры перемещений в различные моменты времени. Положение движущейся нагрузки показано утолщенной линией. Графики рис. 4 представляют собой кривые вертикальных перемещений сечений А и Б (см. рис. 3б) во времени.

Шестая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния различных факторов, относящихся как к конструкции трубопровода – влияние многопролетности, кривизны, так и к параметрам подвижной нагрузки, в частности, влияние скорости, величины подвижной нагрузки, а также ее длины на

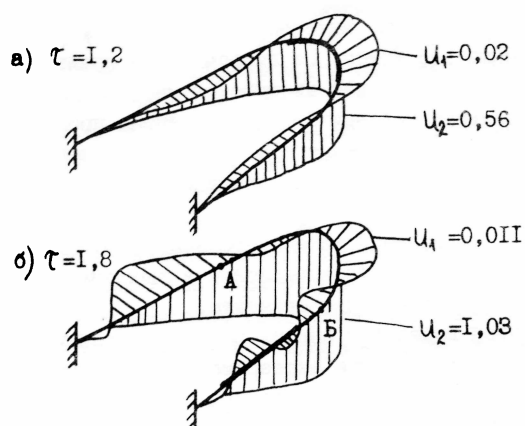


Рис. 3

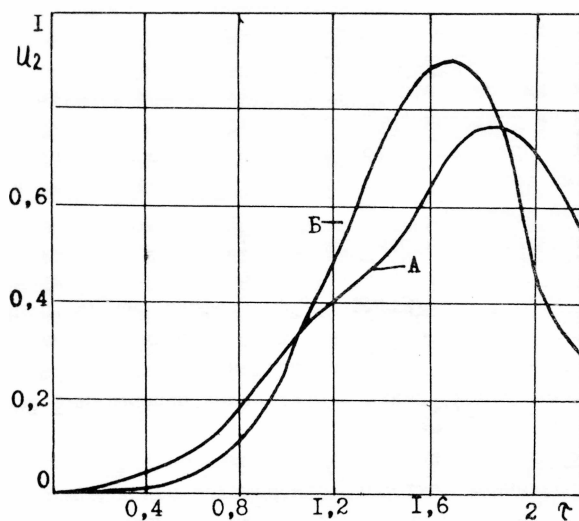


Рис. 4

динамическое поведение криволинейного трубопровода.

В качестве материала была выбрана медная трубка с диаметром 28 мм и толщиной стенки I мм.

Экспериментальные исследования проводились на специально сконструированной и собранной установке. Она состояла из компрессора, подающего сжатый воздух в ресивер. Ресивер оборудован контактным манометром и пусковым устройством и предназначен для обеспечения расхода воздуха и давления, необходимых для разгона подвижной нагрузки до нужной скорости.

К ресиверу подсоединены участки загрузки и разгона подвижной нагрузки, изготовленные из стальных трубок с внутренним диаметром, равным внутреннему диаметру медной трубки, и жестко закрепленные на стойках с тем, чтобы избежать ненужных колебаний на участке разгона.

Далее следует рабочий участок, изготовленный из медной трубки, закрепленной таким образом, чтобы было возможно ее свободное скольжение в продольном направлении и поворот на промежуточных опорах, т.е. конструкция опор позволила реализовать краевые условия, близкие к условиям шарнирно-подвижного опирания. В месте подсоединения к участку разгона на рабочем участке установлена шарнирно-неподвижная опора.

В конце рабочего участка установлено приемное устройство. Приемное устройство состоит из укрепленных на консоли резиновых полотенец, при ударе о которые гасится скорость подвижной нагрузки после схода с рабочего участка.

Подвижная нагрузка, изготавливаемая из цилиндров, скрепленных между собой гибким тросиком, перемещается внутри трубок под действием перепада давления.

Изменение во времени перемещений в различных сечениях медной трубки при действии подвижной нагрузки фиксируется с помощью индукционных датчиков перемещений виброизмерительной аппаратуры ВИ-6. Сигналы от датчика передавались на двенадцатиканальный шлейфовый осциллограф Н-700. С помощью индукционных катушек, установленных вдоль магнито-проницаемой медной трубки и магнита, закрепленного на переднем крае движущейся нагрузки, на осциллографе записывались сигналы, позволяющие определить положение нагрузки во времени и ее скорость.

Результаты, полученные экспериментально, были обработаны

и представлены в виде графиков в сравнении с расчетными данными. Проведенная обработка результатов эксперимента показывает удовлетворительное совпадение с результатами вычислений.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы собственные колебания многопролетного балочного перехода трубопровода с учетом температурного перепада, внутреннего давления и проанализирована зависимость частот свободных колебаний одно- и двухпролетных переходов от этих факторов, а также от условий заземления концов перехода в грунте.

2. Составлена модель, описывающая переходные динамические процессы в прямолинейных МТ при воздействии движущейся массы очистных устройств, контейнерных составов, учитывающая сложные конструктивные схемы, включающие заземленные в грунте участки, промежуточные опоры.

3. Сравнение с опубликованными в литературе результатами теоретических исследований, полученными с помощью других методов, показало хорошее совпадение, что подтверждает правильность решения и является основанием для широкого применения МКР при исследовании подобного класса задач. Использование составленной на основе алгоритма МКР программы вычислений на ЭВМ применительно к системам с различными условиями опирания показало, что ее возможности позволяют осуществить единый подход к различным расчетным схемам.

4. Исследование конкретных трубопроводных конструкций при очистке полости показали, что динамические напряжения в ряде реальных случаев, суммируясь со статическими, превосходили предел упругости [9].

5. На основе теории пространственно-криволинейных стержней с применением векторных методов получены уравнения движения МТ при действии подвижной нагрузки и разработан алгоритм их решения, в котором неявная разностная схема, обеспечивающая устойчивость и сходимость вычислений в широком диапазоне соотношений шага по времени и координате, сочетается с методом раздельного решения систем уравнений.

6. Разработана методика экспериментальных исследований. Изготовлена модель и проведена серия экспериментов.

Общая постановка задачи о нестационарном воздействии подвижной нагрузки на трубопровод вполне согласуется с экспериментальными данными, что позволяет использовать полученные в работе результаты для практических расчетов.

7. При проектировании технологических схем очистки полости и определении параметров движения очистного устройства или движения пневмоставов неучет динамического воздействия, особенно на криволинейных участках, может привести к разрушению трубопровода. Применение разработанных методов расчета динамических усилий позволяет устранить опасные колебания при эксплуатации и строительстве МГ.

8. Предложенная методика расчета воздействия движущейся нагрузки на конструкцию может найти применение при исследовании широкого класса задач, сводящихся к подобной системе с движущейся массой. Составленные автором программы могут быть использованы при проектировании МГ и проектировании технологических схем строительства и эксплуатации, что свидетельствует о практической важности выполненных разработок. Часть полученных результатов уже внедрена при разработке нормативно-инструктивных материалов [10-13].

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Герштейн М.С., Климовский Е.М., Фомичев В.Д. Динамическая прочность надземных балочных трубопроводов при пропуске очистных устройств // Стр-во трубопроводов.-1975.-№3.-С.21-23.
2. Фомичев В.Д. О действии подвижной нагрузки на надземные многопролетные балочные системы трубопроводов // Строительная механика и расчет сооружений.-1975. -№3. -С.57-60.
3. Фомичев В.Д., Климовский Е.М. Исследование динамической прочности надземных балочных систем трубопроводов при пропуске очистных устройств // Тр. ВНИИСтА. -1976.-Вып.32, -С.76-84.
4. Фомичев В.Д. Влияние граничных условий на динамику однопролетных балочных переходов трубопроводов под действием подвижной нагрузки // Тр. ВНИИСтА. -1976. -Вып.34. -С.75-78.

5. Фомичев В.Д. О колебаниях надземных трубопроводов с криволинейными участками под действием подвижной нагрузки // Тр. УШ творческий семинар. Челябинск, 1976. -М., 1977. -С.36-44.
6. Фомичев В.Д. Колебания бескомпенсаторных балочных переходов трубопроводов // Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений. -1975. -№ 2. -С.36-40.
7. Петров И.П., Фомичев В.Д. Определение частот и максимальных пролетов балочных систем надземных трубопроводов // Тр. ВНИИСТА. - 1976. -Вып.32. -С.68-75.
8. Фомичев В.Д. Применение численных методов к расчету трубопроводов на воздействие статических и динамических нагрузок // Тр. ВНИИСТА. -1977. -Вып. 40. -С.14-23.
9. Руководство по расчету динамической прочности балочных криволинейных, компенсационных и конечных участков газопроводов при пропуске очистных устройств: Р 250-76 / ВНИИСТ, Сост. М.С.Герштейн, В.Д.Фомичев, Е.М.Климовский. Введ. 27.10-76. -М., 1978. -52с.
10. Фомичев В.Д. Программа "ДВИНА" исследования динамики надземных трубопроводов с криволинейными участками при пропуске очистных устройств // Программы и алгоритмы математического обеспечения ЭВМ для решения научно-исследовательских задач в строительстве предприятий нефтяной и газовой промышленности. -М., 1977. -С.3-10.
11. Расчеты и испытания на прочность. МР 168-86. Метод и программа расчета на ЭВМ пространственного многопролетного криволинейного трубопровода на подвижную нагрузку / Госстандарт СССР. Сост. М.С.Герштейн, В.Д.Фомичев. - М., 1985. - 45с.
12. Фомичев В.Д. Динамика криволинейных трубопроводов при действии подвижной нагрузки // Вопросы прочности и устойчивости трубопроводов. - М., 1986. -С.27-32.