

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАСТЫВАЮЩЕЙ ПАРАФИНОВОЙ НЕФТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПО ТРУБАМ

©2009 В.К. Тянь, В.Н. Дегтярев, П.В. Тянь, А.В. Пименов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 2.12.2009

Обозначена проблема, связанная с оценкой времени сдвига застывшей парафиновой нефти в трубопроводе, дана математическая модель, описывающая полученные экспериментальные данные по распространению волны давления по трубопроводу при мгновенном приложении сдвигового давления к начальному сечению трубопровода. Приведена идентификация объектов (участков трубопровода между контрольными сечениями) по входному и выходному сигналам, позволяющая вычислить затухание волны давления по длине трубопровода.

Ключевые слова: парафиновая нефть, магистральный трубопровод, математическое моделирование, волна давления

Парафиновые нефти при температуре близкой или ниже их температуры застывания являются структурированными жидкостями, проявляющими свойства твердых тел. Они могут быть отнесены к вязкопластичным жидкостям. Течение таких жидкостей описывается уравнением Шведова-Бингама [1] в виде

$$\tau = \tau_n + \eta \cdot S, \quad (1)$$

где τ - напряжение сдвига; τ_n - предельное начальное напряжение сдвига; η - пластическая вязкость; S - градиент скорости.

Из рассмотрения уравнения (1) следует, что для начала течения (деформации) вязкопластичной жидкости необходимо преодолеть некоторое начальное напряжение τ_n . Вязкопластичные свойства парафиновой нефти обусловлены наличием в ней объемной решетки парафина и могут быть оценены такими реологическими параметрами как τ и η . При остановке перекачки за счет тиксотропии прочность парафиновой решетки возрастает, нефть в трубопроводе застывает. Для возобновления ее течения по трубопроводу необходимо приложить определенное пусковое давление (т.н. давление сдвига), которое рассчитывается по формуле:

$$P_c = \frac{2\tau_n \cdot L}{R}, \quad (2)$$

Тянь Владимир Константинович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт». E-mail: tt@samgtu.ru

Дегтярев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт»

Тянь Павел Викторович, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах»

Пименов Алексей Вячеславович, инженер кафедры «Трубопроводный транспорт»

где L и R соответственно длина и радиус трубопровода.

При приложении к начальному сечению трубопровода давления $P \geq P_c$ возникающая волна давления распространяется по его длине с определенной скоростью. Сдвиг застывающей парафиновой нефти произойдет в том случае, когда эта волна достигнет конечного сечения трубопровода, т.е. пройдет расстояние L . Таким образом, время сдвига застывшей нефти (возобновление процесса перекачки) связано со скоростью распространения волны сдвигового давления по длине трубопровода. Скорость распространения волны давления в трубопроводе с ньютоновскими жидкостями может быть рассчитана по известной формуле

$$V = \sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho_{жс} \left[\frac{D \cdot E_{жс}}{\delta \cdot E_m} + 1 \right]}}, \quad (3)$$

где $E_{жс}$ и E_m - модуль упругости соответственно жидкости и материала трубы; D и δ - диаметр и толщина стенки трубопровода; $\rho_{жс}$ - плотность жидкости.

Скорость V в трубопроводе с ньютоновскими жидкостями (вода, легкие нефтепродукты и нефти) достаточно высока (порядка 1000 м/с) и постоянна по всей длине трубопровода. В случае же структурированных ньютоновских жидкостей, к которым относятся и вязкопластичные парафиновые нефти, скорость распространения волны давления мала и величина ее может снижаться по длине трубопровода. Это приводит к значительному возрастанию времени сдвига застывшей нефти

парафиновой нефти в трубопроводе. Так, например, время прихода волны давления в трубопроводе с застывшим мазутом на десятый км составило порядка 14 суток [2], тогда как в водопроводе это время составляет 12 секунд. Трубопроводная практика также показывает, что приложенное в начале трубопровода давление сдвига очень медленно распространяется по длине трубопровода с парафиновой нефтью после его длительной остановки.

В представленной работе исследуются характеристики распространения волны давления.

При сдвиге нефти важными характеристиками являются скорость распространения и затухание давления вдоль магистрального трубопровода, понятия которых будут конкретизированы ниже. Наиболее полно ответить на поставленные вопросы может адекватная математическая модель типа «вход-выход». Для построения математической модели был проведен эксперимент, результаты которого позволяют построить указанную модель с определенной точностью. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки.

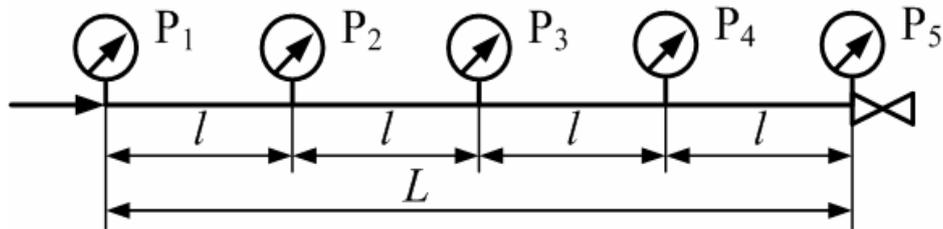


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
 P_1 - P_5 – образцовые манометры в контрольных точках магистрального трубопровода, заполненного застывшей парафиновой нефтью; $L=4,1$ м; $l=1,025$ м

Экспериментальная установка включала в себя емкость, из которой в трубопровод подавалась исследуемая нефть и источник давления (на рис. 1 не показаны). Исследуемая нефть – высокопарафиновая мангышлакская нефть с температурой застывания $+23^{\circ}\text{C}$. Температура опыта $+20^{\circ}\text{C}$. Через каждые 1,025 м на трубопроводе были установлены образцовые манометры. Перед началом эксперимента кран на конце трубы был перекрыт и к начальному сечению мгновенно было приложено давление $P_1=0,8$ кг/см². Результат экспериментов представлен на рис. 2.

После четырех часов давление на манометре практически стабилизировалось, было отмечено на каждом контрольном участке «запрессованное» давление ΔP_0 , характеризующее прочность парафиновой структурной решетки. Участки парафиновой нефти между образцовыми манометрами представляют собой последовательное соединение объектов, выходное давление каждого предыдущего объекта является входным давлением для последующего столба парафиновой нефти, длина каждого из которых определяется положением образцовых манометров.

Таким образом, на вход первого объекта подается единичный ступенчатый сигнал. Каждый участок (объект) идентифицирован в классе линейных моделей. Анализ кривых переходных процессов P_2 , P_3 и P_4 показывает

наличие некоторого давления в начальный момент времени. Это свидетельствует о наличии безинерционного канала передачи входного давления на выход соответствующего участка в механизме передачи давления в застывшей парафиновой нефти.

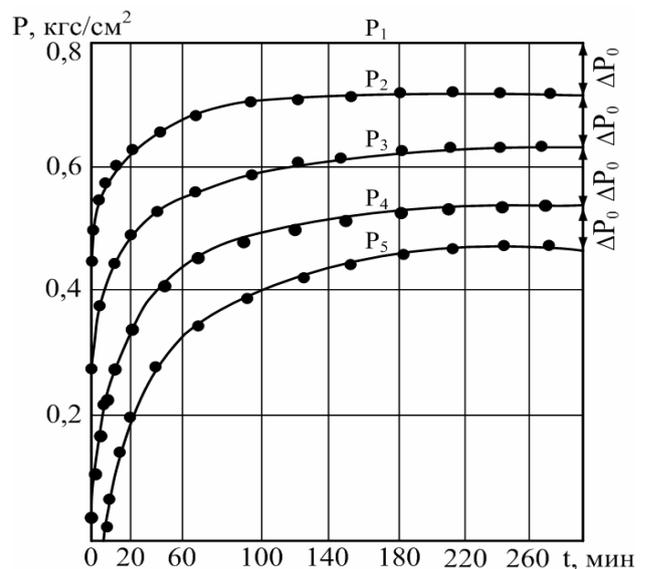


Рис. 2. Рост давления в контрольных точках трубопровода

Коэффициенты безинерционной передачи для первых трех участков соответственно равны 0,5, 0,3, 0,1. Очевидно, что на следующем участке коэффициент примет значение, равное

нулю. Безинерционная передача давления на последующих участках будет полностью отсутствовать. С другой стороны, медленное нарастание давления во времени подтверждает наличие инерционного канала при передаче давления на каждом из рассмотренных участков.

Обработка экспериментальных данных свидетельствует о наличии двух каналов передачи давления в застывшей парафиновой нефти. В соответствии с приведенными выводами структурная схема идентификации и моделирования в среде Matlab представлена на рис. 3.

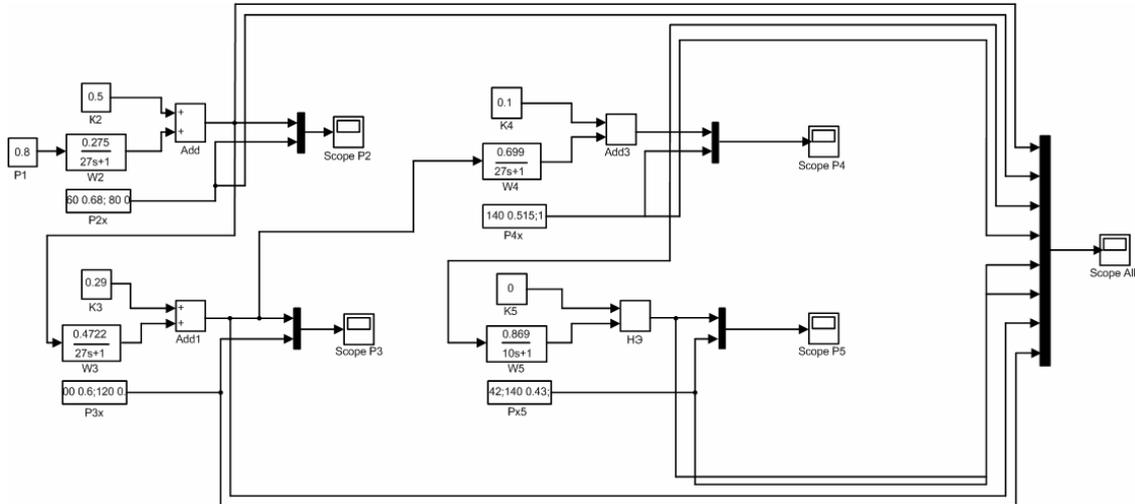


Рис. 3. Структурная схема моделирования и идентификации магистральных трубопроводов

Первый участок идентифицирован по полученной переходной характеристике в виде передаточной функции апериодического звена первого порядка. Результат аппроксимации исходной кривой переходной характеристикой апериодического звена представлен на рис. 4. Среднеквадратическая ошибка (СКО) аппроксимации равна 0,0041. Точность аппроксимации достаточно высока и не имеет смысла повышать порядок дифференциального уравнения, имеющего вид:

$$T \frac{dP_2}{dt} + P_2 = kP_1, \quad (4)$$

где $k=0,275$; $T=27$ мин.

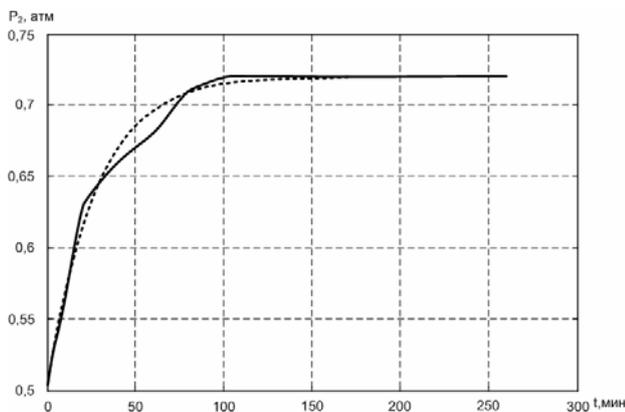


Рис. 4. Идентификация первого участка трубопровода

Математическая модель 2 последующих участков принята аналогичной модели (4) с той же постоянной времени, но с разными коэффициентами усиления $k=0,4722$ и $0,699$. Результаты аппроксимации экспериментальных кривых выходного давления реакцией апериодического звена представлены на рис. 5 и рис. 6. Среднеквадратические ошибки аппроксимации равны 0,0117 и 0,0136. На рис. 7 представлен результат аппроксимации кривой давления P_5 на последнем участке. Анализ рис. 2 и рис. 7 свидетельствует о наличии зоны нечувствительности. Ширина зоны нечувствительности определена из рис. 2 и учтена в структурной схеме наличием нелинейного элемента с разрывом в нуле (рис. 3). В этом случае СКО равна 0,015.

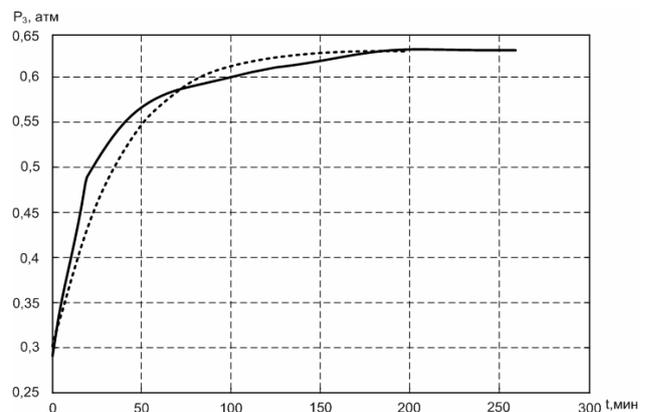


Рис. 5. Моделирование второго участка трубопровода

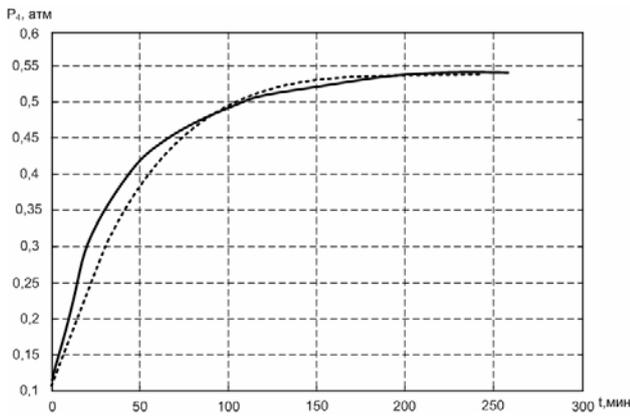


Рис. 6. Моделирование третьего участка трубопровода

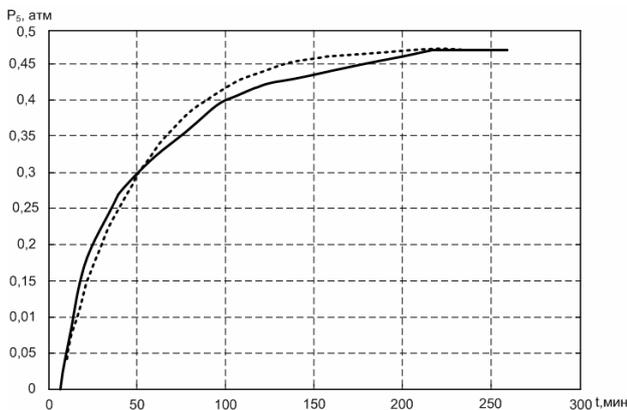


Рис. 7. Идентификация четвертого участка трубопровода

Выводы: приведенные результаты обработки экспериментальных данных позволяют более детально рассмотреть понятие скорости распространения давления. В традиционном понимании скорость распространения давления (как прохождение определенной длины в единицу времени) из представленных экспериментов точно определить нельзя. Это связано с техническими сложностями фиксации быстро протекающего процесса. Однако очевидно, что она высока и по этой причине один из каналов передачи давления рассматривается безинерционным. Передача давления по инерционному каналу представляет большой интерес в задачах транспорта парафиновой нефти, и разумно рассматривать скорость нарастания давления в фиксированной точке трубопровода. Затухание давления по длине трубопровода определяется коэффициентом передачи как инерционного, так и безинерционных каналов передачи давления последовательных участков. Графики на рис. 7 свидетельствуют о наличии зоны нечувствительности, т.е. имеется некоторое минимальное значение давления на входе участка, «позволяющее» передачу давления через данный участок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Улкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
2. Черникин, В.И. Перекачка вязких и застывающих нефтей. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 162 с.

MATHEMATICAL MODELING OF CONGELATION PARAFFIN OIL IN TRANSIT ON PIPES

© 2009 V.K. Tyan, V.N. Degtyaryov, P.V. Tyan, A.V. Pimenov

Samara State Technical University

The problem connected with estimation of time shift of congelation paraffin oil in the pipeline is marked out, the mathematical model presenting gained experimental data on extending the wave of pressure on the pipeline at instant application of shift pressure to initial cross-section of the pipeline is given. Identification of installations is resulted (sections of the pipeline between control cross-sections) on entrance and output signals, allowing to compute attenuation of a wave of pressure on length of the pipeline.

Key words: *paraffin oil, main pipeline, mathematical modeling, wave of pressure*

Vladimir Tyan, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Pipeline Transport". E-mail: tt@samgtu.ru
Vladimir Degtyaryov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Pipeline Transport"
Pavel Tyan, Assistant at the Department "Automation and Control in Technical Systems"
Aleksy Pimenov, Engineer at the Department "Pipeline Transport"