

Добыча, транспорт и переработка нефти и газа

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ¹

А.А. Афиногентов, Ю.А. Багдасарова, Ю.А. Тычинина

Самарский государственный технический университет

443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: pondex@yandex.ru

Рассмотрена математическая модель, описывающая нестационарное движение нефти по магистральным трубопроводам. Проведен анализ пусковых режимов работы нефтепровода. Установлена область максимальных значений амплитуды ударного давления по длине трубопровода.

Ключевые слова: математическое моделирование, объект с распределенными параметрами, краевая задача, трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов.

Введение. В настоящее время для решения задач технологического расчета трубопровода в системах магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов широко используются методики, позволяющие определить требуемые параметры для заранее заданных режимов работы трубопровода [1]. Такой подход основан на приближенных методиках определения основных параметров и не позволяет оценить работу системы в нестационарных режимах, при изменении производительности, а также решать задачи оптимизации режимов работы нефтепроводов.

В статье предлагается подход к решению задач технологического расчета трубопровода на основе решения дифференциальных уравнений движения капельной сжимаемой жидкости в трубах с учетом гидравлического сопротивления, описанных в работах [2-4].

Краевая задача. Взаимосвязь основных параметров (давления P и скорости ω), характеризующих движение нефтепродукта плотностью ρ по трубопроводу постоянного диаметра D длиной L в любой точке l по направлению движения потока и момент времени τ , может быть описана системой двух уравнений, в общем случае нелинейных [2], вида

¹Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.».

Александр Александрович Афиногентов, кандидат технических наук, ассистент.

Юлия Александровна Багдасарова, кандидат педагогических наук, старший преподаватель.

Юлия Александровна Тычинина, кандидат технических наук, доцент.

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial l} = \rho \cdot \left(\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{\lambda(\omega) \cdot \omega^2}{2 \cdot D} \right); \\ -\frac{\partial P}{\partial \tau} = c^2 \cdot \rho \cdot \frac{\partial \omega}{\partial l}, \end{cases} \quad (1)$$

здесь $P(l, \tau) = \rho \cdot g \cdot (H(l, \tau) - z(l))$, где $H(l, \tau)$ – напор жидкости в трубопроводе, $z(l)$ – превышение центра тяжести сечения трубы над произвольной горизонтальной плоскостью, g – ускорение свободного падения, $\lambda(\omega(l, \tau))$ – коэффициент гидравлического сопротивления, c – скорость звука в нефти, текущей в стальной трубе с толщиной стенки δ , определяется по формуле Жуковского:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho \cdot D}{\delta \cdot E}}}, \quad (2)$$

где K – модуль объемного сжатия жидкости (для нефти $K \approx 1500$ МПа), E – модуль упругости материала трубы (для стали $E \approx 2 \cdot 10^5$ МПа).

Положим, что до момента времени $\tau = 0$ движение жидкости в трубопроводе отсутствовало или было стационарным, тогда начальные условия можно представить в виде

$$P(l, 0) = P_0(l); \quad (3)$$

$$\omega(l, 0) = \omega_0. \quad (4)$$

Сформулируем *краевую задачу* в следующем виде: к одному концу трубопровода подключен насосный агрегат, изменяющий расход $Q(\tau)$ нефтепродукта по известному закону от времени, а на другом конце предполагается известным давление (при наличии резервуаров на конечном пункте). Тогда граничные условия могут быть представлены в виде

$$\omega(0, \tau) = \frac{4 \cdot Q(\tau)}{\pi \cdot D^2}; \quad (5)$$

$$P(L, \tau) = (P_{atm} + \rho \cdot g \cdot \Delta Z). \quad (6)$$

Далее будем считать атмосферное давление одинаковым в начальной и конечной точках трубопровода и положим при расчетах $P_{atm} = 0$.

Если полагать в задаче известным закон изменения напора $H(\tau)$ (давления), создаваемого насосом, то граничное условие (6) можно заменить:

$$P(0, \tau) = \rho \cdot g \cdot H_H(\tau). \quad (7)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda(\omega)$ определяется в зависимости от режима движения жидкости в трубопроводе, который характеризуется числом Рейнольдса [1]

$$Re = \frac{\omega \cdot D}{\nu}; \quad (8)$$

при ламинарном режиме течения

$$Re \leq 2320, \quad \lambda(\omega) = \frac{64 \cdot \nu}{\omega \cdot D}; \quad (9)$$

при турбулентном режиме течения в зоне гидравлически гладких труб по формуле Стокса

$$2320 < Re \leq \frac{10}{\varepsilon};$$

$$\lambda(\omega) = 0,3164 \cdot \left(\frac{\nu}{\omega \cdot D} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

в зоне смешанного трения по формуле Альтшуля

$$\frac{10}{\varepsilon} < Re \leq \frac{500}{\varepsilon};$$

$$\lambda(\omega) = 0,11 \cdot \left(\varepsilon + \frac{68 \cdot \nu}{\omega \cdot D} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

в зоне квадратичного трения по формуле Шифринсона

$$Re > \frac{500}{\varepsilon}, \quad \lambda(\omega) = 0,11 \cdot \varepsilon^{0,25}, \quad (12)$$

где ν – кинематическая вязкость, ε – относительная шероховатость труб [1].

Анализ нестационарных режимов работы трубопровода. Интегрирование системы нелинейных уравнений (1) с начальными условиями (3, 4) и граничными условиями (5, 6) либо (6, 7) проводится численными методами в программе MathCAD с использованием стандартной функции Pdsolve.

Приведем решение рассматриваемой задачи для нестационарного режима работы трубопровода диаметром $D = 1 \text{ м}$, длиной $L = 100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$ и профилем трассы $z(l)$ (рис. 1) при перекачке нефти, имеющей плотность $\rho = 840 \text{ кг/м}^3$, кинематическую вязкость $\nu = 7,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, скорость распространения звука в системе «нефть – труба» $c \approx 998 \text{ м/с}$.

Положим, что в начальный момент времени произошло мгновенное изменение напора или подачи. Причем до этого момента движение в трубопроводе отсутствовало, т. е. $\omega_0 = 0 \text{ м/с}$, $P_0(l) = \rho \cdot g \cdot (H_0 - z(l))$, где H_0 – напор в сечении $l = 0$ трубопровода. Законы изменения скорости или напора в рассматриваемой задаче будут иметь вид:

$$Q(0, \tau) = Q_{cm} = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (13)$$

$$H_H(0, \tau) = H_{cm} = 600 \text{ м}. \quad (14)$$

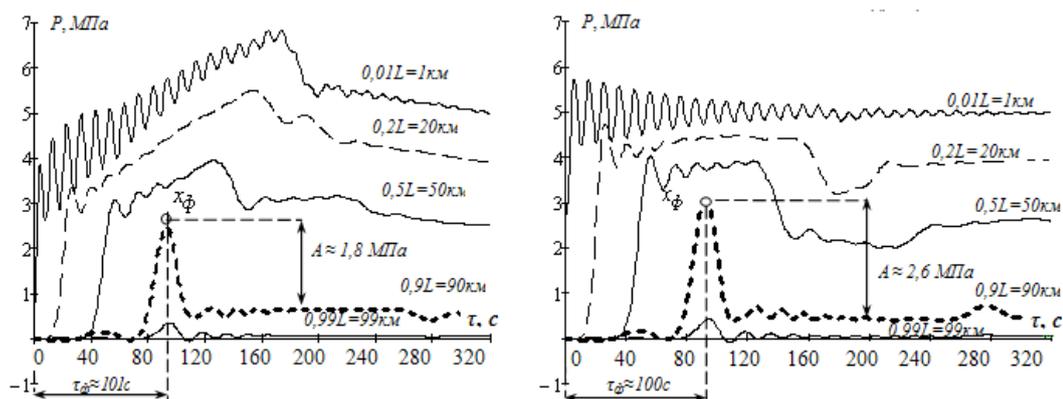
Вид граничного условия (13, 14) определяет характер протекания переходного режима; графики изменения скорости движения и давления нефти в трубопроводе представлены на рис. 1.

Постоянной подаче насоса соответствует граничное условие (13), переходный процесс имеет колебательную составляющую в соответствии с рис. 1, а. При постоянном напоре (14) максимальные значения достигаются в первом колебании, затем проходит фаза выхода на стационарный режим (рис. 1, б).

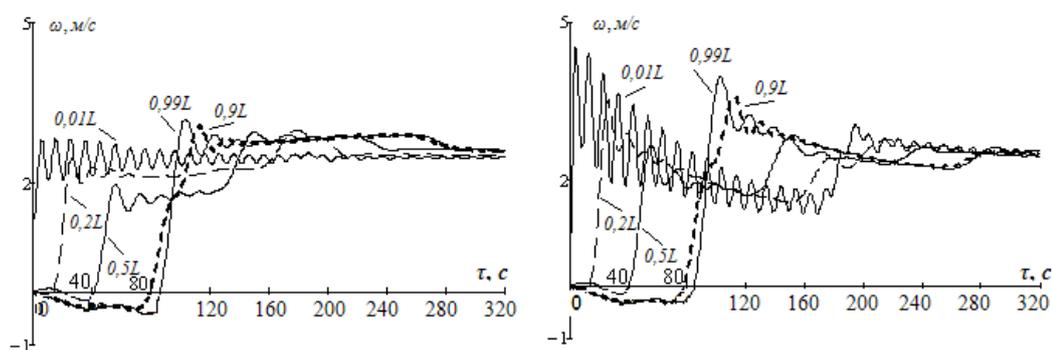
Анализ изменения кривых переходных процессов в зависимости от координаты по длине трубопровода представляет отдельный интерес. В обоих случаях изменение

давления происходит с запаздыванием (τ_{ϕ}), пропорциональным расстоянию от начальной точки трубопровода, величина максимального отклонения давления от стационарного возрастает по мере удаления координаты от начала трубопровода, длительность интервала действия максимального давления сокращается. Изменение давления принимает характер гидравлической ударной волны, амплитуда которой может превышать рабочее давление в данной точке трубопровода в несколько раз.

Изменение давления нефти в трубопроводе



Изменение скорости потока нефти в трубопроводе



Распределение напора по длине трубопровода

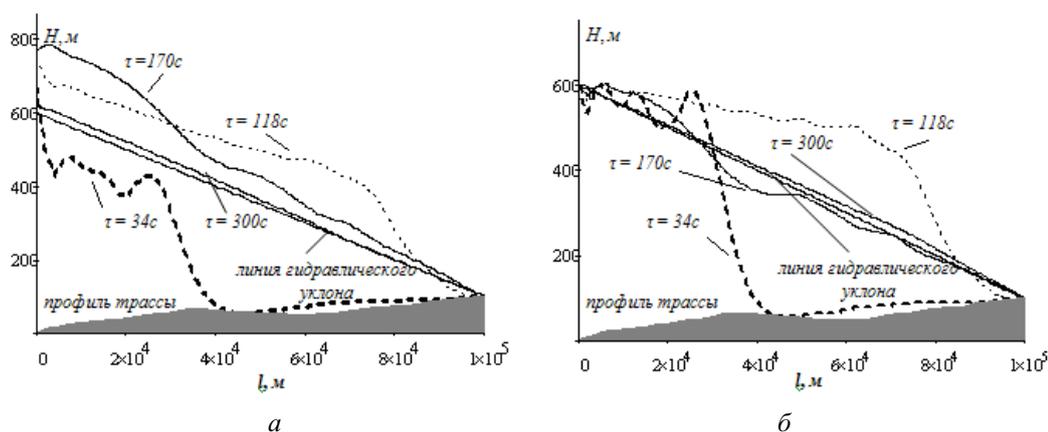


Рис. 1. Изменение скорости (ω) и давления (P) нефти во времени (в пяти сечениях по длине трубопровода) и напора (H) по длине трубопровода (в различные моменты времени) при пуске:
 $a - Q(0, \tau) = const$; $b - H(0, \tau) = const$

Момент максимального отклонения (удара) при этом зависит только от расстояния участка от точки приложения возмущения – начала трубопровода.

Представим амплитуду давления разностью между значением давления, достигаемого в любой точке l трубопровода в произвольный момент времени τ в переходном режиме, и значением давления в этой точке в стационарном режиме $P_{уст}(l) \equiv P(l, \tau_{II})$:

$$A(l, \tau) = P(l, \tau) - P_{уст}(l), \tau \in [0, \tau_{II}], \quad (15)$$

где τ_{II} – длительность нестационарного (переходного) режима работы трубопровода, определяемая как момент времени, в который отклонения давления в любой точке l трубопровода не будут превышать 5 % от значения давления в этой точке при новом стационарном режиме.

На рис. 2 приведено распределение амплитуды давления по длине трубопровода в различные моменты времени нестационарного режима его работы. Время переходного процесса τ_{II} составляет порядка 320 сек.

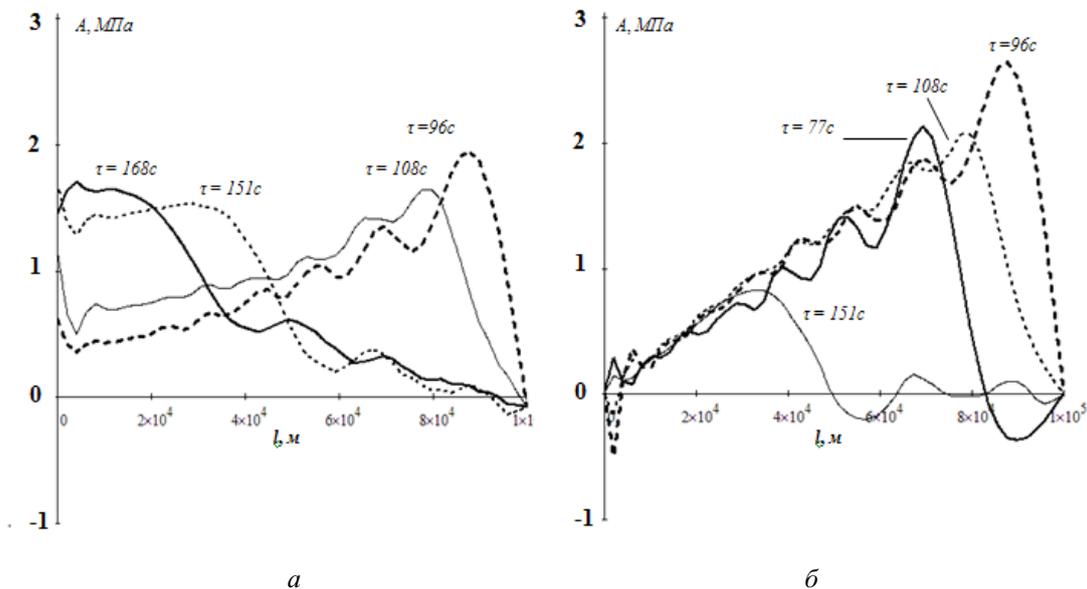


Рис. 2. Распределение давления нефти по длине трубопровода в нестационарном режиме:
 $a - Q(0, \tau) = \text{const}$; $b - H(0, \tau) = \text{const}$

Амплитуда изменения давления зависит от напора, развиваемого насосным агрегатом. В режиме пуска трубопровода с открытым в атмосферу (резервуар) правым концом на последних нескольких километрах трубопровода происходит затухание амплитуды ударной волны, которая достигает своих максимальных значений на участке $(0,8 \div 0,9) \cdot L$.

Указанные выше наблюдения имеют практическую значимость в связи с тем, что поверочные расчеты по толщине стенки трубопровода, как правило, учитывают только значение рабочего давления на рассматриваемом участке, которое значительно ниже ударного на участках $(0,8 \div 0,9) \cdot L$. Следовательно, разработка методик учета амплитуды и длительности ударного давления при проведении поверочных расчетов при проектировании и эксплуатации нефтепроводов, а также разработка мероприя-

тий по снижению негативных факторов пусковых режимов в системах магистрального транспорта нефти являются актуальными задачами.

Исследование распределения по длине трубопровода значения скорости движения фронта волны давления. В напорном трубопроводе при внезапном изменении скорости движения жидкости (мгновенная остановка или появление движения) возникает волна давления, сопровождающаяся резким понижением либо повышением давления. Ударная волна распространяется по жидкости с постепенным затуханием колебаний.

Анализ полученных зависимостей и графиков показывает, что скорость движения фронта волны давления изменяется в зависимости от протяженности пройденного участка трубопровода. Скорость движения фронта волны давления увеличивается по мере приближения к конечной точке участка трубопровода.

Введем два определения для скорости распространения фронта волны давления на произвольном участке трубопровода: *мгновенная* и *усредненная*.

Под мгновенной скоростью v_{ϕ}^* будем понимать скорость, с которой фронт волны давления, т. е. точка x_{ϕ} , проходит рассматриваемый участок l трубопровода, т. е.

$$v_{\phi}^*(l) = \frac{dx_{\phi}}{d\tau}. \quad (16)$$

Под осредненной скоростью \bar{v}_{ϕ} движения фронта волны давления будем понимать отношение пути $l_{\phi} = l - l_0$, пройденного точкой x_{ϕ} , ко времени τ_{ϕ} , за которое точка x_{ϕ} этот путь преодолела:

$$\bar{v}_{\phi}(l) = \frac{l - l_0}{\tau_{\phi}}. \quad (17)$$

Полученные зависимости мгновенной и осредненной скоростей движения фронта волны давления \bar{v}_{ϕ} от координаты l трубопровода представлены на рис. 3.

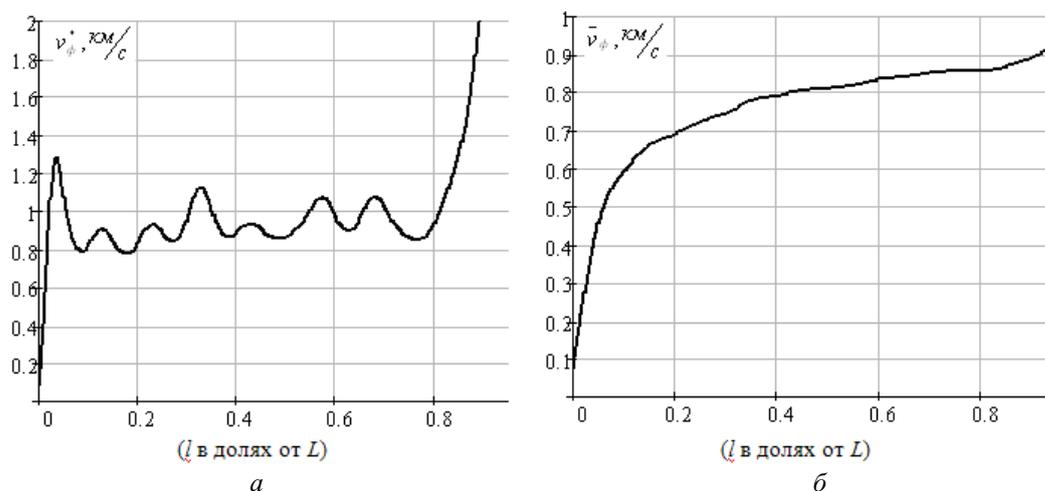


Рис. 3. Зависимость мгновенной v_{ϕ}^* (а) и усредненной \bar{v}_{ϕ} (б) скорости движения фронта волны давления от координаты l трубопровода

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что волна давления распространяется по трубопроводу с неравномерной скоростью, ускоряясь на одних участках и замедляясь на других, с увеличением осредненной скорости по направлению к конечному сечению трубопровода.

Заключение. В работе рассмотрена краевая задача математического моделирования гидродинамических процессов, происходящих в магистральных нефтепроводах. Полученные в результате решения краевой задачи зависимости изменения скоростей и распределений напора по длине трубопровода в переходных режимах его работы позволили осуществить анализ характера распространения волн давления (скорости и амплитуды) в трубопроводе. Такой подход позволяет в дальнейшем формулировать и решать задачи управления нестационарными режимами работы магистральных нефтепроводов с учетом их волновой динамики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новосёлов, А.А. Коршаков, А.М. Шамазов. – Уфа: Дизайн-ПолиграфСервис, 2002. – 658 с.
2. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
3. Афиногентов А.А., Плешивцева Ю.Э., Снопков А.С. Математическое моделирование управляемых гидродинамических процессов трубопроводного транспорта жидких углеводородов // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2010. – Вып. 7(28). – С. 137-144.
4. Афиногентов А.А., Плешивцева Ю.Э., Ефимов А.П. Оптимальное по быстродействию управление переходными режимами работы магистрального нефтепровода // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2011. – Вып. 3(31). – С. 6-13.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2012 г.

HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF TRUNK OIL PIPELINES

A.A. Afinogentov, Yu.A. Bagdasarova, Yu.A. Tychinina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

The mathematical model describing non-stationary movement of the trunk oil pipelines is considered. The analysis of starting operating modes of the oil pipeline is made. The area of the maximum values of amplitude of shock pressure on length of the pipeline is established.

Keywords: *mathematical simulation, object with distributed parameters, boundary problem, petroleum and petrochemical products transportation in trunk pipelines.*

*Alexander A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Assistant.
Yulia A. Bagdasarova (Ph.D. (Techn.)), Senior Lecturer.
Yulia A. Tychinina (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.*