

информации останется неувоенной. Поэтому беспредельно увеличивать информационную насыщенность педагогического процесса не стоит.

Разнообразные и неиссякаемые возможности мультимедиа технологий обучения у ряда преподавателей порождают увлечение ими, и тогда эти средства превращаются в самоцель. Все хорошо в меру – правило, которое применительно к педагогике можно было бы назвать вторым «золотым правилом» воспитания и обучения. Любое, самое великолепное средство или метод обречены на провал, если преподаватель теряет чувство меры в их использовании.

Информатизация образования изменила роль преподавателя, в связи с этим ему необходимо разрабатывать индивидуальные стратегии обучения, которые позволяют обучающемуся становится активным участником учебного процесса. Несмотря на то, что мультимедиа наряду с перспективами, вносит и ряд негативных моментов, использование технологии компьютерной графики и мультимедиа предоставляет новые уникальные возможности развития умений и навыков, улучшения качества образования.

*Список использованной литературы:*

1 Жунусова Л.Х., Дуйсебаева А.Б. Особенности методической системы обучения компьютерной анимации будущих учителей математики. //Вестник. Серия «Физико-математические науки», №1(65).-Алматы: КазНПУ имени Абая, 2019.-С.283-286

2 Саранцев Г. И. Методика обучения математике в средней школе. – М.: Просвещение, 2002. –244 с.

3 Телицина Г.В. Фундаментализация знаний-важнейшее направление развития высшего образования в XXI веке: проблемы и перспективы://Сб. статей III Всерос.науч.-практ.конф.- Пенза:Приволжеский дом знаний, 2007.-С.8-11

**МРНТИ 30.17.15**

**УДК 536.24.01**

*Л. Ермекқызы*

*Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА**

*Аннотация*

Приводятся результаты решения обратной задачи по определению гидравлического сопротивления магистрального нефтепровода. Сформулирована постановка обратной задачи, изложен численный метод решения системы уравнения. Гидравлическое сопротивление трубопровода при «горячей» перекачке высокозастывающей и высоковязкой нефти изменяется в ходе эксплуатации. Температура нефти снижается по длине трубопровода из-за теплопередачи с грунтом, приводит к возрастанию вязкости нефти и росту гидравлического сопротивления.

Зависимость гидравлического сопротивления трубопровода от параметров перекачки нефти определяется путем решения обратной задачи. Постановка обратной задачи состоит из системы уравнения законов сохранения количества движения, массы, энергии и гидравлического сопротивления в форме Альтшуля с неизвестными коэффициентами. Система уравнения в частных производных гиперболического типа для скорости и давления решается численным методом характеристик, а уравнения переноса тепла – итерационным методом бегущего счета.

**Ключевые слова:** обратная задача, гидравлическое сопротивление, переходный процесс, метод характеристик.

Аңдатпа

Л. Ермекқызы

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

## ЖЕРАСТЫ МҰНАЙ ҚҰБЫРЫНЫҢ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ҚАРСЫЛАСУЫН АНЫҚТАУ

Магистральдық мұнай құбырының гидравликалық кедергісін анықтауда кері есептерді шешудің нәтижелері келтірілген. Кері есепті шығару тұжырымдалған, теңдеулер жүйесінің сандық әдісі сипатталған. Жоғары температуралы және тұтқырлығы жоғары майды «ыстық» айдау кезінде құбырдың гидравликалық тұрақтылығы жұмыс кезінде өзгереді. Майдың температурасы топырақтан жылу тасымалдануына байланысты құбырдың ұзындығы бойымен төмендейді, бұл мұнайдың тұтқырлығын арттыруға және гидравликалық қарсылықтың өсуіне әкеледі. Құбырдың гидравликалық кедергісінің мұнай айдау параметрлеріне тәуелділігі кері есепті шешу арқылы анықталады.

Кері есептер белгісіз коэффициенттері бар Альтшуль түріндегі импульс, масса, энергия және гидравликалық тұрақтылықтың сақталу заңдарының теңдеулер жүйесінен тұрады. Жылдамдық пен қысымға арналған гиперболалық типтегі дифференциалдық теңдеулер жүйесі сипаттамалар әдісі арқылы, ал жылу алмасу теңдеулері сандық итеративті әдісімен шешіледі.

**Түйін сөздер:** кері есеп, гидравликалық кедергі, өтпелі процесс, сипаттама әдісі.

L. Yermekkyzy

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

## DEFINITION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF UNDERGROUND OIL PIPELINE

Abstract

The results of solving the inverse problem of determining the hydraulic resistance of a main oil pipeline are presented. The formulation of the inverse problem is formulated, a numerical method for solving the system of equations is described. The hydraulic resistance of the pipeline during the "hot" pumping of high-curing and high-viscosity oil changes during operation. Oil temperature decreases along the length of the pipeline due to heat transfer from the soil, leading to an increase in oil viscosity and an increase in hydraulic resistance. The dependence of the hydraulic resistance of the pipeline on the parameters of oil pumping is determined by solving the inverse problem.

The inverse problem statement consists of a system of equations of laws of conservation of momentum, mass, energy and hydraulic resistance in the form of Altshul with unknown coefficients. The system of partial differential equations of hyperbolic type for speed and pressure is solved by the numerical method of characteristics, and the heat transfer equations by the iterative method of running counting.

**Keywords:** inverse problem, hydraulic resistance, transient, method of characteristics.

### Введение

Возникновение переходных (или нестационарных) процессов в магистральном нефтепроводе связано с любыми изменениями технологического режима перекачки. Переходный процесс могут вызвать запуск или отключение насосного агрегата, изменение положения запорной или регулирующей арматуры, подключение отвода, аварийный разрыв трубопровода и т.п.

Более века назад Н.Е. Жуковский [1] математически описал физические аспекты неустановившегося движения упругой жидкости в трубопроводных системах. Им впервые записана система волновых дифференциальных уравнений движения сжимаемой идеальной жидкости, которые Н.Е. Жуковский интегрировал в конечном виде для некоторых граничных условий. Несколько позже Л. Аллиев [2] проинтегрировал несколько упрощенные дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в нефтепроводе. Им получено решение в виде конечных разностей или, так называемых, цепных уравнений, связывающих скорость и давление нефти в конечном сечении трубопровода в последующий момент времени в зависимости от их значения в предыдущий момент.

Движение нефти и нефтепродуктов по трубопроводу зачастую не является изотермическим. Неизотермичность процесса тем более значительна при перекачке жидкостей с подогревом (так называемая «горячая перекачка»). Такой метод используется для перекачки высоковязких и застывающих нефтей и нефтепродуктов. Подогрев жидкости позволяет снизить ее вязкость, тем самым уменьшив потери напора на трение при ее перекачке по трубопроводу.

Способ «горячей» перекачки является надежным для транспортировки высоkozастывающей (парафинистой) и высоковязкой нефти. В этом случае гидравлическое сопротивление трубы зависит от многих факторов (вязкости, шероховатости, скорости и температуры нефти). Температура нефти

снижается по длине трубопровода из-за теплопередачи с грунтом, приводит к возрастанию вязкости нефти и росту гидравлического сопротивления. Шероховатость трубы повышается из-за выпадения парафина на стенку, также приводит к росту интенсивности турбулентности и потери напора.

Гидравлическое сопротивление является важной характеристикой трубопровода, и в прямой зависимости от его находятся затраты работы насосных агрегатов, и эффективность работы магистрального нефтепровода.

Решение этой проблемы может быть получено методом обратной задачи путем использования математической модели процесса, а недостающую информацию получить из опытных данных [3].

### Постановка задачи.

Ввиду того, что длина  $L$  участка магистрального нефтепровода намного больше его внутреннего диаметра  $D_1$  ( $L \gg D_1$ ) задача рассматривается в одномерной постановке и при следующих допущениях:

1. Нефть является ньютоновской жидкостью и касательное напряжение трения подчиняется закону Ньютона [2]:

$$\tau_w = \lambda \frac{\rho u^2}{8}$$

где  $\tau_w$  - касательное напряжение трения,  $\rho$ ,  $u$  - плотность и средняя скорость потока нефти,  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления трубы.

2. Движение нефти происходит под действием давления, и жидкость течет полным сечением трубопровода;

3. Движение жидкости вдоль трубопровода считается одномерным по направлению оси  $Ox$ , т.е. пренебрегается поперечной скоростью, направленной перпендикулярно оси трубопровода/

В соответствии с принятыми допущениями на основе закона сохранения массы и импульса можно записать систему уравнения движения [4, 5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda(Re, e) \frac{\rho u^2}{2D_1} - \rho g \sin \alpha(x) \quad (2)$$

где  $\lambda(Re, e) \frac{\rho u^2}{2D_1}$  - сила гидравлического сопротивления трубы,  $\rho g \sin \alpha(x)$  - сила тяжести нефти,  $D_1$  - внутренний диаметр трубопровода,  $e = \varepsilon/D_1$  - степень шероховатости стенки трубы.

Уравнение распространения малых возмущений выражает реологию потока:

$$c^2 = (\partial p / \partial \rho)_{T=const} \quad (3)$$

где  $c$  – скорость распространения малых возмущений (скорость звука).

Величину скорости звука можно найти по формуле Жуковского [3]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\xi + \frac{\rho D}{E \delta}}} \quad (4)$$

где  $\xi$  - модуль объемной упругости жидкости,  $\delta$  – толщина стенки трубы,  $E$  - модуль упругости материала стенки.

Систему уравнения (1), (2) с учетом (3) можно привести к виду:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \lambda(Re, \varepsilon) \frac{\rho u |u|}{2D_1} - \rho g \sin \alpha(x) \quad (6)$$

Температура нефти в трубопроводе изменяется конвекцией и теплопередачей с окружающей средой и уравнение переноса имеет вид:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4k}{D_1} (T - T_w) \quad (7)$$

где  $c_p$  - теплоемкость нефти, соответственно,  $k$  - коэффициент теплопередачи,  $T_W$  - температура окружающего грунта.

Зависимости плотности, вязкости и теплоемкости нефти от температуры выражаются стандартными формулами [4], [5]

$$\rho = \rho_{20}[1 + \zeta(20 - T)], v = a_1 e^{-b_1 T}, c_p = \frac{53357 + 107,2T}{\sqrt{\rho_{20}}} \quad (8)$$

где  $\rho_{20}$  - плотность нефти смеси при 20 °С;  $\zeta, a_1, b_1$  - эмпирические постоянные,  $\zeta = 0,000738, 1/°C$ .

Система уравнения (4) - (8) рассматривается совместно для расчета давления, скорости и температуры.

Начальные условия системы (5) - (7) имеют вид:

$$u(0, x) = u_0(x), p(0, x) = p_0(x), T(0, x) = T_0(x) \quad (9)$$

Граничные условия в начальном пункте трубопроводе находятся напорно-объемной характеристикой насосного агрегата, т.е. для заданного объема перекачки (массового расхода) нефти генерируется давление:

$$p(0, t) = p_{in}(t) \quad M(0, t) = M_{in}(t) \quad (10)$$

В конечном пункте трубопроводе - из условия доставки объема нефти [6]:

$$p(L, t) = p_{out}(t) \quad M(L, t) = M_{out}(t) \quad (11)$$

Для уравнения переноса (7) достаточно задавать граничное условие в начальном пункте трубы:

$$T(0, t) = T_{in}(t) \quad (12)$$

Как показывают экспериментальные исследования в трубопроводах [7], [8], коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса определяется формулой Альтшуля [9].

Для уточнения формулы Альтшуля путем решения обратной задачи запишем в модифицированной форме:

$$\lambda(Re) = a \cdot \left( \frac{68}{Re} + d \right)^b \quad (13)$$

где  $Re = uD_1/v(T)$  - число Рейнольдса;  $v(T)$  - коэффициент кинематической;  $a, b, d$  - константы в классической формуле Альтшуля [9] имеют значения  $a=1, b=0.25, d=0.11$ .

### Численный метод решения системы уравнения.

С началом использования быстродействующих компьютеров появились новые численные методы решения. Особенную популярность приобрел метод характеристик. Алгоритмы для численного расчета переходных процессов путем составления компьютерных программ предложены в работах Н.А. Картвелишвили, М.А. Гусейнзаде, В.А. Юфина, В.В. Жолобова и многих других отечественных и зарубежных ученых.

Введем равномерную ортогональную расчетную сетку  $x, t$  с шагом  $\Delta t$  по времени. Шаг по координате выберем следующим образом:  $\Delta x = c\Delta t$ , где  $c$  - фиксированное значение скорости звука. Расчетная сетка состоит из временных слоев, которые обозначаются индексом  $n$ .

В каждом временном слое содержатся координатные узлы, которые нумеруются индексом  $m$ . В расчетной сетке выражение  $u_m^n$  - скорость в координатном узле  $m$  для временного слоя  $n$ . Уравнения двух семейств характеристик (рис. 1) имеют вид:

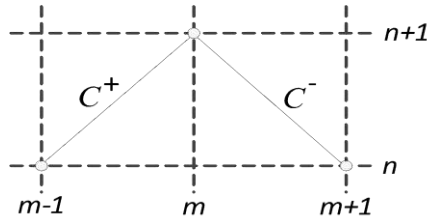


Рисунок 1. Расчетная сетка на характеристиках

Сначала рассмотрим численное решение системы (5), (6), которая является гиперболической системой в частных производных. Система уравнения гиперболического типа имеет характеристики, на которых уравнения (5), (6) в частных производных заменяются обыкновенными дифференциальными уравнениями для давления и скорости [10].

Уравнения двух семейств характеристик:

$$\frac{dx}{dt} = u + c, \quad \frac{dx}{dt} = u - c \quad (14)$$

Скорость нефти в трубе  $u$  (1 м/с) мала по сравнению со скоростью звука  $c$  (1200 м/с). Поэтому вместо (14) можно использовать систему характеристик

$$dx - c \cdot dt = 0 \quad (15)$$

$$dx + c \cdot dt = 0 \quad (16)$$

Система уравнения (5), (6) на этих характеристиках записывается в виде:

$$dp + \rho c du + \frac{\lambda \rho u |u|}{2D_1} + \rho g \sin \alpha = 0 \quad (17)$$

$$dp - \rho c du + \frac{\lambda \rho u |u|}{2D_1} + \rho g \sin \alpha = 0 \quad (18)$$

$$p_m^{n+1} - p_{m-1}^n + \rho_{m-\frac{1}{2}} c (u_m^{n+1} - u_{m-1}^n) = - \frac{\lambda_{m-\frac{1}{2}} \rho_{m-\frac{1}{2}} u_{m-1}^n |u_{m-1}^n| \Delta x}{2D} - \rho_{m-\frac{1}{2}} g \sin \alpha_{m-\frac{1}{2}} \Delta x \quad (19)$$

$$-p_m^{n+1} + p_{m+1}^n + \rho_{m+\frac{1}{2}} c (u_m^{n+1} - u_{m+1}^n) = - \frac{\lambda_{m+\frac{1}{2}} \rho_{m+\frac{1}{2}} u_{m+1}^n |u_{m+1}^n| \Delta x}{2D} - \rho_{m+\frac{1}{2}} g \sin \alpha_{m+\frac{1}{2}} \Delta x \quad (20)$$

Или обозначая

$$X_l = p_{m-1}^n + \rho_{m-\frac{1}{2}} c u_{m-1}^n - \frac{\lambda_{m-\frac{1}{2}} \rho_{m-\frac{1}{2}} u_{m-1}^n |u_{m-1}^n| \Delta x}{2D} - \rho_{m-\frac{1}{2}} g \sin \alpha_{m-\frac{1}{2}} \Delta x \quad (21)$$

$$X_r = p_{m+1}^n - \rho_{m+\frac{1}{2}} c u_{m+1}^n + \frac{\lambda_{m+\frac{1}{2}} \rho_{m+\frac{1}{2}} u_{m+1}^n |u_{m+1}^n| \Delta x}{2D} + \rho_{m+\frac{1}{2}} g \sin \alpha_{m+\frac{1}{2}} \Delta x \quad (22)$$

Получим систему разностных уравнений для переменных в координатном узле  $m$  временного слоя  $n+1$ :

$$p_m^{n+1} + \rho_{m-\frac{1}{2}} c u_m^{n+1} = X_l \quad (23)$$

$$p_m^{n+1} - \rho_{m+\frac{1}{2}} c u_m^{n+1} = X_r \quad (24)$$

$$u_m^{n+1} = \frac{1}{2} \left( \frac{X_l}{c \rho_{m-\frac{1}{2}}} - \frac{X_r}{c \rho_{m+\frac{1}{2}}} \right) \quad (25)$$

$$p_m^{n+1} = \left( \frac{X_l}{c \rho_{m-\frac{1}{2}}} + \frac{X_r}{c \rho_{m+\frac{1}{2}}} \right) / \left( \frac{1}{c \rho_{m-\frac{1}{2}}} - \frac{1}{c \rho_{m+\frac{1}{2}}} \right) \quad (26)$$

Вводя обозначение  $K = \frac{4k}{\rho c_p D_1}$ , уравнение (7) приводится к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = -K(T - T_w) \quad (27)$$

Разностный аналог (27) можно записать:

$$\frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta t} + u_m^n \frac{T_{m+1}^{n+1} - T_{m-1}^{n+1}}{2\Delta x} = -K_m^n (T_m^{n+1} - T_w) \quad (28)$$

Отсюда нетрудно получить:

$$T_m^{n+1} = \alpha_m^n \cdot T_{m-1}^{n+1} + \beta_m^n \cdot T_m^n + \gamma_m^n \quad (29)$$

Здесь приняты обозначения:

$$\alpha_m^n = \frac{u_m^n}{2\Delta x} / \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{u_m^n}{2\Delta x} + K_m^n \right), \quad \beta_m^n = \frac{1}{\Delta t} / \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{u_m^n}{2\Delta x} + K_m^n \right)$$

$$\gamma_m^n = K_m^n \cdot T_w / \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{u_m^n}{2\Delta x} + K_m^n \right)$$

Формулы (25), (26) и (29) определяют в итерационном процессе расчетные данные скорости, давления и температуры, системы находятся фактические значения скорости, давления, температуры потока нефти в трубопроводе.

Путем сравнения расчетных и опытных данных находятся постоянные  $a, b, d$  формулы Альтшуля (13) и строится зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса  $\lambda(Re)$  на участке магистрального нефтепровода.

### Заключение

Гидравлическое сопротивление трубопровода при «горячей» перекачке высокозастывающей и высоковязкой нефти изменяется в ходе эксплуатации. Зависимость гидравлического сопротивления трубопровода от параметров перекачки нефти определяется путем решения обратной задачи.

Постановка обратной задачи состоит из системы уравнения законов сохранения количества движения, массы, энергии и гидравлического сопротивления в форме Альтшуля (17) с неизвестными коэффициентами.

Система уравнения в частных производных гиперболического типа для скорости и давления решается численным методом характеристик, а уравнения переноса тепла – итерационным методом бегущего счета.

### Список использованных источников:

- 1 Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. URSS. Серия: Физико-математическое наследие. Физика (механика), 2011. – 104 с.
- 2 Allievi L. Theory of Water Hammer. Notes I to V, ASME, New York, NY, USA, 1913.
- 3 Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. –Новосибирск. Сибирское научное издание. 2009. 458 с.
- 4 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. Наука, 1974. 712 с.
- 5 Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
- 6 Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газонефтепроводов / П.И. Тугунов [и др.]. М.: ДизайнПолиграфСервис, 2002. 658 с.
- 7 Жапбасбаев У.К., Бекибаев Т.Т., Рамазанова Г.И., Махмотов Е.С., Рзиев С.А. Расчет оптимальной температуры перекачки для транспортировки нефти // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. №4 (20). С. 61-66.
- 8 Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Численный метод определения места утечки жидкости и газа в трубопроводе // Сибирский журнал индустриальной математики. 2009. Т.12, №1, С. 25-30.
- 9 Морозова Н.В., Коршаков А.А. О границах зон трения при гидравлическом расчете нефти и нефтепродуктопроводов // Нефтегазовое дело. 2007, Т.5, №1.
- 10 Быков К.В., Николаев А.К., Маларев В.И. Определение коэффициента гидравлического сопротивления магистрального нефтепровода // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013, №5. С. 265-268.