

МРНТИ 30.17.23

Об одной обратной задаче по определению гидравлического сопротивления нефтепровода

Босинов Д.Ж., Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан, E-mail: bossinov.daniyar@gamil.com
Жапбасбаев У.К., Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан, E-mail: uzak.zh@mail.ru

Приводятся результаты определения коэффициента гидравлического сопротивления трубы магистрального нефтепровода. Способ «горячей» перекачки считается одним из надежных для транспортировки высоковязкой и высокозастывающей (парафинистой) нефти. В «горячей» перекачке парафинистой нефти происходит: 1) снижение температуры из-за теплопередачи с холодным грунтом и рост вязкости нефти; 2) изменение шероховатости стенки трубы нефтепровода из-за выпадения асфальто-смолистых и парафиновых отложений. Эти факторы приводят к тому, что закон гидравлического сопротивления трубопровода в форме Альтшуля необходимо поправить в зависимости от числа Рейнольдса и степени шероховатости стенки.

Решение проблемы ищется путем постановки обратной задачи для определения закона гидравлического сопротивления в форме Альтшуля. Математическая постановка задачи включает систему уравнения движения и теплообмена и модифицированные формулы Альтшуля с неизвестными коэффициентами. Система уравнения движения и теплообмена решается численным методом, разностные аналоги уравнения движения – методом характеристик, теплообмена – методом бегущего счета.

В расчетах были определены распределения давления, скорости и температуры, и найдены неизвестные коэффициенты модифицированной формулы Альтшуля путем сравнения расчетных и фактических данных SCADA системы. В результате сравнения расчетных и опытных данных построена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса и шероховатости стенки трубопровода. Согласие расчетных данных с фактическими показателями SCADA системы позволяет указать о достоверности результатов метода обратной задачи для определения коэффициента гидравлического сопротивления магистрального нефтепровода.

Ключевые слова: Магистральные нефтепроводы, обратная задача, высоковязкая и высокозастывающая нефть, коэффициент гидравлического сопротивления, формула Альтшуля.

Мұнай құбырындағы гидравликалық кедергіні анықтайтын бір кері есеп туралы

Босинов Д.Ж., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Алматы қ., Қазақстан, E-mail: bossinov.daniyar@gamil.com
Жапбасбаев У.К., Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы қ., Қазақстан, E-mail: uzak.zh@mail.ru

Магистральдық мұнай құбырының гидравликалық кедергі заңын анықтау нәтижелері келтірілген. «Ыстық» айдау әдісі тұтқырлығы жоғары және тез қататын (парафинді) мұнайды тасымалдаудың сенімділерінің бірі болып саналады. Парафинді мұнайды «ыстық» айдауда келесі өзгерістер болады: 1) суық топыраққа жылуды берудің арқасында температураның төмендеуі және мұнай тұтқырлығын артуы; 2) асфальты-шайырлы және парафинді шөгінділердің тұнуына байланысты құбыр қабырғасының кедір-бұдырлығының өзгеруі. Бұл факторлар Альтшуля түріндегі құбырдың гидравликалық кедергі заңын Рейнольдс санына және қабырға кедір-бұдырлығының дәрежесіне байланысты түзету қажеттігін көрсетеді.

Мәселені шешу Альтшуля түріндегі гидравликалық қарсылық заңын анықтау үшін кері есептің қойылымы арқылы ізделінеді. Проблеманың математикалық қойылымы қозғалыс және жылу алмасу теңдеулер жүйесінен және белгісіз коэффициенттері бар түрлендірілген Альтшуля формуласын қамтиды. Қозғалыс және жылу алмасу теңдеулер жүйесі сандық әдіспен, қозғалыс теңдеуінің айырымдық аналогтары сипаттамалар әдісімен, жылу алмасу теңдеуінің айырымдық аналогтары жылжымалы шот әдісімен шешіледі.

Есептеулерде қысымның, жылдамдықтың және температураның таралуы анықталды және SCADA жүйесінің есептеу деректері мен нақты деректерін салыстыру арқылы Альтшуля формуласының белгісіз коэффициенттері табылды. Есептік және тәжірибелік деректерді салыстыру нәтижесінде гидравликалық кедергі коэффициентінің Рейнольдс санына және құбыр қабырғасының кедір-бұдырлығына тәуелділігі салынды. SCADA жүйесінің нақты көрсеткіштері мен есептелген мәліметтердің келісімі магистральдық мұнай құбырының гидравликалық кедергі коэффициентін анықтаудың кері есеп әдісінің нәтижелерінің дұрыстығын көрсетуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Магистральдық мұнай құбырлары, кері есеп, тұтқырлығы жоғары және тез қататын мұнай, гидравликалық кедергі коэффициенті, Альтшуля формуласы.

About one inverse problem on determination the hydraulic resistance of the pipeline

Bossinov D.Zh., Al-Farabi Kazakh National University,

Almaty, Kazakhstan, E-mail: bossinov.daniyar@gamil.com,

Zhapbasbaev U.K., K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,

Almaty, Kazakhstan, E-mail: uzak.zh@mail.ru

The results of determining the law of hydraulic resistance of the pipe of the main oil pipeline are provided. The method of «hot» transfer is considered one of the most reliable for transportation of highly viscous and high- congealing (paraffin) oil. In the «hot» transfer of paraffin oil the following occurs: 1) a decrease in temperature due to heat transfer with cold soil and an increase in oil viscosity; 2) the change in the roughness of the pipe wall of the pipeline due to loss of asphalt-resinous and paraffin deposits. These factors lead to the fact that the law of hydraulic resistance of the pipeline in the form of Altshul needs to be corrected depending on the Reynolds number and the degree of wall roughness.

The solution to the problem is sought by formulating an inverse problem to determine the law of hydraulic resistance in the form of Altshul. The mathematical formulation of the problem includes a system of equations of motion and heat transfer and a modified Altshul formula with unknown coefficients. The system of the equation of motion and heat transfer is solved by a numerical method, difference analogs of the equation of motion and heat transfer are calculated by the method of characteristics and by the method of point-to-point computation, respectively.

In the calculations, there pressure, velocity and temperature distributions were determined, and unknown coefficients of the modified Altshul formula were found by comparing the calculated and actual data of the SCADA system. As a result of comparison of the calculated and experimental data, the dependence of the hydraulic resistance coefficient on the Reynolds number and the roughness of the pipeline wall were constructed. The agreement of the calculated data with the actual indicators of the SCADA system allows indicating the reliability of the results of the inverse problem method for determining the hydraulic resistance coefficient of the main oil pipeline.

Key words: main oil pipelines, inverse problem, high-viscosity and high- congealing oil, hydraulic resistance coefficient, Altshul formula.

1 Введение

Способ «горячей» перекачки является надежным для транспортировки высокозастывающей (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, что приводит к росту интенсивности турбулентности и потери напора.

Отсюда следует, что гидравлическое сопротивление трубы при «горячей» перекачке изменяется в ходе эксплуатации и определение этой величины становится сложной задачей.

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

Решение этой проблемы может быть получено методом обратной задачи путем расчета математической модели процесса, а недостающую информацию можно получить из опытных данных [1].

Ниже приводятся результаты определения гидравлического сопротивления трубопровода «горячей» перекачки путем решения обратной задачи.

2 Обзор литературы

Обобщение результатов многочисленных экспериментальных исследований по определению гидравлического сопротивления жидкости в трубах представлено в [2]. Различные формулы зависимости коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса и шероховатости стенки для потери потока нефти в трубопроводах приведены в [3–9]. Однако все эти исследования не учитывают изменения коэффициента гидравлического сопротивления в ходе эксплуатации нефтепровода.

Поэтому определения гидравлического сопротивления трубопровода и его изменения в ходе эксплуатации нефтепроводов с сравнительным анализом расчетных и экспериментальных данных становится актуальной задачей.

3 Материал и методы

В данной работе исследуется одна обратная задача по определению гидравлического сопротивления нефтепровода. Чтобы определить закон гидравлического сопротивления в форме Альтшуля была рассмотрена обратная задача. Решение системы уравнений для скорости и давления находится численным методом характеристик. Для решения уравнения переноса тепла применяется итерационный метод бегущего счета.

3.1 Постановка задачи

Параметры потока нефти (расход, давление, температура) и грунта (температура) измеряются датчиками оптико-волоконной системы SCADA на участке магистрального нефтепровода.

Требуется определить гидравлическое сопротивление трубопровода на основе данных SCADA системы с использованием математической модели перекачки нефти на участке магистрального нефтепровода.

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

1. Нефть является ньютоновской жидкостью, и касательное напряжение трения подчиняется закону Ньютона [10]:

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

где τ_w – касательное напряжение трения, ρ , u – плотность и средняя скорость потока нефти, λ – коэффициент гидравлического сопротивления трубы.

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

3. В случае одномерного движения жидкости по направлению оси трубы пренебрегается поперечная скорость.

В соответствии с принятыми допущениями на основе закона сохранения массы и импульса можно записать систему уравнения движения [10, 11]:

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

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

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.

Связь давления с плотностью находится выражением

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

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

Скорость звука в жидкости можно найти по формуле Жуковского [11]:

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

где ξ – модуль объемной упругости жидкости, δ – толщина стенки трубы, E – модуль упругости материала стенки.

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

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

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

Температура потока нефти в трубопроводе определяется 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 [12, 13]

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

где ρ_{20} – плотность нефтесмеси при 20°C; ζ , a_1 , b_1 – эмпирические постоянные, $\zeta = 0, 000738, \frac{1}{\text{°C}}$.

Система уравнений (4) – (8) рассматривается совместно для расчета давления, скорости и температуры.

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

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

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 трубопровода – из условия доставки объема нефти [14]:

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

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

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

Как показывают эксперименты [2], [7], для коэффициента гидравлического сопротивления трубы λ в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса справедлива формула Альтшуля [9].

Для определения $\lambda(Re, e)$ в «горячей» перекачке нефти путем обратной задачи формула Альтшуля записывается в модифицированной форме:

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

где $Re = uD_1/v(T)$ – число Рейнольдса, $v(T)$ – коэффициент кинематической вязкости, a, b, d – неизвестные эмпирические постоянные.

В классической формуле Альтшуля эмпирические постоянные для шероховатой трубы имеют значения $a = 1$, $b = 0.25$, $d = 0.11$.

3.2 Численный метод решения системы уравнения

Введем равномерную ортогональную расчетную сетку x, t с шагом Δt по времени (Рис. 1). 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 .

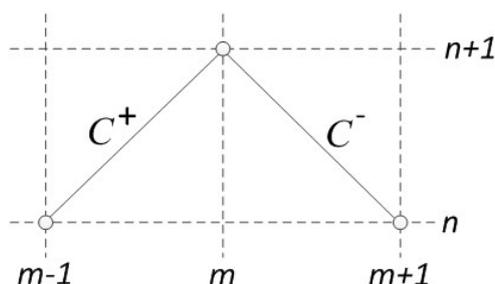


Рисунок 1: Расчетная сетка на характеристиках

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 .

Система уравнения (5), (6) гиперболического типа имеет характеристики, на которых уравнения в частных производных приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям [11], [15].

Уравнения двух семейств характеристик (Рис. 1) имеют вид:

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

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:

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

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

Уравнение (17) решается вдоль характеристики (15), а уравнение (18) – вдоль характеристики (16). Уравнения (15), (16) имеют вид прямых линий, тангенсы угла которых в расчетной сетке (x, t) равен $\pm c$.

Метод характеристик аппроксимирует дифференциальные уравнения (17), (18) разностными уравнениями первого порядка в конечных разностях. Для характеристик (15), (16) (Рис. 1), связывающих точки $(m-1; n)$ и $(m+1; n)$ с точкой $(m; n+1)$ в соответствии с уравнениями (17) и (18) можно записать:

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

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

или обозначая

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

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

Систему разностных уравнений для переменных в координатном узле m и временном слое $n+1$ можно записать

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

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

Величины X_l и X_r удобны тем, что зависят только от показателей предыдущего временного слоя n , т.е. содержат только известные величины и могут быть непосредственно вычислены и подставлены в (23), (24).

Решая систему уравнений (23), (24), найдем:

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

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

С помощью формул (25), (26) рассчитываются все переменные во внутренних узлах трубы, т.е. эти формулы используются для $m = 2, 3, \dots, M-1$.

Переменные в граничных узлах рассчитываются с использованием условий (10), (11).

Обозначая $K = \frac{4k}{\rho c_p D_1}$, уравнение (7) можно привести к виду:

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

Разностный аналог (27) имеет вид [16]:

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

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

В итерационном процессе формулы (25), (26) и (29) определяют расчетные данные скорости, давления и температуры, причем в качестве начального приближения $\lambda(Re, e)$ принимается классическая формула Альтшуля с коэффициентами $a=1$, $b=0.25$, $d=0.11$.

Фактические значения скорости, давления, температуры потока нефти в трубопроводе находятся по опытным данным SCADA системы.

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

4 Результаты и обсуждение

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda(Re, e)$ магистрального нефтепровода путем решения обратной задачи (5)-(8) с краевыми условиями (9)-(11). Коэффициенты закона гидравлического сопротивления в форме Альтшуля (13) были найдены путем сравнения расчетов с фактическими (опытными) данными SCADA системы и имеют следующие значения $a = 0.084$, $b = 0.2535$, $d = 0.049$.

Результаты определения коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda(Re, e)$ путем решения обратной задачи были апробированы путем сравнения расчетных и фактических данных распределения гидравлического уклона, давления и температуры в нефтепроводах Джумагалиева – Атасу (Рис. 3) и Джумагалиева – Чулак Курган (Рис. 4).

На рисунках 3, 4 расчетные линии гидравлического уклона (верхний график), давления (средний график) получены путем использования закона сопротивления Альтшуля с коэффициентами $a = 0.084$, $b = 0.2535$, $d = 0.049$, а фактические данные давления построены по показателям SCADA системы.

Сравнение расчетных и фактических данных распределения гидравлического уклона, давления и температуры показывает согласие их по длине нефтепроводов Джумагалиева – Атасу (Рис. 3) и Джумагалиева – Чулак Курган (Рис. 4)

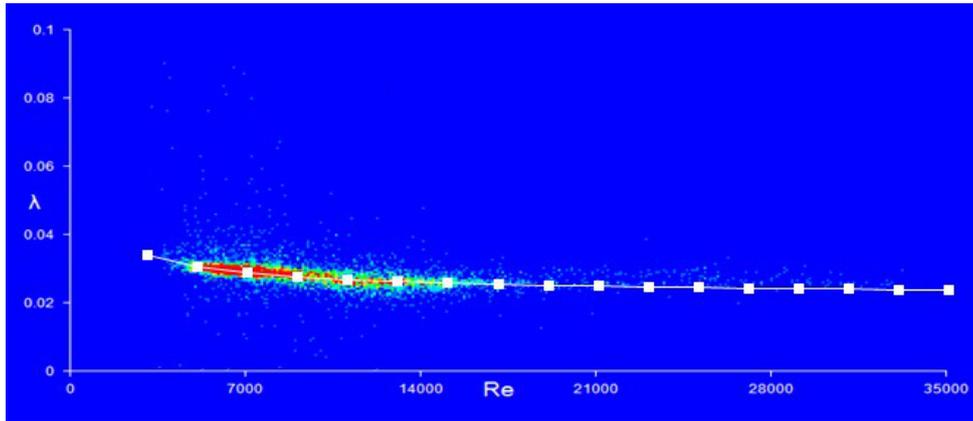


Рисунок 2: Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления в форме Альтшуля от числа Рейнольдса и степени шероховатости стенки



Рисунок 3: Сравнение расчетных (линии) и фактических (точки) данных в нефтепроводе Джумагалиева – Атасу

Сравнение расчетных кривых давления с фактическими данными системы SCADA показывает необходимость использования метода обратной задачи для определения закона гидравлического сопротивления Альтшуля при «горячей» перекачке нефти по магистральным нефтепроводам.

5 Заключение

Гидравлическое сопротивление трубопровода изменяется при «горячей» перекачке высокостаывающей и высоковязкой нефти. Зависимость закона сопротивления трубопровода от числа Рейнольдса и степени шероховатости стенки трубы определяется путем решения обратной задачи.

Постановка обратной задачи включает систему уравнения движения, теплообмена

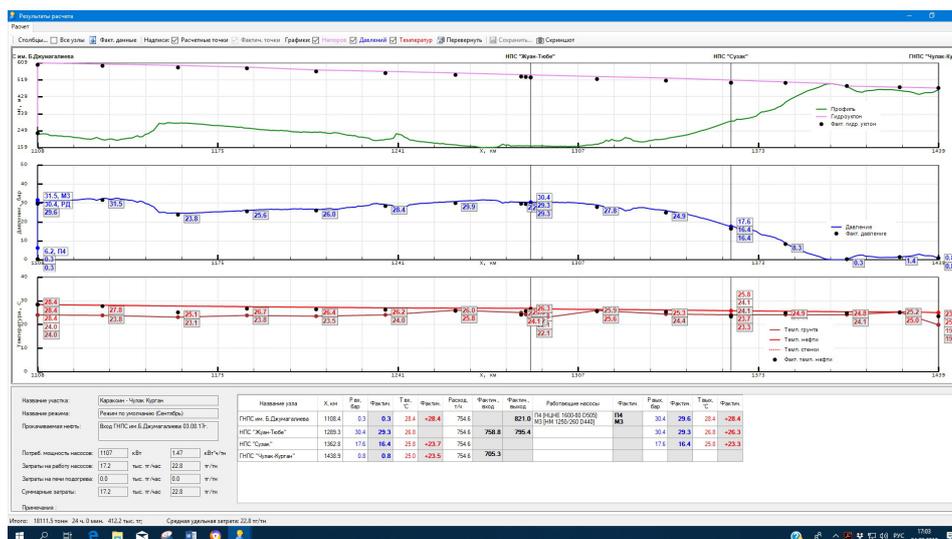


Рисунок 4: Сравнение расчетных (линии) и фактических (точки) данных в нефтепроводе Джумагалиева – Чулак Курган

и гидравлического сопротивления в форме Альтшуля (13) с неизвестными коэффициентами. Система уравнения гиперболического типа для скорости и давления решается численным методом характеристик, а уравнения переноса тепла – итерационным методом бегущего счета.

В численных расчетах были определены расчетные данные давления, температуры и скорости. Сравнение расчетных данных с фактическими показателями SCADA системы было использовано для определения коэффициентов закона гидравлического сопротивления Альтшуля. Согласие расчетных и фактических данных давления перекачки нефти в трубопроводах Павлодар – Атасу, Атасу – Алашанькоу показывает правильность использования метода обратной задачи для уточнения закона сопротивления Альтшуля.

6 Благодарность

Данная работа выполняется за счет средств грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан научно-исследовательской работы на тему «Управление энергосберегающими режимами транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам с использованием SCADA системы» (№ AP05130503) на 2018-2020 годы.

Список литературы

- [1] Кабанцкин С.И. Обратные и некорректные задачи. – Новосибирск: Сибирское научное издание, 2009. – 458 с.
- [2] Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
- [3] Исаев И.А. Экспериментальное определение коэффициентов гидравлических сопротивлений в прямых нефтепроводных трубах и фитингах // В кн.: Вопросы транспорта, хранения нефти и машиностроения. – М.: Гостехиздат, 1956. – С. 112-134.

- [4] *Абдурашитов С.А., Тупиченков А.А.* Трубопроводы для сжиженных углеводородных газов. – М.: Недра, 1965. – 215 с.
- [5] *Кашчев А.А.* Перекачка нефтепродуктов при больших числах Рейнольдса // Нефтяное хозяйство. – 1931. – № 8-9. – С. 112-168.
- [6] *Абрамзон Л.С.* Экспериментальное исследование теплоотдачи и гидравлики на "горячем" промышленном нефтепроводе. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов / Л.С. Абрамзон, М. А. Галлямов, Е.П. Михновский. – М.: ВНИИОЭНГ, 1968. – № 3. – С. 125-130.
- [7] *Морозова Н.В., Коршаков А.А.* О границах зон трения при гидравлическом расчете нефти и нефтепродуктопроводов // Нефтегазовое дело. – 2007. – Т. 5, № 1. – С. 120-125.
- [8] *Быков К.В., Николаев А.К., Маларев В.И.* Определение коэффициента гидравлического сопротивления магистрального нефтепровода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 265-268.
- [9] *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
- [10] *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
- [11] *Чарный И.А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
- [12] *Тугунов П.И. и др.* Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газонефтепроводов. – М.: ДизайнПолиграфСервис, 2002. – 658 с.
- [13] *Жапбасбаев У.К., Бежибаев 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.
- [14] *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.
- [15] *Березин И.С., Жидков Н.П.* Методы вычислений. – М.: Наука, 1966. – Т. 2. – 620 с.
- [16] *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

References

- [1] Kabanikhin S.I., *Obratnye i nekorrektnye zadachi* [Inverse and incorrect problems] (Novosibirsk: Sibirskoe nauchnoe izdanie, 2009), 458.
- [2] Idel'chik I.E., *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance] (M.: Mashinostroenie, 1992), 672.
- [3] Isaev I.A., "Eksperimental'noe opredelenie koeffitsientov gidravlicheskih soprotivlenii v pryamykh nefteprovodnykh trubakh i fittingakh [Experimental determination of coefficients of hydraulic resistance in the direct oil pipeline pipes and fittings]", *M.: Gostoptekhizdat. V kn.: Voprosy transporta, khraneniya nefi i mashinostroeniya* 17 (1956): 112-134.
- [4] Abdurashitov S.A., Tupichenkov A.A., *Truboprovody dlya szhizhennykh uglevodorodnykh gazov* [Pipelines for liquefied hydrocarbon gases] (M.: Nedra, 1965), 215.
- [5] Kashcheev A.A., "Perekachka nefteproduktov pri bol'shikh chislakh Reinol'dsa [Pumping of petroleum products at high Reynolds numbers]", *Neftyanoe khozyaistvo* No 8-9 (1931): 112-168.
- [6] Abramzon L.S., "Eksperimental'noe issledovanie teplootdachi i gidravliki na "goryachem" promyshlennom nefteprovoде [Experimental study of heat transfer and hydraulics on the "hot" industrial oil pipeline]", *M.: VNIIOENG. Transport i khraneniye nefi i nefteproduktov* No 3 (1968): 125-130.
- [7] Morozova N.V., Korshak A.A., "O granitsakh zon treniia pri gidravlicheskom raschete nefi i nefteproduktoprovodov [About borders of zones of friction at hydraulic calculation of oil and oil pipelines]", *Neftgazovoe delo* vol. 5, no 1 (2007): 120-125.
- [8] Bykov K.V., Nikolaev A.K., Malarev V.I., "Opredelenie koeffitsienta gidravlicheskogo soprotivleniia magistralnogo nefteprovoda [Determination of hydraulic resistance coefficient of the oil trunk pipeline]", *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten* no 5 (2013): 265-268.

-
- [9] Altshul A.D., *Gidravlicheskie soprotivleniia* [Hydraulic resistance] (M.: Nedra, 1982), 224.
- [10] Shlikhting G., *Teoriia pogranichnogo sloia* [Boundary layer theory] (M.: Nauka, 1974), 712.
- [11] Charnyi I.A., *Neustanovivsheesia dvizhenie realnoi zhidkosti v trubakh* [Unsteady motion of real fluid in pipes] (M.: Nedra, 1975), 296.
- [12] Tugunov P.I. i dr., *Tipovye raschety pri proektirovanii i ekspluatatsii gazonefteprovodov* [Typical calculations in the design and operation of oil and gas pipelines] (M.: DizainPoligrafServis, 2002), 658.
- [13] Zhapbasbaev U.K., Bekibaev T.T., Ramazanova G.I., Makhmotov E.S., Rziev S.A., "Raschet optimalnoi temperatury perekachki dlia transportirovki nefti [Calculation of optimal temperature of pumping for oil transportation]", *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov* no 4, vol. 20 (2015): 61-66.
- [14] Voevodin A.F., Nikiforovskaia V.S., "Chislennyi metod opredeleniia mesta utechki zhidkosti i gaza v truboprovode [Numerical method of definition of the place of leakage of liquid and gas in the pipeline]", *Sibirskii zhurnal industrialnoi matematiki* vol. 12, no 1 (2009): 25-30.
- [15] Berezin I.S., Zhidkov N.P., *Metody vychislenii* [Methods of calculation] (M.: Nauka, 1966), 620.
- [16] Samarskii A.A., *Teoriia raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes] (M.: Nauka, 1977), 656.