DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-3-50-62

УДК 622.692.4:532.529.5

Р.Г. Шагиев (Государственное автономное научное учреждение
«Институт стратегических исследований Республики Башкортостан»,
г. Уфа, Российская Федерация)

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ НЕФТЕПРОВОДАХ С ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫМИ ПРИСАДКАМИ

Rustam G. Shagiev (State Autonomous Scientific Department
Institute of Strategic Researches of Republic of Bashkortostan,
Ufa, Russian Federation)

HYDRAULIC RESISTANCE AND HEAT TRANSFER IN NONISOTHERMAL OIL PIPELINES WITH DRAG REDUCING ADDITIVES

Введение

Прогнозирование градиента давления и оценка гидравлического сопротивления неизоотермических турбулентных течений имеют большое промышленное значение. В литературе практически не имеется исследований по расчету снижения гидравлического сопротивления с помощью полимерных добавок для турбулентных течений жидкостей с вязкостью, зависящей от температуры.

Цели и задачи

Расчет гидравлического сопротивления и теплопередачи турбулентных течений в неизоотермических нефтепроводах с использованием полимерных добавок.

Методы

Математическое моделирование и численные расчеты определения коэффициента гидравлического сопротивления в неизоотермических нефтепроводах с вязкостью, зависящей от температуры при использовании противотурбулентных присадок.

Background

Forecasting a pressure gradient and estimation hydraulic resistance of non-isothermal turbulent flows are of great industrial importance. There are virtually no studies in the literature to calculate hydraulic resistance reduction with polymer additives for turbulent fluid flows with temperature-dependent viscosity

Aims and Objectives

Calculation of hydraulic resistance and heat transfer of turbulent flows in non-isothermal oil pipelines using polymer additives.

Methods

Mathematical modeling and numerical calculations of the determination of hydraulic resistance in non-isothermal oil pipelines with temperature depending viscosity, when using drag reducing additives.

Результаты

Приведен краткий обзор работ по оценке снижения гидравлического сопротивления полимерными добавками в неизо-термических трубопроводах. Разработана математическая модель неизо-термического нефтепровода с противотурбулентными присадками, включающая теплообмен с окружающей средой с учетом переменной вязкости в радиальном и аксиальном направлениях.

Results

A brief review of the works on the evaluation of hydraulic resistance reduction by polymer additives in non-isothermal pipelines is given. A mathematical model of a non-isothermal oil pipeline with drag reducing additives has been developed, including heat exchange with the environment taking into account the variability of viscosity in the radial and axial directions.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление; теплообмен; неизо-термический нефтепровод; вязкость, зависящая от температуры; противотурбулентные присадки; математическая модель

Key words: hydraulic resistance; heat transfer; nonisothermal pipeline; temperature dependent viscosity; drag reducing agents; mathematical model

---

На практике часто встречаются случаи использования противотурбулентных присадок (ПТП) в неизо-термических нефтепроводах с турбулентным режимом течения.

Существует два предельных случая, для которых учет теплопередачи является важным при перекачке нефти с ПТП. Первый случай - это перекачка нагретых тяжелых вязких нефтей при низких температурах окружающей среды. Второй случай - это нагрев маловязкой нефти из-за тепла трения при больших скоростях перекачки и высоких температурах окружающей среды.

В настоящей работе рассмотрены вопросы расчетов параметров горячей перекачки с применением ПТП.

В настоящее время не существуют адекватных методов расчета параметров подобных нефтепроводов с применением ПТП, как для ньютоновских, с вязкостью, зависящей от температуры, так и для time independent неньютоновских жидкостей, с физико-химическими параметрами, зависящими от температуры.

Применительно к нефтепроводам без применения ПТП этот вопрос достаточно подробно изложен в монографиях Маро-

In practice, there are often cases of the use of drag reducing additives (DRA) in non-isothermal oil pipelines with turbulent flow.

There are two limit cases for which the accounting of heat transfer is important when pumping oil with DRA. The first case is pumping heated heavy viscous oils at low ambient temperatures. The second case is heating oil due to friction heat at high pumping speeds and high ambient temperatures.

This paper discusses the calculation of hot pumping parameters with the use of DRA.

Currently, there are no adequate methods of calculating the parameters of such oil pipelines with the use of DRA, both for Newtonian, with temperature dependent viscosity, and for the time independent non-Newtonian liquids, with temperature dependent physical and chemical parameters.

The case of oil pipelines without the use of DRA is described in sufficient detail in the monographs of Maron V.I. [1] and Lurie M.V. [2],

на В.И. [1] и Лурье М.В. [2], а также в многочисленных статьях, например Гаррис Н.А. с соавторами [3].

В работах [1] и [2] теплопередача определяется по внешнему коэффициенту теплопередачи, что мотивируется малым отличием температуры внутренней поверхности трубы от температуры потока. И это обстоятельство обходит стороной переменность вязкости в радиальном направлении. Что касается работ типа [3], то в них переменность вязкости в радиальном направлении учитывается поправкой согласно работе Петухова Б.С. [4]. Среди последних работ по расчету коэффициента трения и числа Нуссельта при турбулентных течениях с переменной вязкостью без применения ПТП необходимо отметить работу Zhao N. с соавторами [5].

Перспективы применения противотурбулентных присадок для снижения энергозатрат при горячей перекачке нефти были опубликованы в работе [6]. Однако в этой статье как расчетная модель, так и результаты термогидродинамических расчетов не были представлены в полном объеме.

В работе Пилипенко В.Н. [7] предлагается схема расчета коэффициентов трения и теплопередачи для потока жидкости с полимерной добавкой для уменьшения трения, основанная на представлении длины пути перемешивания. Анализируется влияние числа Прандтля, числа Рейнольдса и величины уменьшения трения на закономерности передачи тепла. Получены формулы для определения коэффициентов теплообмена. Результаты расчетов по предлагаемой схеме находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными результатами. Недостатком предложенного подхода является неучет вариации вязкости в радиальном направлении.

Математическая модель неизо термического трубопровода с ПТП

Уравнение потерь давления на трение:

as well as in numerous articles, such as Gar ris N.A. et al. [3].

In the works [1] and [2], heat transfer is determined by the external heat transfer factor, which is motivated by the small difference in the temperature of the inner surface of the pipe from the flow temperature. And this fact does not take into account the variability of viscosity in the radial direction. As for works like [3], they take into account the variability of viscosity in the radial direction, according to the work of Petukhov B.S. [4]. Among the recent work on calculating the friction factor and the number of Nusselt's number in turbulent flows with variable viscosity without the use of DRA, it is necessary to note the work of Zhao N. et al. [5].

Prospects for the use of drag reducing additives to reduce energy costs during hot oil pumping have been published in the paper [6]. However, in this article, both the calculation model and the results of thermohydrodynamic calculations were not presented in full.

In the work of Pilipenko V.N. [7], the diagram of the calculation of friction and heat transfer ratios for the flow of liquid with a polymer additive to reduce friction based on the representation of the mixing path length is proposed. The effect of Prandtl's number, Reynolds' number and the friction reduction on heat transfer patterns is analyzed. Formulas to determine heat exchange ratios have been obtained. The results of the calculations under the proposed scheme are in satisfactory agreement with the experimental results. The downside of the proposed approach is the unaccounted for variations of viscosity in the radial direction.

Mathematical model of non-isothermic pipeline with DRA

Equation of pressure loss on friction:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{2f_{dra}\rho v^2}{d_{in}}, \quad (1)$$

где f_{dra} - коэффициент трения Фаннинга;

d_{in} - внутренний диаметр трубы, м;

v - скорость потока, м/с;

ρ - плотность нефти, кг/м³.

Уравнение энергии в температурной форме:

where f_{dra} - Fanning's friction factor;

d_{in} - inner diameter of the pipe, m;

v - flow velocity, m/s;

ρ - oil density, kg/m³.

Energy equation in temperature form:

$$C_p m \frac{dT_b}{dx} = \alpha_{dra\ var} (T_b - T_w) + \frac{2f_{dra}\rho v^3}{d_{in}} + \beta T_b \cdot \frac{m}{\rho} \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

где C_p - теплоемкость нефти, Дж/кг град;

m - массовый расход нефти, кг/с;

T_b - средняя по сечению температура потока нефти, К;

T_w - температура внутренней поверхности трубы, К;

$\alpha_{dra\ var} = \frac{\lambda_{oil}}{d_{in}} \text{Nu}_{dra\ var}$ - коэффициент

теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к потоку нефти, Вт/(м²·К);

$\text{Nu}_{dra\ var}$ - число Нуссельта при переменной вязкости;

λ_{oil} - коэффициент теплопроводности нефти, Вт/(м·К);

$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ - коэффициент рас-

ширения нефти, К⁻¹.

Из равенства тепловых потоков справедливо соотношение:

where C_p - crude oil specific heat capacity, J/kg K;

m - oil mass flow, kg/s;

T_b - crude oil bulk temperature, K;

T_w - inner wall temperature, K;

$\alpha_{dra\ var} = \frac{\lambda_{oil}}{d_{in}} \text{Nu}_{dra\ var}$ - heat trans-

fer factor from the inner surface of the pipe to the bulk flow of oil, W/(m²·K);

$\text{Nu}_{dra\ var}$ - Nusselt's number with variable viscosity;

λ_{oil} - oil thermal conductivity, W/(m·K);

$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ - oil thermal expansion

coefficient, K⁻¹.

From the equality of heat flows follows the equation:

$$\alpha_{dra\ var} (T_b - T_w) = \alpha_{amb} (T_w - T_{amb}), \quad (3)$$

где

where

$$\alpha_{amb} = \frac{1}{d_{in}} \left\{ \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_{ext}}{d_{in}} + \frac{1}{\alpha_{ext} d_{ext}} \right\}^{-1}$$

коэффициент теплопередачи от окружающей среды к внутренней поверхности трубы, Вт/(м²·К);

heat transfer factor from the soil to the inner surface of the pipe, W/(m²·K);

$$\alpha_{ext} = \frac{\lambda_{gr}}{d_{ext}} \left(\ln \left(\frac{h}{d_{ext}} + \sqrt{\left(\frac{h}{d_{ext}} \right)^2 - 1} \right) \right)^{-1}$$

коэффициент теплоотдачи от грунта к внешней поверхности трубы, Вт/(м²·К);

heat transfer factor from the soil to the outer surface of the pipe, W/(m²·K);

h - глубина заложения трубопровода, м;

h - pipeline buried depth, m;

λ_m, λ_{gr} - коэффициенты теплопроводности металла и грунта, Вт/(м·К);

λ_m, λ_{gr} - metal and soil thermal conductivity, W/(m·K);

d_{ext} - внешний диаметр трубы, м.

d_{ext} - external pipe diameter, m.

При использовании полимерных добавок с постоянной в радиальном направлении вязкостью в гладких трубах коэффициент трения Фаннинга удовлетворяет уравнению [8]:

When using polymer additives with constant in radial direction viscosity in smooth tubes, Fanning's friction factor satisfies the equation [8]:

$$f_{dra\ con}^{-1/2} = 4,0 \cdot \log(\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\ con}^{1/2}) + \log \left(\frac{(\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\ con}^{1/2})}{(\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\ con}^{1/2})^*} \right)^{\Delta} - 0,4, \quad (4)$$

где $\text{Re}(T_b) = \frac{vd_{in}}{\nu(T_b)}$ - число Рейнольдса;

where $\text{Re}(T_b) = \frac{vd_{in}}{\nu(T_b)}$ - Reynolds number;

$\nu(T)$ - кинематическая вязкость, м²/с;

$\nu(T)$ - kinematic viscosity, m²/s;

$$(\text{Re} \cdot f^{1/2})^* = \frac{\sqrt{2} \cdot \nu_{\tau}^* \cdot d}{\nu(T)}$$

$$(\text{Re} \cdot f^{1/2})^* = \frac{\sqrt{2} \cdot \nu_{\tau}^* \cdot d}{\nu(T)}$$

$$\Delta = \frac{d(f_{dra}^{-1/2})}{d(\log(\text{Re} \cdot f_{dra}^{1/2}))} - 4,0 = \varpi N^{3/2} \left(\frac{c}{M} \right)^{1/2};$$

$$\Delta = \frac{d(f_{dra}^{-1/2})}{d(\log(\text{Re} \cdot f_{dra}^{1/2}))} - 4,0 = \varpi N^{3/2} \left(\frac{c}{M} \right)^{1/2};$$

N - количество звеньев макромолекулы;

N - number of links of macromolecules;

M - молекулярная масса полимера, кг/кмоль;

$\varpi = 70 \cdot 10^6$ - параметр;

C - концентрация полимера, ppm (млн⁻¹);

$$v_{\tau}^* = \sqrt{\frac{\tau_w^*}{\rho}} - \text{динамическая скорость}$$

начала снижения гидравлического сопротивления;

τ_w^* - критическое касательное напряжение.

В работе Пилипенко В.Н. [7] число Нуссельта для течения с постоянной в радиальном направлении вязкостью при использовании полимерной добавки определяется следующим образом:

$$\text{Nu}_{dra\,con} = \frac{f_{dra\,con} \text{Re} \text{Pr}}{2} \times \left\{ 1 + \sqrt{\frac{f_{dra\,con}}{2}} \left[0,74(B + 6,8)(\text{Pr}^{3/4} - 1) + \frac{\ln \text{Pr}}{\kappa} \right] \right\}^{-1}, \quad (5)$$

$$\text{где } B = 5,5 + \left(\frac{(\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\,con}^{1/2})}{\left((\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\,con}^{1/2})^* \right)} \right)^{\Delta};$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\chi_{oil}} = \frac{C_p \rho \nu}{\lambda_{oil}} - \text{число Пранд-}$$

тля;

$$\kappa = 0,4;$$

$$\chi_{oil} = \frac{\lambda_{oil}}{\rho C_p} - \text{коэффициент температу-}$$

ропроводности нефти, м²/с.

В работе [5] были получены следующие уравнения для коэффициента трения и числа Нуссельта при турбулентном течении без полимерных добавок:

M - polymer molecular weight, kg/kmol;

$\varpi = 70 \cdot 10^6$ - параметр;

C - polymer concentration, ppm;

$$v_{\tau}^* = \sqrt{\frac{\tau_w^*}{\rho}} - \text{friction velocity of onset of}$$

drag reduction, m/s;

τ_w^* - wall shear stress of onset of drag reduction, Pa.

In the work of Pilipenko V.N. [7], the of Nusselt's number for flow with constant radial viscosity when using a polymer additive is defined as follows:

$$\text{where } B = 5,5 + \left(\frac{(\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\,con}^{1/2})}{\left((\text{Re}(T_b) \cdot f_{dra\,con}^{1/2})^* \right)} \right)^{\Delta};$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\chi_{oil}} = \frac{C_p \rho \nu}{\lambda_{oil}} - \text{Prandtl's num-}$$

ber;

$$\kappa = 0,4;$$

$$\chi_{oil} = \frac{\lambda_{oil}}{\rho C_p} - \text{oil thermal diffusivity,}$$

м²/с.

The following equations for the friction factor and the Nusselt's number in the turbulent flows without polymer additives were obtained [5]:

$$\sqrt{1/f_{0con}} = 2,0 \log \left(\text{Re} \sqrt{f_{0con}} \right) - 0,8, \quad (6)$$

$$\text{Nu}_{0con} = \frac{\text{Re Pr} \sqrt{f_{0con}/8}}{0,88 + 13,39 \left(\text{Pr}^{2/3} - 0,78 \right) \sqrt{f_{0con}/8}}, \quad (7)$$

$$f_{0var} = \frac{f_{0con}}{\left(1 - \frac{\sqrt{f_{0con}/8}}{\kappa} \ln \frac{v_w}{v_b} \right)^2}, \quad (8)$$

$$\text{Nu}_{0var} = \frac{\text{Nu}_{0con}}{\left\{ 1 - \frac{\text{Nu}_{0con}}{\sqrt{f_{0con}/8} \text{Re Pr}} \left[12 \left(1 - \left(\frac{v_w}{v_b} \right) \right) + \frac{\text{Pr}}{\kappa} \ln \frac{v_w}{v_b} \right] \right\}}. \quad (9)$$

Применительно к течению с переменной в радиальном направлении вязкостью при наличии полимерных добавок, используя соотношения (4) - (5) и (8) - (9), получим:

In the case of the variable in radial direction viscosity with polymer additives, using equations (4) - (5) and (8) - (9), we obtain:

$$f_{dra var} = \frac{f_{dra con}}{\left(1 - \frac{\sqrt{f_{dra con}/8}}{\kappa} \ln \frac{v_w}{v_b} \right)^2}, \quad (10)$$

$$\text{Nu}_{dra var} = \frac{\text{Nu}_{dra con}}{\left\{ 1 - \frac{\text{Nu}_{dra con}}{\sqrt{f_{dra con}/8} \text{Re Pr}} \left[12 \left(1 - \left(\frac{v_w}{v_b} \right) \right) + \frac{\text{Pr}}{\kappa} \ln \frac{v_w}{v_b} \right] \right\}}. \quad (11)$$

В работе Sher I., Hestroni G. [9] касательное напряжение начала снижения гидравлического сопротивления определено как функция концентрации полимерной добавки и температуры:

In the work of Sher I., Hestroni G. [9] wall shear stress of onset of drag reduction is defined as the function of the polymer concentration and temperature:

$$\tau_w^* \approx 0,413 y_v^+ k' \left(\frac{15}{2^{18} \pi^{13}} \right)^{1/8} (k_B T)^{3/8} \rho^{1/2} \nu^{5/4} \left(\frac{M}{c N_A} \right)^{1/8} R_G^{-11/4}, \quad (12)$$

где $y_v^+ = 11,6$ - безразмерная константа;

$k' = k / 5$ - коэффициент пропорциональности ($k = 0,4$);

$k_B = 1,380 \cdot 10^{-23}$ - константа Больцмана, Дж/К;

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро, моль⁻¹;

$R_G = N^{3/5} a$ - радиус гирации макромолекулы (радиус Флори);
 a - длина звена макромолекулы.

where $y_v^+ = 11,6$ - nondimension constant;

$k' = k / 5$ - proportionality factor ($k = 0,4$);

$k_B = 1,380 \cdot 10^{-23}$ - Boltzman's constant, J/K;

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ - Avogadro's number, mol⁻¹;

$R_G = N^{3/5} a$ - radius of gyration (Flory radius), m;
 a - monomer size, m.

Уравнения переноса растворенного полимера с молекулярной массой M_i с учетом растворения суспензии полимера и деградации растворенных макромолекул без учета конвективной диффузии имеют следующий вид:

The transport equations of a dissolved polymer with a molecular mass M_i taking into account the dissolution of the polymer suspension and the degradation of dissolved macromolecules without taking into account convective diffusion are as follows:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\partial c_i}{\partial t} + v \frac{\partial c_i}{\partial x} = -\frac{dc_{is}}{dt} + k_{2i} c_{2i} - k_{i/2} c_i, \quad (13)$$

$$k_{i/2} = \begin{cases} -\alpha \left(\frac{2f_{dra}}{d} \right) v^3 (M_i - M_{scis}), & \text{if } M_i > M_{scis} \\ 0, & \text{if } M_i \leq M_{scis} \end{cases}$$

где M_i - молекулярная масса i -ой фракции полимера в растворе, кг/кмоль;

c_i - концентрация молекул i -ой фракции в жидкой фазе, имеющей молекулярный вес M_i , ppm (млн⁻¹);

c_{is} - концентрация молекул i -ой фракции в твердой фазе, имеющей молекулярный вес M_i , ppm (млн⁻¹);

where M_i - molecular weight of i -th polymer fraction, kg/kmol;

c_i - concentration of i -th polymer fraction in solution, ppm;

c_{is} - concentration of i -th polymer fraction in solid phase, ppm;

$k_{ii/2}$ - скорость обрыва молекул

i -ой фракции полимера, c^{-1} ;

$M_{scis} = M_0 L_{scis} / a$ - критический молекулярный вес обрыва полимерных молекул, кг/кмоль;

M_0 - молекулярный вес мономера, кг/кмоль;

α - параметр, определяемый из эксперимента на одном из режимов;

L_{scis} - критическая длина молекулы полимера, м.

Система уравнений (1) - (3), (4), (13) решается численно с начальными условиями:

$$x = 0; p = p_{ent}; T = T_{ent}; M = M_{ent}.$$

Некоторые результаты

Данные для расчетов

Длина нефтепровода 100000 м;

Внутренний диаметр трубопровода

$$d_{in} = 0,8 \text{ м};$$

Внешний диаметр трубопровода

$$d_{ex} = 0,81 \text{ м};$$

Производительность 704 кг/с
(скорость перекачки 1,61 м/с);

Входная температура 323 К;

Входное давление 4,0 МПа

Температура окружающей среды 273, 283, 293 К;

Плотность нефти 870 кг/м³;

Теплоемкость нефти 2000 Дж/кг·К;

Теплопроводность нефти 0,2 Вт/(м·К);

Теплопроводность металла 60,0 Вт/м·К;

Теплопроводность грунта 2,0 Вт/м·К;

Зависимость кинематической вязкости нефти от температуры

$$\nu(T) = 5 \cdot 10^{-6} \exp(-0,0693 \cdot (T - 323)) \text{ м}^2/\text{с};$$

Молекулярный вес присадки $8,6 \cdot 10^6$ кг/кмоль;

$k_{ii/2}$ - the rate of the scission of mole-

cules i -th polymer fraction, s^{-1} ;

$M_{scis} = M_0 L_{scis} / a$ - critical molecular weight of polymer molecules, kg/kmol;

M_0 - monomer molecular weight, kg/kmol;

α - fitting constant;

L_{scis} - critical length of polymer molecules, m.

The system of equations (1) - (3), (4), (13) is calculated with initial conditions:

$$x = 0; p = p_{ent}; T = T_{ent}; M = M_{ent}.$$

Some results

Parameters for calculation

Pipeline length 100000 m;

Pipeline internal diameter

$$d_{in} = 0,8 \text{ м};$$

Pipeline external diameter

$$d_{ex} = 0,81 \text{ м};$$

Pipeline throughput 704 kg/s
(velocity 1,61 m/s);

Entrance temperature 323 K;

Entrance pressure 4,0 МПа

Ambient temperature 273, 283, 293 K;

Oil density 870 кг/м³;

Crude oil specific heat capacity 2000 J/kg·K;

Oil thermal conductivity 0,2 W/(m·K);

Metal thermal conductivity 60,0 W/m·K;

Soil thermal conductivity 2,0 W/m·K;

The dependence of oil kinematic viscosity on temperature

$$\nu(T) = 5 \cdot 10^{-6} \exp(-0,0693 \cdot (T - 323)) \text{ м}^2/\text{с};$$

Molecular weight of additive

$$8,6 \cdot 10^6 \text{ kg/kmol};$$

Длина звена макромолекулы
 $4,5 \cdot 10^{-9}$ м.

The length of the macromolecule link
 $4,5 \cdot 10^{-9}$ m.

На рисунке 1 приведена зависимость интегральной гидравлической эффективности

Figure 1 shows the dependence of integral hydraulic efficiency of DRA

ПТП $\Psi(c, x) = \frac{1}{x} \int_0^x \psi(c, \xi) d\xi$ на

$\Psi(c, x) = \frac{1}{x} \int_0^x \psi(c, \xi) d\xi$ on pipeline de-

нефтепроводе в зависимости от концентрации ПТП и температуры окружающей среды.

pending of the concentration of DRA and environment temperature.

Здесь $\psi(c, \xi) = \left[\frac{f(0, \xi) - f_{dra}(c, \xi)}{f(0, \xi)} \right]$ - локальная гидравлическая эффективность ПТП.

Here $\psi(c, \xi) = \left[\frac{f(0, \xi) - f_{dra}(c, \xi)}{f(0, \xi)} \right]$ is local hydraulic efficiency of DRA.

Рисунок 1. Расчетные значения интегральной гидравлической эффективности ПТП на неизотермическом трубопроводе в зависимости от концентрации ПТП при различных температурах окружающего грунта и начальной температуре нефти 323 K

Figure 1. Estimated values of integral hydraulic efficiency of DRA on a non-isothermic pipeline, depending on the concentration of DRA at different ambient ground temperatures and initial oil temperature of 323 K

Настоящая работа посвящена термогидравлическим аспектам неизотермических нефтепроводов с противотурбулентными присадками. На основе расчетов по разработанной математической модели установлено, что компенсирующая дозировка ПТП снижения входной температуры нефти без ПТП на 10 К, т.е. с 323 К до 313 К при равенстве перепадов давления и температуре окружающей среды 273 К составляет 9 ppm.

Для обоснованных экономических расчетов необходимо использование ценовых показателей ПТП и затрат на топливо или электричество, а также КПД нагревательных установок.

Другим важным фактором является то обстоятельство, что настоящая модель разработана для ньютоновских нефтей, в то время как тяжелые нефти, как правило, обладают time independent неньютоновскими свойствами, что требует учета в разрабатываемой модели.

Выводы

1. Разработана математическая модель расчета неизотермического нефтепровода, перекачивающего ньютоновскую нефть с вязкостью, зависящей от температуры при использовании противотурбулентных присадок.

2. Модель основана на решении уравнений количества движения, энергии, кинетики деградации макромолекул полимеров.

3. Приведены результаты расчетов интегральной гидравлической эффективности противотурбулентной присадки на участке нефтепровода в зависимости от ее концентрации и температуры окружающей среды.

4. Противотурбулентные присадки могут быть действенным средством для обеспечения производительности неизотермических нефтепроводов с ограничениями по давлению при достижении максимально допустимой температуры на входе.

5. Использование противотурбулентных присадок как альтернатива нагреву нефти требует оценки в каждом конкретном случае.

This work is devoted to the thermohydraulic aspects of non-isothermal oil pipelines with drag reducing additives. Based on calculations for the developed mathematical model, it was found that the compensating dosage of DRA reduction in the input temperature of oil without DRA by 10 K, i.e. from 323 K to 313 K with equal pressure changes and ambient temperature of 273 K is 9 ppm.

For justified economic calculations, the use of the price indicators of the DRA and the cost of fuel or electricity, as well as the efficiency of heating stations, is necessary.

Another important factor is that this model is designed for Newtonian oils, while heavy oils tend to have time independent non-Newtonian properties, which requires accounting in the model being developed.

Conclusions

1. A mathematical model for calculating the non-isothermic oil pipeline pumping Newtonian oil with viscosity depending on temperature when using drag reducing additives has been developed.

2. The model is based on solving equations of motion, energy, kinetics of degradation of macromolecules of polymers.

3. The results of calculations of integral hydraulic efficiency of drag reducing additive on the section of the oil pipeline depending on its concentration and ambient temperature are presented.

4. Drag reducing additives can be an effective means to ensure the performance of non-isothermic oil pipelines with pressure restrictions when reaching the maximum allowable temperature at the entrance.

5. The use of drag reducing additives as an alternative to oil heating requires evaluation on a case-by-case basis.

Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания Государственного автономного научного учреждения «Институт стратегических исследований Республики Башкортостан» за 2020 г.

The publication has been prepared within the framework of the fulfillment of the state task of the Institute of Strategic Researches of Bashkortostan Republic, State Autonomous Scientific Department, for 2020.

Список литературы

1. Марон В.И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах. СПб.: Изд-во «Лань», 2012. 248 с.
2. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Нефть и газ, 2003. 335 с.
3. Гаррис Н.А., Гаррис Ю.О., Глушков А.А. Построение динамической характеристики магистрального трубопровода (модель вязкопластичной жидкости) // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2004. № 1. С. 5. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Garris/Garris_4.pdf (дата обращения: 21.03.2020).
4. Petukhov B.S. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties // *Advances in Heat Transfer*. 1970. Vol. 6. P. 503-564. DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70153-9.
5. Zhao H., Li X., Wu X. New Friction Factor and Nusselt Number Equations for Turbulent Convection of Liquids with Variable Properties in Circular Tubes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 124. P. 454-462. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.082.
6. Жолобов В.В., Синельников С.В. Игнатенкова А.И. Перспективы применения противотурбулентных присадок для снижения энергозатрат тепловых станций при «горячей» перекачке // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 3. С. 256-265. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-3-256-265.
7. Pilipenko V.N. Friction and Heat Exchange in Turbulent Flow of Weak Polymer Solutions in Smooth Pipes // *Fluid Dynamics*. 1975. Vol. 10. P. 751-756. DOI: 10.1007/BF01015446.
8. Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals // *AIChE Journal*. 1975. Vol. 21. No. 4. P. 625-656. DOI: 10.1002/aic.690210402.
9. Sher I., Hestroni G. A Mechanistic Model of Turbulent Drag Reduction by Additives // *Chemical Engineering Science*. 2008. Vol. 63. No. 7. P. 1771-1778. DOI: 10.1016/j.ces.2007.11.035.
10. Hamouda A.A., Moshood O.A. Effect of Temperature on Degradation of Polymer Drag Reduction and Heat Transfer in Non-Newtonian Fluid // *Oilfield Chemistry: Materials of International Symposium*. Houston, Texas, USA. 2007. SPE-106081-MS. DOI: 10.2118/106081-MS.

References

1. Maron V.I. *Gidravlika dvukhfaznykh potokov v truboprovodakh* [Hydraulics of Two-Phase Flows in Pipelines]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2012. 248 p. [in Russian].
2. Lure M.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefii, nefteproduktov i gaza* [Mathematical Modeling of Pipeline Transport of Oil, Oil Products and Gas]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003. 335 p. [in Russian].
3. Garris N.A., Garris Yu.O., Glushkov A.A. Postroenie dinamicheskoi kharakteristiki magistral'nogo truboprovoda (model' vyazkoplastichnoi zhidkosti) [Construction of the Dynamic Characteristics of the Main Pipeline (Viscoplastic Fluid Model)]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftgazovoe delo» - Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2004, No. 1, pp. 5. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Garris/Garris_4.pdf (accessed 21.03.2020). [in Russian].
4. Petukhov B.S. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties. *Advances in Heat Transfer*, 1970, Vol. 6, pp. 503-564. DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70153-9.
5. Zhao H., Li X., Wu X. New Friction Factor and Nusselt Number Equations for Turbulent Convection of Liquids with Variable Properties in Circular Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, Vol. 124, pp. 454-462. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.082.
6. Zholobov V.V., Sinelnikov S.V. Ignatenkova A.I. Perspektivy primeneniya protivoturbulentnykh prisadok dlya snizheniya energozatrat teplovykh stantsii pri «goryachei» perekachke [The Prospects of DRA for Reducing the Energy Consumption of Thermal Stations in a «Hot» Pumping]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov - Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 256-265. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-3-256-265. [in Russian].
7. Pilipenko V.N. Friction and Heat Exchange in Turbulent Flow of Weak Polymer Solutions in Smooth Pipes. *Fluid Dynamics*, 1975, Vol. 10, pp. 751-756. DOI: 10.1007/BF01015446.
8. Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals. *AIChE Journal*, 1975, Vol. 21, No. 4, pp. 625-656. DOI: 10.1002/aic.690210402.
9. Sher I., Hestroni G. A Mechanistic Model of

11. Dimant Y., Poreh M. Heat Transfer in Flows with Drag Reduction // *Advances in Heat Transfer*. 1976. Vol. 12. P. 77-113.

Turbulent Drag Reduction by Additives. *Chemical Engineering Science*, 2008, Vol. 63, No. 7, pp. 1771-1778. DOI: 10.1016/j.ces.2007.11.035.

10. Hamouda A.A., Moshood O.A. Effect of Temperature on Degradation of Polymer Drag Reduction and Heat Transfer in Non-Newtonian Fluid. *Materials of International Symposium «Oilfield Chemistry»*. Houston, Texas, USA, 2007, SPE-106081-MS. DOI: 10.2118/106081-MS.

11. Dimant Y., Poreh M. Heat Transfer in Flows with Drag Reduction. *Advances in Heat Transfer*, 1976, Vol. 12, pp. 77-113.

Автор

• Шагиев Рустам Гиндуллович, канд. техн. наук
Государственное автономное научное
учреждение «Институт стратегических
исследований Республики Башкортостан»
Лаборатория нефтегазовых исследований
Центра реального сектора экономики
Ведущий научный сотрудник
Российская Федерация, 450075, г. Уфа,
пр. Октября, 129/3
тел. (347) 284-36-95
e-mail: shagievrg@isi-rb.ru

The Author

• Shagiev Rustam G., Candidate of Engineering
Sciences
Institute of Strategic Researches
of Bashkortostan Republic,
State Autonomous Scientific Department
Oil and Gas Research Laboratory
Centre Real Sector of Economics
Leading Researcher
129/3, October ave., Ufa, 450075,
Russian Federation
tel: (347) 284-36-95
e-mail: shagievrg@isi-rb.ru