

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-2-107-117

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 ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СТЕПЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК

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

### HYDRAULIC RESISTANCE OF NON-NEWTONIAN TIME INDEPENDENT POWER LAW FLUIDS IN ROUGH PIPES USING DRAG REDUCING AGENTS

#### **Введение**

Прогнозирование градиента давления и оценка гидравлического сопротивления турбулентных течений имеют большое промышленное значение. В литературе практически не имеется исследований по расчету снижения гидравлического сопротивления с помощью полимерных добавок для турбулентных течений неньютоновских степенных жидкостей в шероховатых трубах.

#### **Цели и задачи**

Расчет гидравлического сопротивления турбулентных течений неньютоновских степенных жидкостей в шероховатых трубах с использованием полимерных добавок.

#### **Методы**

Математическое моделирование и численные расчеты определения коэффициента гидравлического сопротивления на основе построения профилей скорости в шероховатой трубе неньютоновской степенной жидкости при наличии полимерных добавок.

#### **Background**

The pressure gradient prediction and the turbulent flows hydraulic resistance estimation are of great industrial importance. There are practically no researches in the literature to calculate the decrease in hydraulic resistance using drag reducing polymers for non-Newtonian time independent power law fluids in rough pipes.

#### **Aims and Objectives**

Calculation of hydraulic resistance for non-Newtonian time independent power law fluids in rough pipes using drag reducing polymers.

#### **Methods**

Mathematical modeling and numerical calculations for determining the hydraulic resistance coefficient based on the construction of velocity profiles in a rough tube of non-Newtonian time independent power law fluid with polymer additives.

### Результаты

Получено неявное уравнение для определения коэффициента гидравлического сопротивления степенной жидкости с применением полимерных добавок в шероховатых трубах.

Гидравлическая эффективность полимерных добавок при течении степенной неньютоновской жидкости в шероховатой трубе выше, чем при течении ньютоновской жидкости.

### Results

An implicit equation to determine the hydraulic resistance coefficient of time independent power law fluid using polymer additives agents in rough pipes is obtained.

The polymer additives hydraulic efficiency of the flow of non-Newtonian time independent power law fluid in a rough pipe is higher comparing with a flow of a Newtonian fluid.

---

---

**Ключевые слова:** гидравлическое сопротивление; полимерные добавки; неньютоновская степенная жидкость; шероховатые трубы; математическая модель

---

---

**Key words:** hydraulic resistance; polymer additives; non-Newtonian time independent power law fluids; rough pipes; mathematical model

---

---

Прогнозирование градиента давления и оценка гидравлического сопротивления нефтепроводов, перекачивающих неньютоновские нефти, имеет большое промышленное значение. Для применения технологии снижения гидравлического сопротивления с помощью полимерных добавок в трубопроводах необходима надежная оценка коэффициента трения для неньютоновских жидкостей с реологическими зависимостями, не зависящими от времени, в частности степенных жидкостей со степенным уравнением течения. К сожалению, в литературе практически не имеется исследований по этому вопросу, при этом они не лишены внутренних противоречий.

В ряде работ слабым растворам полимеров приписывались свойства, характерные для time independent степенных неньютоновских жидкостей. Между тем, полимерные добавки придают ньютоновским жидкостям вязкоупругие свойства, т.е. трансформируют в time dependent жидкости. Эти свойства проявляются в нестационарных условиях, например в турбулентных течениях, что и приводит к эффекту снижения турбулентного трения. Таким образом, применение полимерных добавок является эффективным также для турбулентных течений

The pressure gradient prediction and the turbulent flows hydraulic resistance estimation of pipelines pumping non-Newtonian oil are of great industrial importance. To apply the reducing hydraulic resistance technology using drag reducing agents in pipelines, a reliable estimation for friction coefficient for non-Newtonian fluids with time independent rheological dependencies, in particular, non-Newtonian time independent power law fluids, is necessary. Unfortunately, in the scientific literature there is practically no research concerning this issue, herewith they have internal contradictions.

In a number of works, properties characteristic of non-Newtonian time independent power law fluids were attributed to weak polymer solutions. Meanwhile, polymer additives impart viscoelastic properties to Newtonian fluids, i.e. transform them into time dependent fluids. These properties appear in unsteady conditions, for example, in turbulent flows, which leads to the effect of turbulent friction reduction. Thus, the use of polymer additives is also effective for turbulent flows of time independent non-

time independent неньютоновских жидкостей, в том числе жидкостей со степенным уравнением состояния.

Большое количество работ посвящено расчетам коэффициента трения ньютоновских жидкостей в шероховатых трубах, среди которых отметим работу Colebrook-White [1], в которой была получена неявная формула для коэффициента трения в шероховатой трубе ньютоновских жидкостей в переходном режиме течения:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \frac{1,26}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3,7D} \right], \quad (1)$$

где  $D$  - диаметр трубы;  
 $\varepsilon$  - размер шероховатости.

В настоящее время существует большое количество явных модификаций этой формулы, например [2].

Среди работ по оценке гидравлического сопротивления ньютоновских жидкостей в гладких трубах при наличии полимерных добавок отметим работу [3], где было получено следующее неявное уравнение для определения коэффициента трения:

$$f^{-1/2} = (4,0 + \Delta) \cdot \log(\text{Re} \cdot f^{1/2}) - 0,4 - \Delta \cdot \log \left( (\text{Re} \cdot f^{1/2})^* \right). \quad (2)$$

До настоящего времени разработано небольшое количество расчетных моделей коэффициента гидравлического сопротивления при течении ньютоновских жидкостей в шероховатых трубах с полимерными добавками.

Большинство из этих работ используют функцию шероховатости, полученную в результате обработки экспериментальных данных Никурадзе [4], приведенную в монографии Шлихтинга [5]. Среди работ указанного типа укажем работы Poreh 1970 [6], Иоселевича В.А., Пилипенко В.Н. 1973 [7], Седова Л.И. с соавт. 1974 [8].

Имеется также работа Hansen 2012 [9], достаточно произвольно использующая комбинацию уравнений (1) и (2):

Newtonian fluids, including power law fluids.

A large number of works are devoted to the calculation of the coefficient of friction of Newtonian fluids in rough pipes, among them we note the work of Colebrook-White [1], in which an implicit formula for the coefficient of friction in a rough pipe of Newtonian fluids in a transient flow regime was obtained:

where  $D$  is pipe diameter;  
 $\varepsilon$  is roughness size.

Currently, there are a large number of explicit modifications of this formula, for example [2].

Among the works devoted to the evaluation of the hydraulic resistance of Newtonian fluids in smooth pipes in the presence of polymer additives, we note the work [3], where the following implicit equation for determining the friction coefficient was obtained:

So far, a small number of computational models of hydraulic resistance coefficient have been developed for the flow of Newtonian fluids in rough pipes with polymer additives.

Most of these works use the roughness function obtained as a result of processing experimental data by Nikuradze [4], given in the Schlichting monograph [5]. Among this type of works, we should mention the works of Poreh 1970 [6], Ioselevich V.A., Piliipenko V.N. 1973 [7], Sedov L.I. e.a. 1974 [8].

There is also the work of Hansen 2012 [9], using a combination of equations (1) and (2) quite arbitrarily:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \frac{1,26}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3,7D} \right] - \delta \log \left[ \frac{1}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] - \delta \log \left[ \sqrt{2} D v_* \right]. \quad (3)$$

В этом контексте следует упомянуть работы, посвященные оценке коэффициента трения при турбулентном режиме течения time independent неньютоновских степенных жидкостей в гладких [10-12] и в шероховатых трубах [13].

Time independent неньютоновские степенные жидкости подчиняются степенному реологическому уравнению - степенной зависимости между касательным напряжением и скоростью сдвига:

$$\tau = K \left( -\frac{du}{dr} \right)^n, \quad (4)$$

где  $K$  - индекс консистенции;  
 $n$  - индекс течения.

В работе Dodge D.W., Metzner A.B. [10] получено неявное уравнение для определения коэффициента трения степенных жидкостей в гладких трубах

In this context, mention should be made of papers devoted to the estimation of the coefficient of friction in the turbulent flow regime of time independent non-Newtonian power liquids in smooth [10-12] and rough pipes [13].

Time independent non-Newtonian power fluids obey a power rheological equation – a power dependence between the tangential stress and shear rate:

where  $K$  is the consistency index;  
 $n$  is the flow index.

In Dodge D.W., Metzner A.B. [10] an implicit equation to determine the friction coefficient of power law fluids in smooth pipes is obtained

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{4,0}{(n')^{0,75}} \log \left[ \text{Re}' \cdot f^{1-n'/2} \right] - \frac{0,4}{(n')^{1,2}}, \quad (5)$$

где  $\text{Re}' = \frac{D^n V^{2-n'} \rho}{gK' 8^{n'-1}};$

$$K' = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n;$$

$V$  - средняя скорость потока;  
 $n' = n$ .

where  $\text{Re}' = \frac{D^n V^{2-n'} \rho}{gK' 8^{n'-1}};$

$$K' = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n;$$

$V$  - average flow rate;  
 $n' = n$ .

По аналогии с уравнением (2) можно записать уравнение для определения коэффициента трения степенных жидкостей в гладких трубах с полимерными добавками:

By analogy with equation (2), we can write the equation for determining the friction coefficient of power law fluids in smooth pipes with polymer additives:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \left( \frac{4,0}{(n')^{0,75}} + \Delta \right) \log(\text{Re}' \cdot f^{1-n'/2}) - \frac{0,4}{(n')^{1,2}} - \Delta \log \left[ (\text{Re}' \cdot f^{1-n'/2})^* \right]. \quad (6)$$

В работе Szilas A.P. [13] получены уравнения для определения коэффициента гидравлического сопротивления неньютоновских степенных жидкостей в гладких трубах:

In the work of Szilas A.P [13], equations for determining the coefficient of hydraulic resistance of non-Newtonian power fluids in smooth pipes were obtained:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2}{n} \log \left( \text{Re}_p \lambda^{\frac{2-n}{2}} \right) + \beta, \quad (7)$$

а также в шероховатых трубах:

and also in rough pipes:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{10^{\frac{\beta}{2}}}{\text{Re}_p^n \lambda^{\frac{2-n}{2n}}} + \frac{\varepsilon}{3,715D} \right], \quad (8)$$

где

$$\beta = 1.51^{1/n} \cdot \left( \frac{0.707}{n} + 2.12 \right) - \frac{4.015}{n} - 1.057;$$

$$\text{Re}_p = \frac{V^{2-n} D^n \rho}{\frac{\eta'}{8} \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n} \text{ - число Рейнольдса;}$$

$V$  - средняя скорость потока.

where

$$\beta = 1.51^{1/n} \cdot \left( \frac{0.707}{n} + 2.12 \right) - \frac{4.015}{n} - 1.057;$$

$$\text{Re}_p = \frac{V^{2-n} D^n \rho}{\frac{\eta'}{8} \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n} \text{ is Reynolds number;}$$

$V$  - average flow rate.

Гораздо меньше исследований по влиянию полимерных добавок на гидравлическое сопротивление при течении неньютоновских степенных жидкостей в шероховатых трубах. Одним из таких исследований является работа Karami H.R. и Mowla D. 2013 [14], в которой представлена модель расчета гидравлического сопротивления в нефтепроводах, транспортирующих неньютоновские (степенные) нефти с применением полимерных добавок, снижающих турбулентное трение. Авторы делают вывод, что добавление полимеров в трубопровод увеличивает толщину вязкого подслоя, что при-

There is much less research works on the effects of polymer additives on the hydraulic resistance during the flow of non-Newtonian power law liquids in rough pipes. One of such study is the work of Karami H.R. and Mowla D. 2013 [14], which presents a model for calculating hydraulic resistance in oil pipelines transporting non-Newtonian (power law) oils using polymer additives for turbulent friction reduction. The authors conclude that the addition of polymers to the pipeline increases the thickness of the viscous sublayer, which brings the rough pipes

ближает шероховатые трубы к гидравлически гладким. Отсюда делается вывод, что оригинальная корреляция Dodge Metzner [10] для степенных жидкостей, разработанная для гладких труб, может быть применена также и для шероховатых труб. При этом учет шероховатости осуществляется введением специального параметра, определяемого на основе экспериментов, проведенных авторами.

В этой работе была получена новая формула коэффициента трения для гидравлически гладкого, переходного и полностью шероховатого режимов как для ньютоновской, так и для неньютоновской жидкостей:

$$f^{-1/2} = \left(4 / n^{0.75}\right) \log \left[ \text{Re}_{MR} f^{\frac{2-n}{2}} \right] - \left(0,4 / n^{1.2}\right), \quad (9)$$

$$f^{-1/2} = \left(4 / n^{0.75} + \xi\right) \log \left[ \text{Re}_{MR} f^{\frac{2-n}{2}} \right] - \left(0,4 / n^{1.2}\right) - 2,1\xi, \quad (10)$$

$$\xi = \alpha C^{\beta} \theta^{\lambda} (\varepsilon / D)^{\varphi},$$

$$\xi = 0.0917C^{1.162} \theta^{1.48} (\varepsilon / D)^{0.276},$$

$$\theta = \frac{T_b - T_0}{T_0 - T}.$$

К недостаткам этой формулы следует отнести то обстоятельство, что при  $\varepsilon \rightarrow 0$  и  $c > 0$   $f_{c\text{ rough}} \rightarrow f_{0\text{ smooth}}$ , где  $f_{0\text{ smooth}}$  - коэффициент трения в гладкой трубе при отсутствии полимера.

Для получения интерполяционного уравнения для определения коэффициента трения в шероховатой трубе неньютоновской степенной жидкости с полимерными добавками воспользуемся уравнением Szillas (5) и уравнением Hansen (3):

closer to the hydraulically smooth ones. Thus, it is concluded that the original Dodge Metzner correlation [10] for power law fluids, obtained for smooth pipes, can also be applied to rough pipes. In this case, the roughness is taken into account by introducing a special parameter determined on the basis of experiments conducted by the authors.

In this work, a new formula for the friction coefficient for a hydraulically smooth, transitional and completely rough regime for both Newtonian and non-Newtonian fluids was obtained:

The disadvantages of this formula include the fact that when  $\varepsilon \rightarrow 0$  and  $c > 0$ ,  $f_{c\text{ rough}} \rightarrow f_{0\text{ smooth}}$  where  $f_{0\text{ smooth}}$  is the friction coefficient in a smooth pipe in the absence of a polymer.

To obtain an interpolation equation to determine the friction coefficient in a rough tube of a non-Newtonian power law fluid with polymer additives, we use the Szillas equation (5) and the Hansen equation (3):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \frac{10^{\frac{\beta}{2}}}{\text{Re}_p^n \lambda^{\frac{2-n}{2n}} + \frac{\varepsilon}{3.715D}} \right] - \delta \log \left[ \frac{1}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right] - \delta \log \left[ \sqrt{2Dv_*} \right]. \quad (11)$$

По аналогии с работой [7] профиль скорости неньютоновской степенной жидкости в шероховатой трубе при наличии полимерных добавок определяется следующим уравнением:

$$u^+ = A_n \log(y^+) + B_n + \alpha \ln(\xi / \xi_p) + \vartheta^\gamma \left( 3,0 - \frac{1}{\kappa} \ln \xi - \alpha \ln(\xi / \xi_p) \right), \quad (12)$$

где

where

$$\begin{aligned} y^+ &= y^n (u^*)^{2-n} \rho / K; \\ u^+ &= u / u_*; \\ u^* &= \sqrt{\tau_w / \rho}; \quad \kappa = 0,4; \\ A_n &= \frac{5,66}{n^{0,75}}; \\ B_n &= -\frac{0,4}{n^{1,2}} + \frac{2,458}{n^{0,75}} \left( 1,96 + 1,255n - 1,628n \log \left( 3 + \frac{1}{n} \right) \right); \\ \xi &= Re_n^* = \frac{\varepsilon^n Re}{D^n} \left( \frac{\lambda}{8} \right)^{1-n/2}, \end{aligned}$$

где функция шероховатости Никурадзе аппроксимируется следующим выражением:

where the Nikuradze roughness function is approximated by the following expression:

$$\vartheta = \left[ \sin \left( \frac{\pi \ln \xi / \xi_1}{2 \ln \xi_2 / \xi_1} \right) \right]^\gamma, \quad \gamma = 1 + \beta(B - 5,5); \quad (13)$$

$$B = 5,5 + A \ln(\xi / \xi_p), \quad \xi_p = Re_n^* = \frac{e^n Re}{D^n} \left( \frac{\lambda}{8} \right)^{1-n/2}, \quad (14)$$

где

where

$$A = 5,75.$$

Интегрируя уравнение (12) по сечению трубы можно получить следующее неявное уравнение для определения коэффициента гидравлического сопротивления:

By integrating the equation (12) over the cross section of the pipe, it is possible to obtain the following implicit equation for determining the hydraulic resistance coefficient:

$$\frac{1}{\lambda_n^{1/2}} = \bar{A}_n \log(Re_n \lambda_n^{1/2}) + \bar{B}_n + \alpha \ln \left( \frac{V^*}{V_{crit}^*} \right) - \left\{ A \log \left[ (Re_n^*) \right] - 3,0 \right\} \vartheta^{1+\beta \ln \left( \frac{V^*}{V_{crit}^*} \right)} / 8^{1/2}, \quad (15)$$

где

where

$$\bar{A}_n = \frac{A_n}{8^{1/2}};$$

$$\bar{B}_n = \frac{-3}{2 \cdot \ln(10)} \cdot \frac{A_n}{8^{1/2}} + \frac{A_n}{8^{1/2}} \cdot \log\left(\frac{1}{2 \cdot 8^{1/2}}\right) + \frac{B_n}{8^{1/2}};$$

$$\text{Re}_n = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{K' 8^{n-1}};$$

$$K' = K \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n;$$

$$V^* = \left( \frac{\text{Re} \left( K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n 8^{n-1} \right)}{D^n \rho} \right)^{\frac{1}{2-n}} \cdot \left( \frac{\lambda}{8} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$\text{Re}_n^* = \frac{\varepsilon^n \text{Re} \left( \frac{\lambda}{8} \right)^{1-n/2}}{D^n}.$$

*Некоторые результаты*

*Some results*

На рисунке 1 приведены расчетные данные по гидравлическому сопротивлению и гидравлической эффективности противотурбулентных присадок при течении ньютоновской и неньютоновской степенной жидкостей в шероховатой трубе.

Figure 1 shows the calculated data on the hydraulic resistance and hydraulic efficiency of drag reducing agents for the Newtonian and non-Newtonian power law fluids in a rough pipe.

Из приведенных данных следует, что гидравлическая эффективность противотурбулентных присадок в неньютоновской степенной жидкости выше, чем в неньютоновской жидкости. При этом как для ньютоновской, так и для неньютоновской жидкостей характерно монотонное снижение гидравлической эффективности при увеличении числа Рейнольдса.

The presented data prove that the hydraulic efficiency of drag reducing agents in a non-Newtonian power law fluid is higher than in a non-Newtonian fluid. At the same time, both for Newtonian and non-Newtonian fluids, a monotonic decrease in hydraulic efficiency is observed with an increase in the Reynolds number.



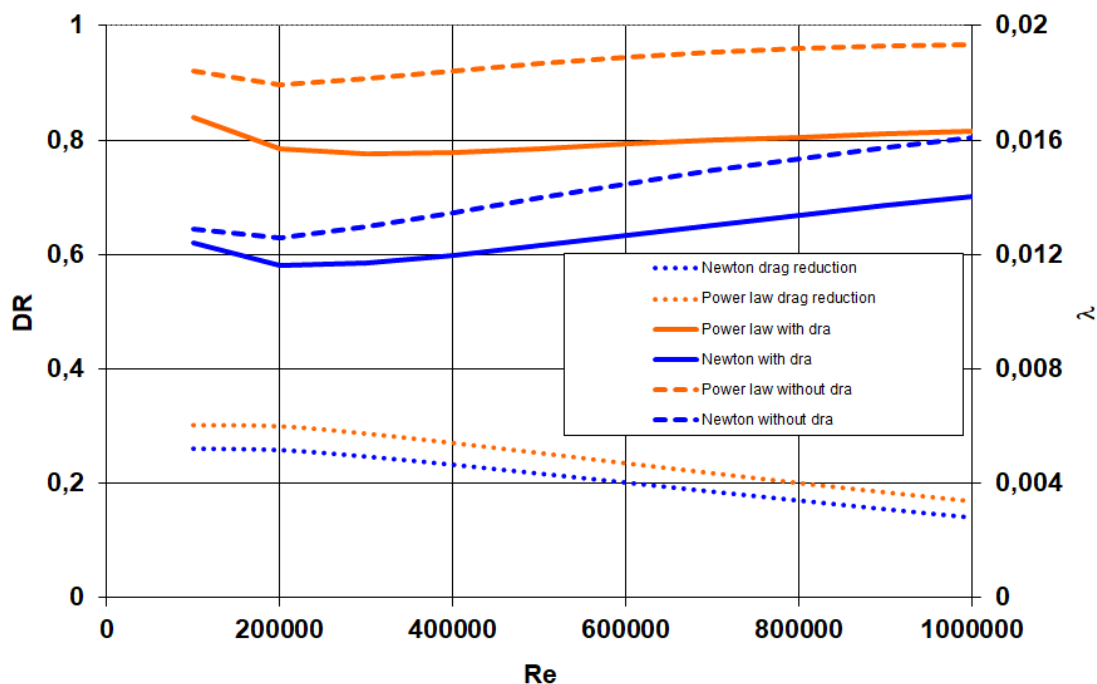


Рисунок 1. Коэффициент гидравлического сопротивления и гидравлическая эффективность полимерной добавки ( $\alpha = 28,2$ ) в шероховатой трубе ( $\frac{R}{\varepsilon} = 35$ ) ньютоновской ( $n = 1$ ) и неньютоновской степенной жидкостей ( $n = 0,9$ )

Figure 2. The hydraulic resistance coefficient and the hydraulic efficiency of the polymer additive ( $\alpha = 28,2$ ) in the rough tube ( $\frac{R}{\varepsilon} = 35$ ) of Newtonian ( $n = 1$ ) and non-Newtonian power liquids ( $n = 0,9$ )

### Выводы

1. Проведен обзор работ по оценке снижения гидравлического сопротивления полимерными добавками к time independent степенной неньютоновской жидкости в шероховатых трубах.

2. Получено неявное уравнение для определения коэффициента трения неньютоновской степенной жидкости с применением противотурбулентных присадок на основе модифицированной функции шероховатости.

### Results

1. A review of works for the assessment of the hydraulic resistance reduction using polymer additives to time independent power non-Newtonian fluid in rough pipes.

2. An implicit equation for determining the friction coefficient of a non-Newtonian power law fluid using drag reducing agents based on a modified roughness function is obtained.

3. Проведен сравнительный анализ гидравлической эффективности полимерных добавок при течении ньютоновских жидкостей и неньютоновской степенной жидкости в шероховатых трубе.

4. Для дальнейших исследований необходимо проведение лабораторных и натурных испытаний на промышленных нефтепроводах для проверки на адекватность.

*Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания Государственного автономного научного учреждения «Институт стратегических исследований Республики Башкортостан» за 2019 г.*

3. A comparative analysis of the hydraulic efficiency of polymer additives in the course of Newtonian fluids and non-Newtonian power law fluids in a rough pipe was carried out.

4. For further research it is necessary to conduct laboratory and field tests on industrial pipelines to check for adequacy.

*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 2019.*

#### Список литературы

1. Colebrook C., White C. Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes // *Proceedings of the Royal Society A*. 1937. Vol. 161. P. 376-381.
2. Brkic D.A. Note on Explicit Approximations to Colebrook's Friction Factor in Rough Pipes under Highly Turbulent Cases // *J. Hydronautics*. 1970. Vol. 4. No. 4. P. 151-155.
3. Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals // *AIChE Journal*. 1975. Vol. 21. No. 4. P. 625-65.
4. Nikuradse J., *Stromungsgesetze in rauhen Rohren*. Forschg. Arb. Ing.-Wes., 1933. Issue 361.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
6. Poreh M. Flow of Dilute Polymer Solutions in Rough Pipes // *J. Hydronautics*. 1970. Vol. 4. No. 4. P. 151-155.
7. Иоселевич В.А., Пилипенко В.Н. Логарифмический профиль скорости при течении слабого полимерного раствора у шероховатой поверхности // *Доклады АН СССР*. 1973. Т. 213, № 6. С. 1266-1269.
8. Седов Л.И., Васецкая Н.Г., Иоселевич В.А. О расчетах турбулентных пограничных слоев с малыми добавками полимеров. М.: Наука, 1974. С. 205-219.
9. Hansen et al. Flow Simulation in Well or Pipe. Patent US, No. 8321190, Nov. 27, 2012.
10. Dodge D.W., Metzner A.B. Turbulent flow of Non-Newtonian Systems // *AIChE J*. 1959. Vol. 5. pp. 189-204.
11. Shaver R.G., Merrill E.W. Turbulent Flow of Pseudoplastic Polymer Solution in Straight Cylindrical Tubes // *AIChE J*. 1959. No. 5 (2). P. 181-188.
12. Clapp R.M. Turbulent Heat Transfer in Pseudoplastic Non-Newtonian Fluids. International

#### References

1. Colebrook C., White C. Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes. *Proceedings of the Royal Society A*. 1937, Vol. 161, pp. 376-381.
2. Brkic D.A. Note on Explicit Approximations to Colebrook's Friction Factor in Rough Pipes under Highly Turbulent Cases. *J. Hydronautics*, 1970, Vol. 4, No. 4, pp.151-155.
3. Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals. *AIChE Journal*, 1975, Vol. 21, No. 4, pp. 625-65.
4. Nikuradse J. *Stromungsgesetze in rauhen Rohren*. Forschg. Arb. Ing.-Wes., 1933, Issue 361.
5. Shlikhting G. *Teoriya pogranychnoy sloya* [The Theory of the Boundary Layer]. Moscow, Nauka Publ., 1974. [in Russian].
6. Poreh M. Flow of Dilute Polymer Solutions in Rough Pipes. *J. Hydronautics*, 1970, Vol. 4, No. 4, pp. 151-155.
7. Ioselevich V.A., Pilipenko V.N. Logarifmicheskiy profil' skorosti pri techenii slabogo polimernogo rastvora u sherokhovatoi poverkhnosti [Logarithmic Velocity Profile at the Flow of a Weak Polymer Solution at a Rough Surface]. *Doklady AN SSSR - Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1973, Vol. 213, No. 6, P. 1266-1269. [in Russian].
8. Sedov L.I., Vasetskaya N.G., Ioselevich V.A. *O raschetakh turbulentnykh pogranychnykh sloev s malymi dobavkami polimerov* [On Calculations of Turbulent Boundary Layers with Small Polymer Additives]. Moscow, Nauka Publ., 1974. pp. 205-219. [in Russian].
9. Hansen e.a. *Flow Simulation in Well or Pipe*. Patent US, No. 8321190, Nov. 27, 2012.
10. Dodge D.W., Metzner A.B. Turbulent flow of Non-Newtonian Systems. *AIChE J*, 1959, Vol. 5, pp. 189-204.

Development in Heat Transfer // ASME. 1961. Part 111. Sec. A. P. 652-661.

13. Szilas A.P., Bobok E., Navratil L. Determination of Turbulent Pressure Loss of Non-Newtonian Oil Flow in Rough Pipes // *Rheological Acta*. 1981. Vol. 20. P. 487-496.

14. Karami H.R., Mowla D. A General Model for Predicting Drag Reduction in Crude Oil Pipelines // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013. Vol. 111. P. 78-86.

11. Shaver R.G., Merrill E.W. Turbulent flow of Pseudoplastic Polymer Solution in Straight Cylindrical Tubes. *AIChE J*, 1959, No. 5(2), pp. 181-188.

12. Clapp R.M. Turbulent Heat Transfer in Pseudoplastic Non-Newtonian fluids. *International Development in Heat Transfer. ASME*, 1961, Part 111, Sec. A., pp. 652-661.

13. Szilas A.P., Bobok E., Navratil L. Determination of Turbulent Pressure Loss of Non-Newtonian Oil Flow in Rough Pipes. *Rheological Acta*, 1981, Vol. 20, pp. 487-496.

14. Karami H.R., Mowla D. A General Model for Predicting Drag Reduction in Crude Oil Pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, Vol. 111, pp. 78-86.

#### Автор

• Шагиев Рустам Гиндуллович, канд. техн. наук  
Государственное автономное научное  
учреждение «Институт стратегических  
исследований Республики Башкортостан»  
Лаборатория нефтегазовых исследований Центра  
исследований реального сектора экономики  
Ведущий научный сотрудник  
Российская Федерация, 450075, г. Уфа,  
пр. Октября, 129/3  
тел. (347) 284-36-95  
e-mail: rggshag@mail.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  
Of Centre of real sector of economics  
Leading Researcher  
129/3, October ave., Ufa, 450075,  
Russian Federation  
tel: (347) 284-36-95  
e-mail: rggshag@mail.ru