

UDC 532.542.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ

Трапезников С.Ю.<sup>1</sup>, Лушкин К.А.

*Санкт-Петербургский государственный горный институт  
им. Г.В. Плеханова (технический университет), г. Санкт-Петербург*

<sup>1</sup> *e-mail: sytrapeznikov@gmail.com*

**Аннотация.** *Приведен краткий анализ зависимостей по определению коэффициента гидравлического сопротивления с учетом неизотермичности потока. Предложена модель движения нефти при неизотермическом движении, на основании которой получена формула для определения коэффициента гидравлического сопротивления высоковязкой нефти для зоны гладких труб турбулентного режима течения.*

**Ключевые слова:** *коэффициент гидравлического сопротивления, неизотермичность потока, вязкость нефти, температурный фактор, критерий Прандтля*

Для трубопроводного транспорта характерно движение нефти при неизотермическом режиме, при котором она изменяет свои реологические свойства, переходя от ньютоновской жидкости при высоких значениях температуры транспортируемого потока к неньютоновской. В России и за рубежом до сих пор не создано достаточно строгой теории движения высоковязких потоков. Несовершенство теоретических решений, а также невозможность применения их в инженерных расчетах приводит к тому, что для практических целей приходится пользоваться исключительно эмпирическими зависимостями, в частности, для определения коэффициента гидравлического сопротивления, которые с той или иной степенью точности позволяют определять для заданных конкретных условий основные параметры транспортирования нефти. Однако, поскольку условия ее транспорта чрезвычайно разнообразны, и для них предлагаются различные расчетные формулы, в большинстве случаев не представляется возможным определить нужные параметры перекачки с достаточной для практики точностью.

На основании вышеуказанного можно сделать вывод о необходимости дальнейшего развития теории на базе экспериментальных исследований закономерностей движения высоковязких потоков.

Очевидно, что если по трубопроводу движется жидкость, температура которой значительно выше температуры окружающей среды, то такое течение сопровождается теплопередачей через стенку трубы во внешнюю среду и, следовательно, охлаждением жидкости.

Когда же температура движущейся жидкости ниже температуры окружающей среды, то происходит приток тепла через стенку, в результате жидкость в процессе течения нагревается.

При перекачке вязких нефтей в зимних условиях по трубопроводу их температура изменяется как по длине, так и по радиусу трубы. Снижение средней температуры жидкости по длине сопровождается увеличением ее вязкости. Изменение температуры жидкости по радиусу приводит к изменению вязкости жидкости и деформации профиля скоростей. Потери на трение в этих условиях значительно возрастают. Формулы для определения потерь напора, применяемые для изотермических потоков, можно применять лишь с поправками на изменение температуры (вязкости) и профиля скоростей.

Вопрос о влиянии неизотермичности на коэффициент гидравлического сопротивления при течении газов в трубах изучался в работе А.А. Гухмана и Н.В. Илюхина [2], в которой неизотермичность учитывалась путем введения дополнительного температурного фактора в виде:

$$\frac{\lambda_{on}}{\lambda_{из}} = f\left(\frac{T_{\omega}}{T_f}\right), \quad (1)$$

где  $\lambda_{on}$  – коэффициент гидравлического сопротивления в условиях неизотермического течения;  $\lambda_{из}$  – коэффициент гидравлического сопротивления в условиях изотермического течения;  $T_{\omega}$  – абсолютная температура стенки трубопровода, К;  $T_f$  – средняя температура потока, К.

Многие исследователи делали попытки исключить неизотермичность путем выбора определяющей температуры, причем для ее вычисления рекомендуется формула:

$$T_{on} = \chi(T_f + T_{\omega}). \quad (2)$$

Величины коэффициента  $\chi$  принимаются различными авторами в пределах от 0,4 до 0,5 [6].

Неизотермическое движение капельных жидкостей, при котором физические характеристики особенно значительно изменяются как по сечению, так по длине потока, изучено меньше.

Представляют интерес работы Е. Н. Зидера и Г. Е. Тейта [10], Крауча и А. Зоммерфельда [11], учитывающие неизотермичность введением комплекса вида

$$\frac{\lambda_{on}}{\lambda_{из}} = C\left(\frac{\mu_{\omega}}{\mu_f}\right)^n, \quad (3)$$

где  $\mu_{\omega}$  – вязкость жидкости при средней температуре стенки, Па·с;  $\mu_f$  – вязкость жидкости при средней температуре потока, Па·с;  $C$ ,  $n$  – эмпирические коэффициенты, Е.Н. Зидер и Г.Е. Тейт принимают  $C=1,02$ ,  $n=0,14$  [10], а Крейч и Зоммерфельд принимают  $C=1$ ,  $n=0,13$  [9].

М.А. Михеев [5, 7] предложил обобщенную зависимость для неизотермического движения капельных жидкостей:

$$\lambda_{on} = \lambda_{uz} \left( \frac{\text{Pr}_\omega}{\text{Pr}_f} \right)^{0,33}, \quad (4)$$

где  $\text{Pr}_\omega$  – критерий Прандтля при средней температуре стенки трубы;  $\text{Pr}_f$  – критерий Прандтля при средней температуре потока. Это выражение распространяется на область турбулентного режима течения. Опытные данные М.А. Михеева охватывают область изменения чисел Рейнольдса до 40000. Б.С. Петухов, будучи докторантом, в своих исследованиях отказывался от введения этого комплекса, так как опыты, проведенные им с маслами и водой, лучше согласуются с формулами, где неизотермичность учитывается отношением вязкостей. Б.С. Петухов предложил следующую расчетную формулу:

$$\frac{\lambda_{on}}{\lambda_{uz}} = \left( \frac{\mu_\omega}{\mu_f} \right)^n, \quad (5)$$

где  $n=0,14$  – для нагревания жидкости и  $n=0,28 \text{Pr}^{-0,25}$  – для охлаждения жидкости. Опыты Б.С. Петухова были проведены для области изменения чисел Рейнольдса до 60000. Область больших значений чисел Рейнольдса им экспериментально не проверялись.

Все эти зависимости были получены экспериментальным путем и поэтому могут применяться только для условий проведенных экспериментов и для определенных жидкостей, учитывающие переменность физических свойств жидкости и направления теплового потока. Г.А. Маяцкий [3] сделал попытку приближенно учесть влияние на теплоотдачу направления теплового потока и изменения физических параметров жидкости по сечению при изменении температуры. В результате обработки экспериментальных данных им получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления в условиях теплообмена:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \left( \text{Re} \sqrt{\lambda \frac{\mu_f}{\mu_\omega}} \right) - 0,8. \quad (6)$$

Использование Г.А. Маяцким упрощенного решения тепловой задачи дало возможность ввести предпосылки, позволившие приблизительно учесть влияние направления теплового потока и непостоянства основных физических параметров жидкости на сопротивление и теплообмен при неизотермическом движении жидкости в трубе.

Для расчета сопротивления при турбулентном изотермическом движении жидкости в гладких трубах обычно используется формула А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{64}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где  $\Delta$  – абсолютная шероховатость трубы, м;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, м. Для распространения этой формулы на случай неизотермического движе-

ния Г.А. Маяцкий и О.Г. Новичкова [4] сопоставили ее с полученной Г.А. Маяцким зависимостью и предложили определять коэффициент сопротивления при неизотермическом движении воды по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,82 \lg \left( \operatorname{Re} \sqrt{\frac{\mu_f}{\mu_\omega}} \right) - 1,64 \right)^2} \quad (8)$$

Результаты расчета, по словам авторов, по этой формуле показали хорошую сходимость с опытными данными.

Теоретически чрезвычайно трудно установить форму зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от температуры по сечению и длине одновременно. Для решения этой задачи необходимо выполнить экспериментальные исследования с использованием теории подобия.

Принимаем следующую модель движения [6] для высоковязкой нефти, представленную на рис. 1.

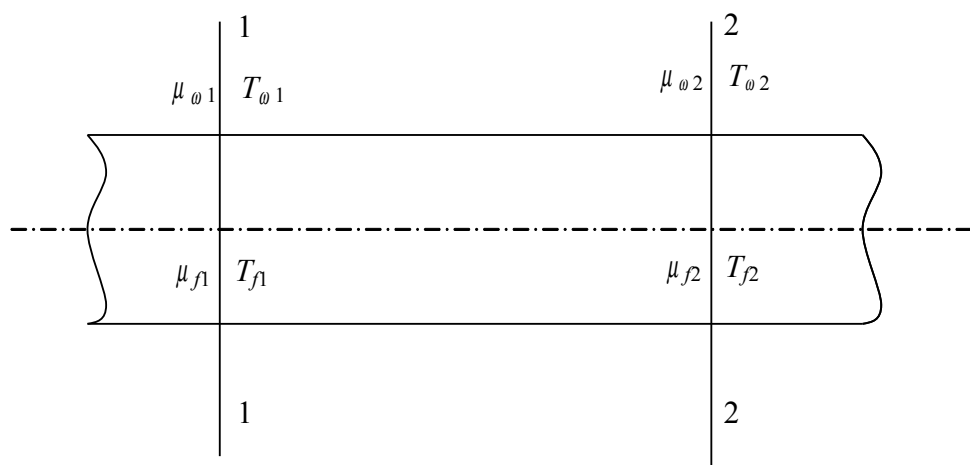


Рис.1. Модель движения потока нефти при неизотермическом движении

Здесь  $\mu_{\omega 1}$  и  $\mu_{\omega 2}$  – коэффициент вязкости у стенки в 1 и 2 сечениях;  $T_{f1}$  и  $T_{f2}$  – температура жидкости в 1 и 2 сечениях;  $\mu_{f1}$  и  $\mu_{f2}$  – коэффициент вязкости жидкости в 1 и 2 сечениях.

Влияние неизотермичности процесса на коэффициент гидравлического сопротивления по длине трубопровода учитывается следующим образом:

$$\lambda_{T1} = \lambda \left( \frac{\mu_{\omega 1}}{\mu_{f1}} \right)^n; \quad \lambda_{T2} = \lambda \left( \frac{\mu_{\omega 2}}{\mu_{f2}} \right)^n,$$

где  $\lambda_{T1}$  и  $\lambda_{T2}$  – коэффициент гидравлического сопротивления в условиях неизотермического течения в 1 и 2-м сечениях;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления в условиях изотермического течения.

Отсюда

$$\frac{\lambda_{T_2}}{\lambda_{T_1}} = \frac{\left(\frac{\mu_{\omega 2}}{\mu_{f 2}}\right)^n}{\left(\frac{\mu_{\omega 1}}{\mu_{f 1}}\right)^n} = \left(\frac{\mu_{\omega 2}}{\mu_{\omega 1}}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu_{f 1}}{\mu_{f 2}}\right)^n;$$

$$\lambda_{T_2} = \lambda \left(\frac{\mu_{\omega 1}}{\mu_{f 1}}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu_{\omega 2}}{\mu_{\omega 1}}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu_{f 1}}{\mu_{f 2}}\right)^n. \quad (9)$$

Если  $T_{\omega 1} = T_{\omega 2}$  и  $\mu_{\omega 1} = \mu_{\omega 2}$  получим следующую зависимость:

$$\lambda_T = \lambda \left(\frac{\mu_{\omega}}{\mu_f}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu_{f 1}}{\mu_{f 2}}\right)^n. \quad (10)$$

Так как длина трубопровода много больше его диаметра, в этом случае отношение вязкостей  $\left(\frac{\mu_{f 1}}{\mu_{f 2}}\right)$  будет отличаться от единицы.

Изменение вязкости в зависимости от температуры можно выразить следующим соотношением [8]

$$\mu_f = \mu_0 e^{AT_i}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), будем иметь:

$$\lambda_T = \lambda \left(\frac{\mu_{\omega}}{\mu_f}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu_0 e^{AT_1}}{\mu_0 e^{AT_2}}\right)^n = \lambda \left(\frac{\mu_{\omega}}{\mu_f}\right)^n \cdot \left(\frac{e^{AT_1}}{e^{AT_2}}\right)^n. \quad (12)$$

Следовательно, для определения коэффициента гидравлического сопротивления в сечении трубопровода, когда  $T_1 = T_2$ , получим выражение

$$\lambda_T = \lambda \left(\frac{\mu_{\omega}}{\mu_f}\right)^n. \quad (13)$$

Если выражение (13) умножим и разделим на отношение теплоемкости  $c$  к теплопроводности  $\lambda_{m-mb}$ , то получим следующее выражение

$$\lambda_T = \lambda \left(\frac{\mu_{\omega}}{\mu_f}\right)^n = \lambda \left(\frac{Pr_{\omega}}{Pr_f}\right)^n. \quad (14)$$

Отношение  $\frac{Pr_{\omega}}{Pr_f}$  в формуле (15) учитывает неравномерность теплового потока по сечению нефтепровода. Величина этого показателя зависит, прежде всего, от вязкости нефти в любой точке потока по сечению. Отсутствие этого коэффициента зависило бы значение коэффициента теплоотдачи, тем самым, исказив реальную картину процесса теплообмена.

Исследования проводились на высоковязкой нефти Южно-Шапкинского месторождения республики Коми. Для турбулентного режима течения при изотермическом течении была использована степенная аппроксимация зависимости типа Блазиуса для расчета коэффициента гидравлического сопротивления [1]

$$\lambda = a^* (\text{Re}^*)^{-b^*}, \quad (15)$$

где  $a^*$ ,  $b^*$  – эмпирические коэффициенты;  $\text{Re}^*$  – приведенное число Рейнольдса.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления при неизотермическом течении на основании экспериментальных данных было получено выражение

$$\lambda_T = a^* \left( \frac{8 \text{Re}}{H + 2(1 + \sqrt{9 + H})} \right)^{b^*} \left( \frac{\mu_\omega}{\mu_f} \right)^{0,62}, \quad (16)$$

где  $a^* = 2,98 \text{He}^{-0,403}$ ;  $b^* = 1,26 \text{He}^{-0,265}$ ;  $\text{He}$  – число Хедстрема.

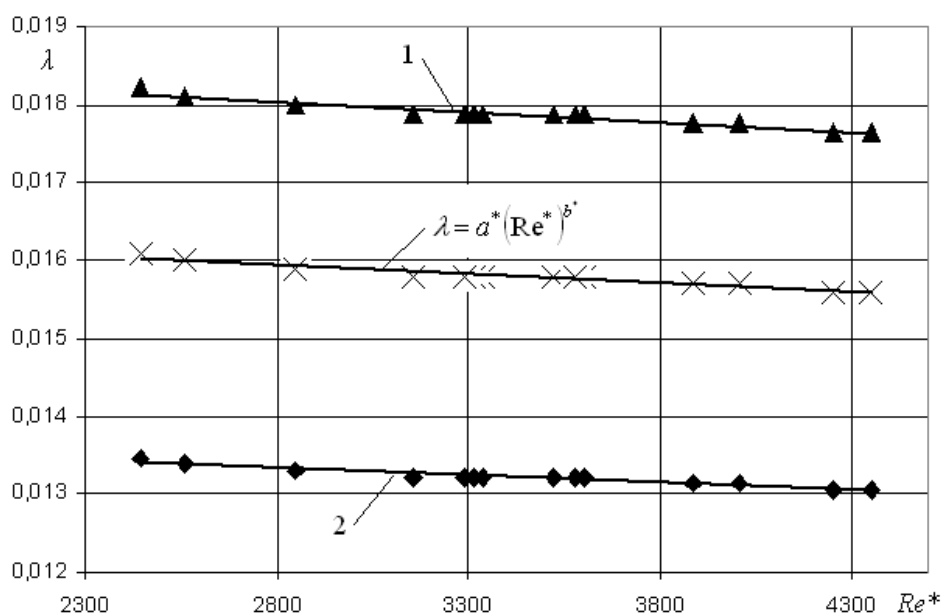


Рис.2. Зависимость  $\lambda = f(\text{Re}^*)$  при изотермическом и неизотермическом движении

На рис. 2 представлены результаты расчета при изотермическом движении нефти, а также в случаях нагревания и охлаждения жидкости. Из этого графика видно, что в случае нагревания коэффициент гидравлических сопротивлений оказывается меньше (линия 2), а в случае охлаждения – больше (линия 1) по сравнению с коэффициентом сопротивления при изотермическом течении, что согласуется с физическими представлениями о неизотермическом движении.

### Литература

1. Губин В.Е., Губин В.В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1982. 296 с.
2. Гухман А.А., Илюхин Н.В. Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью. М.: Машгиз, 1951. 227 с.
3. Маяцкий Г.А. Теплообмен при турбулентном движении жидкости в случае значительного перепада температур // Известия высших учебных заведений. Энергетика, 1958. №5. С. 57–64.
4. Маяцкий Г.А., Новичкова О.Г. Формула для расчета коэффициента сопротивления при неизотермическом движении жидкости в трубах // Известия высших учебных заведений. Энергетика, 1959. №10. С. 123–130.
5. Насыров А.М. Способы борьбы с отложениями парафина. М.: ВНИИО-ЭНГ, 1991. 44 с.
6. Николаев А.К. Обоснование рациональных параметров и режимов работы систем напорного гидротранспорта горных предприятий в сложных природно-климатических условиях: дис. д-ра тех. наук. СПб, 2004. 303 с.
7. Рауз Х. Механика жидкости. М.: Стройиздат, 1967. 300 с.
8. Штукатуров К.Ю. Моделирование режимов работы трубопровода, перекачивающего высоковязкие нефти // Exponenta Pro. Математика в приложениях, 2004. № 1. С. 54–60.
9. Nicolaev A., Raul P. Ynvestigaeion de los parametrs y los regimens de hidrotrausporte de las hidrromezclas lateritical en la planta "Comandante Pedro" goto Alba (primera parte). Cuba Moa, Minería y geología, 1995. №1. P.143–149.
10. Sider E.N., Tate G.E. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. Ind. Eng. Chem., 1936. Issue 28 (12). pp. 1429–1435. DOI: 10.1021/ie50324a027
11. Zommerfeld A. Trans of ASME, 1949. №7. P. 110–118.

## STUDY OF THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT AT HIGH VISCOSITY OIL NONISOTHERMAL MOTION IN PIPELINE

S. Yu. Trapeznikov<sup>1</sup>, K.A. Lushkin

The G.V. Plekhanov Saint Petersburg State Mining Institute and Technical University,  
Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> e-mail: sytrapeznikov@gmail.com

**Abstract.** *The brief analysis of dependencies to determine the hydraulic resistance coefficient taking into account nonisothermal flow is presented. The oil motion model at nonisothermal flow is proposed, caused the formula for determining the high viscosity oil hydraulic resistance coefficient for skin friction zone of turbulent flow regime.*

**Keywords:** *hydraulic resistance coefficient, nonisothermal flow, oil viscosity, temperature factor, Prandtl number*

### References

1. Gubin V.E., Gubin V.V. Truboprovodnyi transport nefti i nefteproduktov (Pipeline transport of crude oil and petroleum products). Moscow: Nedra, 1982. 296 p.
2. Gukhman A.A., Ilyukhin N.V. Osnovy ucheniya o teploobmene pri techenii gaza s bol'shoi skorost'yu (The fundamentals of heat transfer in the flow of gas at high speed). Moscow: Mashgiz, 1951. 227 p.
3. Mayatskii G.A. Teploobmen pri turbulentnom dvizhenii zhidkosti v sluchae znachitel'nogo perepada temperatur (Heat transfer in turbulent fluid motion in the case of a significant temperature difference). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Energetika*, 1958, Issue 5, pp. 57-64.
4. Mayatskii G.A., Novichkova O.G. Formula dlya rascheta koeffitsienta soprotivleniya pri neizotermicheskom dvizhenii zhidkosti v trubakh (The formula for calculating the drag coefficient for non-isothermal liquid flow in the pipes). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Energetika*, 1959, Issue 10, pp. 123–130.
5. Nasyrov A.M. Sposoby bor'by s otlozheniyami parafina (Methods of prevention the paraffin deposits). Moscow: VNIIOENG, 1991. 44 p.
6. Nikolaev A.K. Obosnovanie ratsional'nykh parametrov i rezhimov raboty sistem napornogo gidrotransporta gornykh predpriyatii v slozhnykh prirodno-klimaticheskikh usloviyakh (Substantiation of rational parameters and operation modes of systems of pressure hydrotransport of mining enterprises in difficult climatic conditions). Thesis of Dr. tech. science. Saint Petersburg, 2004. 303 p.
7. Rauz Kh. Mekhanika zhidkosti (Fluid Mechanics). Moscow: Stroiizdat, 1967. 300 p.
8. Shtukaturov K.Yu. Modelirovanie rezhimov raboty truboprovoda, perekachivayushchego vysokovyazkie nefti (Simulation of regimes of pipeline, pumping high-viscosity oil). *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*, 2004, Issue 1, pp. 54–60.

9. Nicolaev A., Raul P. Ynvestigaeion de los parametrs y los regimens de hidro-  
trausporte de las hidrromezclas lateritical en la planta "Comandante Pedro" goto Alba  
(primera parte). Cuba Moa, Minería y geología, 1995. №1. P.143–149.

10. Sider E.N., Tate G.E. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes.  
Ind. Eng. Chem., 1936. Issue 28 (12). pp. 1429–1435. DOI: 10.1021/ie50324a027

11. Zommerfeld A. Trans of ASME, 1949. №7. P. 110–118.