



УДК 622.692.4

## АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕКАЧИВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

### CALCULATION FORMULAE OF ANTI-TURBULENT ADDITIVES INFLUENCE ON THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE PUMPED LIQUID ANALYSIS

**Гильмияров Евгений Адикович**  
специалист,  
ООО «НефтьГазСервис Навигатор»  
egilmiyarov@list.ru

**Шакиров Евгений Робертович**  
инженер,  
ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»  
evgeniy.shakirov@mail.ru

**Gilmiyarov Evgeny Adikovich**  
Specialist,  
LLC «OilGasService Navigator»  
egilmiyarov@list.ru

**Shakirov Evgeny Robertovich**  
Engineer,  
LLC «LUKOIL-Engineering»  
«KogalymNIPIneft»  
evgeniy.shakirov@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье были рассмотрены методы расчетной оценки степени влияния противотурбулентных присадок на течение нефти и нефтепродукта в трубопроводе. Кроме анализа рассмотренных методов были указаны возможные области их применения и границы их применимости.

**Annotation.** In this article, the methods for calculating the degree of influence of anti-turbulent additives on the flow of oil and oil products in a pipeline were considered. In addition to the analysis of the considered methods, possible areas of their application and limits of their applicability were indicated.

**Ключевые слова:** трубопроводный транспорт, нефть, нефтепродукт, гидравлическое сопротивление, число Рейнольдса, противотурбулентные присадки.

**Keywords:** pipeline transport, oil, oil product, hydraulic resistance, Reynolds criterion, anti-turbulent additives.

Современная политика энергетических компаний устанавливает приоритетом компаний поиск решений по снижению потребления энергетических ресурсов и оптимизации расходов. Одним из способов оптимизации расходов на объектах трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов является использование противотурбулентных присадок (ПТП) для снижения гидравлического сопротивления трубопроводов. Присадки представляют интерес в связи с тем, что они могут обеспечить одновременное снижение давления, требуемого для преодоления течения жидкости в трубопроводе, при сохранении той же пропускной способности. Противотурбулентные присадки позволяют регулировать режим перекачки без строительства дополнительных капитальных сооружений (например, лупингов). Их можно вводить не на постоянной основе, а в случаях производственной необходимости и регулировать количество вводимого реагента, что делает применение присадок более гибким методом регулирования режима перекачки.

Исходя из вышесказанного, можно судить о том, что присадки способны обеспечить решение целого спектра задач. Однако, для их эффективного применения в производстве, необходима единая база основных параметров таких химических соединений, которая будет опираться на технические условия.

На данный момент существуют различные подходы к оценке гидродинамических параметров воздействия присадок на транспортируемую жидкость. Далее будут представлены некоторые из них.

Авторы работы [1] предлагают следующую аналитическую зависимость увеличения объемной производительности от концентрации присадки при перекачке жидкости:

$$\Delta Q = \pi R_w^2 \cdot \psi \cdot \sqrt{\frac{6\tau_w}{\rho}} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{\tau_w \cdot D}{2G}} - 1 \right). \quad (1)$$

Отличительной особенностью данного выражения является то, что в нем учитывается особенность поведения жидкости с присутствием в них макромолекулярных соединений, которые образуют собой особые конформационные формы.

Переменная  $G$  данного уравнения характеризует упругие свойства жидкости с макромолекулярными соединениями:

$$G = \frac{RT}{M \cdot [\eta]}, \quad (2)$$

где  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К;  $M$  – относительная молекулярная масса, кг/моль;  $[\eta]$  – характеристическая вязкость, м<sup>3</sup>/кг.



Величина  $\psi$  характеризует объемную долю клубков линейных полимеров в растворе:

$$\psi = \frac{[\eta] \cdot C}{1 + [\eta] \cdot C}, \tag{3}$$

где  $C$  – концентрация полимера в растворе, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент  $D$  – это реологическая характеристика, называемая фазовым углом механических потерь, зависящая от скорости сдвига и времени релаксации полимерного клубка. Определяется по формуле:

$$D = (\pi / 2) \cdot \cos \delta - \sin \delta, \tag{4}$$

где  $\delta$  – фазовый угол, град.

Напряжение сдвига  $\tau_w$  на стенке трубопровода определяется по формуле:

$$\tau_w = \frac{\Delta P \cdot R_w}{2L}, \tag{5}$$

где  $\Delta P$  – перепад давления участка, Па;  $R_w$  – радиус участка трубопровода, м;  $L$  – длина участка трубопровода, м.

Из положительных сторон зависимости (1) можно выделить ее применимость для оценки эффективности противотурбулентных присадок. Зависимость достаточно простая, обладающая достаточно небольшим количеством входных данных, доступных при проектировании. Характеристики трубопровода и условий транспорта содержатся в проектной документации, информация о свойствах присадки запрашивается у завода изготовителя. Как следствие, оценка эффективности производится достаточно просто.

Из отрицательных сторон: данная зависимость не предусматривает определения коэффициента гидравлических потерь, для определения более детальной гидравлической оценки трассы; коэффициент напряжения сдвига усреднен, и его можно принимать лишь для трубопроводов небольшого диаметра; существует необходимость предварительного тестирования жидкости на реометре. Кроме того, зависимость не учитывает химический состав присадки и количество содержащейся в продукте перекачки воды.

В работе [2] предлагается выражение коэффициента гидравлического сопротивления через параметр подобия Деборы  $De$ :

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{(1 + De^2)^m}, \tag{6}$$

где  $De$  – параметр Деборы – критерий, учитывающий упругие свойства растворов полимеров и зависящий от релаксационных параметров раствора, а также геометрических параметров трубы:

$$De = a_0 \cdot \theta^{a_1} \cdot Re_0^{a_2}; \tag{7}$$

$Re_0$  – число Рейнольдса при условии отсутствия присадки;  $\lambda_0$ ,  $\lambda_n$  – коэффициент гидравлического сопротивления до и после добавления в раствор присадки соответственно;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , – эмпирические коэффициенты;  $\theta$  – концентрация присадки, г/т;  $m$  – эмпирический режимный коэффициент.

Основным преимуществом данной зависимости является ее простота применения. Малое количество исходных данных в совокупности с получением значения коэффициента гидравлического сопротивления делает это выражение оптимальным для оценки зависимости изменения гидравлических характеристик трассы от концентрации присадки. Недостатком является то, что для данной зависимости необходимы эмпирически подтвержденные коэффициенты. Также данная формула применима только для определенных пар «нефтепродукт – присадка», что снижает область ее применения.

Авторы статьи [3] предлагают обобщенное выражение коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\lambda_f = 0,11 \cdot \left( \frac{Z + \varepsilon + X^{1,4}}{115 \cdot X + Y + 1} \right)^{0,25}, \tag{8}$$



где  $\varepsilon = \frac{k_2}{D}$  – отношение шероховатости к диаметру трубопровода;  $Z = \frac{68}{Re_f}$  – параметр смешанного трения, где  $Re_f$  – число Рейнольдса с присадкой.

Формулы определения коэффициентов  $X$ ,  $Y$ :

$$X = (28 \cdot Z)^{10}; \tag{9}$$

$$Y = A \cdot C^p \cdot \varepsilon^q, \tag{10}$$

где  $A$ ,  $p$ ,  $q$  – параметры, определенные эмпирическим путем.

Данная функциональная зависимость основана на определении влияния противотурбулентной присадки на коэффициент гидравлического сопротивления путем введения поправочных коэффициентов. Опытно-промышленные испытания показывают, что для различных пар «ПТП – перекачиваемый продукт» коэффициент расхождения расчетов от фактического показателя не превышает 10 %, что является хорошим показателем. Полученные данные значительно упрощают гидравлический расчет линейной части трубопровода.

Отрицательной стороной является то, что для расчета необходима документация завода-производителя с определенными эмпирическими коэффициентами для пар «ПТП – перекачиваемый продукт».

В работе [4] предлагается формула:

$$\lambda_f = \frac{1,6364}{\{\ln[1 + A_1(C)] \cdot W_f\}^2}, \tag{11}$$

где  $W_f$  – отношение шероховатости к диаметру трубопровода:

$$W_f = \frac{Re_f}{Re_f \cdot \frac{0,1 \cdot k_2}{D} + 7}; \tag{12}$$

$A_1(C)$  – параметр смешанного трения, где  $Re_f$  – число Рейнольдса с присадкой:

$$A_1(C) = \frac{1}{W_f} \cdot \exp[\ln W_f \cdot (1 - \frac{\psi(C)}{100})^{-0,5}] - 1. \tag{13}$$

Формула по определению коэффициента  $\psi(C)$ :

$$\psi(C) = \frac{C}{k_0 + k_1 C + k_2 C^2}, \tag{14}$$

где  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  – параметры, определенные эмпирическим путем.

Положительной стороной данных формул является справедливость для двух зон течения жидкости: зоны смешанного трения и зоны гидравлически гладких труб. Погрешность зависимости при оценке гидродинамических параметров потока не превышает 4 %. Отрицательной стороной является необходимость в исходных данных, полученных в лабораторных условиях.

Зависимости по определению параметров воздействия противотурбулентных присадок на транспортируемую жидкость в большинстве своем делятся на зависимости, выведенные на основе реологических моделей (примером является зависимость (1)), либо на основе корректировки коэффициента гидравлического сопротивления путем введения поправочного коэффициента ((8), (11)). Зависимости первой группы точнее описывают процесс «эластичной турбулентности», но не подразумевают определения гидравлических параметров, поэтому они менее применимы для инженерных гидравлических расчетов. Зависимости второй группы, напротив, позволяют определить коэффициенты гидравлического сопротивления, числа Рейнольдса и прочие расчетные критерии. Работают такие зависимости в прямом и обратном направлении и вследствие своей гибкости применимы для гидравлических расчетов. Проблема данных зависимостей состоит в том, что они применимы для определенных пар «продукт – ПТП» и, в большинстве своем, справедливы только для одного режима течения. Помимо этого, данные зависимости не позволяют производить расчеты без эмпирических коэффициентов, что подразумевает под собой контакт проектной организации, производящей расчеты, с заводом-изготовителем противотурбулентных присадок.

**Литература:**

1. Манжай В.Н. Физико-химические аспекты турбулентного течения разбавленных растворов полимеров : дис. ... д-ра хим. наук : 02.00.04, 02.00.06 / Владимир Николаевич Манжай; Том. гос. ун-т. – Томск, 2009. – 227 с.
2. Поберезкин А.А. Влияние противотурбулентных присадок на параметры работы магистральных трубопроводов / А.А. Поберезкин, Раед Аль-Дандал, О.Я. Хлиева, И.О. Кузнецов // Харчова наука і технологія. – 2013. – № 4. – С. 126–129.
3. Черников В.А. Обобщенная формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления магистральных трубопроводов для светлых нефтепродуктов и маловязких нефтей / В.А. Черников, А.В. Черников // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 4(8). – С. 64–66.
4. Муратова В.И. Оценка Влияния противотурбулентных присадок на гидравлическую эффективность нефтепродуктопроводов полимеров : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Муратова Вера Ивановна ; Уфим. гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа, 2014. – 149 с.

**References:**

1. Manzhay V.N. Physico-chemical aspects of the turbulent flow of dilute polymer solutions: diss. ... doct. chem. sciences : 02.00.04, 02.00.06 / Vladimir Nikolaevich Manzhay; Tomsk State University. – Tomsk, 2009. – 227 p.
2. Poberezkin A.A. The influence of anti-turbulent additives on the parameters of the main pipelines / A.A. Poberezkin, Raed Al-Dandal, O.Ya. Khlieva, I.O. Kuznetsov // Kharchova Science and Technology. – 2013. – № 4. – P. 126–129.
3. Chernikin V.A. Generalized formula for calculating the hydraulic resistance coefficient of main pipelines for light oil products and low-viscosity oils / V.A. Chernikin, A.V. Chernikin // Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products. – 2012. – № 4(8). – P. 64–66.
4. Muratova V.I. Assessment of the effects of anti-turbulent additives on the hydraulic efficiency of oil pipelines of polymers : diss. ... cand. techn. science : 25.00.19 / Muratova Vera Ivanovna; Ufa State Oil Technical University. – Ufa, 2014. – 149 p.