

DOI.org/10.5281/zenodo.1196705  
УДК 532.5.622.32(076)

В.А. Зверева, А.В. Балабуха

ЗВЕРЕВА ВАЛЕНТИНА АЛЕКСАНДРОВНА – к.т.н., доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений, e-mail: v.zvereva2010@yandex.ru

БАЛАБУХА АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – студент, e-mail: dein500@mail.ru

Инженерная школа

*Дальневосточный федеральный университет*

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

## Применение полимерных добавок для повышения эффективности магистральных нефтепроводов

**Аннотация:** Сегодня в нефтегазовой промышленности наблюдается стойкий интерес к использованию полимерных добавок (противотурбулентных присадок) при транспортировании нефти и нефтепродуктов. Сложность решений по определению критериев применения противотурбулентных агентов и проблема отсутствия достоверных методик оценки эффективности их применения для снижения стоимости строительства и эксплуатации требуют дополнительных исследований. Известные расчетные зависимости для определения влияния полимерных добавок на эффективность работы трубопроводного транспорта являются эмпирическими, вследствие чего решение этих уравнений требует огромных временных затрат на получение ответа в каждом конкретном случае.

В статье представлена авторская программа расчета, позволяющая быстро и с высокой степенью точности определять потери напора и давления, а также величину коэффициента трения  $\lambda$ , влияющего на эти потери. Программа учитывает род перекачиваемой жидкости (вязкость, плотность), ее расход, диаметр трубопровода, вид и концентрацию полимерных добавок. На основе созданной программы предложена методика снижения стоимости и затрат на эксплуатацию проектируемого магистрального нефтепровода за счет использования полимерных добавок для уменьшения потерь напора и диаметра трубопровода. Для проверки возможностей нашей программы были выполнены экспериментальные исследования влияния полиакриламида на величину потерь напора и давления. Верификация расчетных и экспериментальных значений показала их расхождение в пределах 3%.

**Ключевые слова:** полимерные добавки, полиакриламид, гидравлические сопротивления, расход, потери напора, концентрация полимера, противотурбулентные присадки.

### Введение

Ценообразование любой продукции зависит от затрат на ее транспортировку от источника или района добычи к месту переработки и далее к потребителю: снижая эти затраты, производитель может снизить себестоимость конечной продукции.

Магистральный нефтепровод, протяженность которого десятки, сотни и тысячи километров, а диаметры труб достигают 1200 мм, транспортирует огромные объемы нефти. Это сложный производственно-технологический комплекс, в состав которого входят трубопровод с ответвлениями и лупингами, насосные станции, запорная и регулирующая арматура (вентили, задвижки), резервуары, узлы подключения нефтеперекачивающих станций (НПС) и т.п.

Основная задача проектирования и строительства нефтепровода – обеспечить оптимальный режим его работы, т.е. минимальные затраты на транспортирование нефти, минимальные строительные затраты, конструкционную надежность работы. Решение этих задач зависит от многих факторов, влияющих на работу системы: объемы и физические свойства перекачиваемой нефти, диаметр и материал трубопровода, температурный режим окружающей среды и т.п. Кроме того, в процессе проектирования необходимо предусматривать мероприятия, обеспечивающие минимальный экологический ущерб при строительстве и дальнейшей эксплуатации магистрального трубопровода. Для снижения затрат на строительство и эксплуатацию трубопроводов исследователи предлагают использование полимерных добавок.

Возможность применения противотурбулентных присадок (ПТП) для снижения потерь энергии движущейся жидкости рассматривалась в ряде работ [4, 5, 7, 10]. Так, влияние полимеров на снижение коэффициента гидравлического сопротивления трения  $\lambda$  изучали Ю.А. Войтинская, Ю.А. Альтшуль, Ю.Г. Абросимов, Хоанг Зань Бинь, Г.М. Лебедев и др. [1, 2, 9]. Для снижения гидравлических сопротивлений при движении воды в трубах использовались водные растворы полимеров типа ПАА, ПЭО, ПЭС [1, 2, 4, 8]. В [3, 6, 7, 15] исследовались ПТП FLO-XL, FLO-MXA и т.п. при движении углеводородных жидкостей в трубах. В то же время эти авторы рассматривали отдельные типы ПТП и ограниченные диапазоны значений параметров трубопроводной системы, поэтому не представляется возможным перенести результаты этих исследований на другие условия эксплуатации трубопроводов с применением различных типов полимерных добавок.

Цель настоящей работы: на основе наших исследований и исследований других авторов оценить возможность применения ПТП для снижения проектного диаметра трубопровода, чтобы обеспечить соответствующий потенциал энергосбережения, а также представить программный комплекс для автоматизации процесса проектирования и эксплуатации магистральных нефтепроводов с применением ПТП в широком диапазоне полимерных добавок и параметров трубопроводной системы.

### Влияние полимеров и диаметра трубы на стоимость строительства трубопровода

При транспортировании нефти по трубам энергия потока, полученная от насосной станции, при дальнейшем движении по трубопроводу постоянно уменьшается, так как ее часть тратится на преодоление гидравлических сопротивлений и тепловые потери.

Потери энергии жидкости, движущейся по трубопроводам, складываются из потерь на преодоление гидравлических сопротивлений трения и потерь энергии на участках местных сопротивлений (задвижки, вентили, тройники, повороты трубы и т.д.). Потери энергии зависят от количества перекачиваемой нефти (расхода нефти  $Q$ ), диаметра нефтепровода ( $d$ ), материала трубопровода, физических свойств нефти, температуры окружающей среды, от количества и вида местных сопротивлений.

Потери энергии на преодоление гидравлических сопротивлений трения для круглых труб могут быть определены по уравнению Дарси

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $l$  – длина трубы (м);  $d$  – внутренний диаметр трубы (м);  $V$  – средняя скорость движения жидкости в трубе (м/с), которая определяется по уравнению

$$V = 1,27 \frac{Q}{d^2}, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход жидкости в трубе (м<sup>3</sup>/с).

В технике при гидравлическом расчете нефтепроводов на участках с равномерным движением жидкости ( $d=\text{const}$ ) принято определять потери давления ( $\Delta p$ ) (Па), связанные с потерями напора, зависимостью

$$\Delta p_{\text{дл}} = h_{\text{дл}} \rho g = 0,5 \lambda \frac{l}{d} V^2 \rho. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что значительно уменьшить потери давления, т.е. снизить потери энергии, можно увеличением диаметра трубопровода ( $d$ ) или снижением коэффициента трения  $\lambda$ . Но увеличение диаметра трубы увеличивает строительную стоимость трубопровода, его металлоемкость, включая увеличение размеров всей трубопроводной арматуры. Вместе с тем увеличивается расход материала для защиты труб от коррозии, объем земляных работ, стоимость укрепления стенок траншеи для укладки трубопровода и разрушительное воздействие строительства трубопровода на окружающую среду.

Для уменьшения коэффициента трения  $\lambda$  и гидравлических сопротивлений в последние годы успешно применяются специализированные растворы полимеров, представляющие собой соединения с высокомолекулярной массой и линейной структурой молекул. Исследования, проведенные в Институте механики Московского университета, НИИ противопожарной обороны МЧС [3] и других научных организациях [5, 7, 10], показали, что небольшое количество линейных высокомолекулярных полимеров – полиакриламида (ПАА), полиэтиленоксида (ПЭО), полилюкса, гуаровой смолы, поливинилового спирта (ПВС) и т.п. – веществ, растворенных в жидкости, обладает способностью значительно снижать гидравлические сопротивления в турбулентных потоках. Достаточно нескольких миллионных долей полимера в жидкости, чтобы существенно уменьшить турбулентность потока и, соответственно, гидравлические сопротивления [1]. Это явление известно под названием эффект Томса. В 1948 г. английский химик Томс установил, что при добавлении в воду полимерных соединений трение между турбулентным потоком и трубопроводом значительно снижается [15].

Для уменьшения гидравлических сопротивлений в нефтепроводах применяют противотурбулентные присадки FLO XL, FLO MXA, M-FLOWTREAT и др., содержание активного полимера в которых составляет до 25% [10, 12].

Для жидкостей, движущихся без полимерных добавок, коэффициент трения  $\lambda$  в общем случае зависит от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости трубопровода ( $\frac{\Delta\vartheta}{d}$ )

$$\lambda = f(Re; \frac{\Delta\vartheta}{d}), \quad (4)$$

где  $\Delta\vartheta$  – эквивалентная шероховатость трубы.

По данным Ю.А. Альтшуля [2] и Ю.А. Войтинской [5], при движении воды в трубопроводах с добавками полимеров коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  при турбулентном режиме движения жидкости может быть рассчитан по формуле

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \left( \frac{2,8V_{nop}^*}{v\sqrt{\lambda}} \right)^\beta / 5,75 \left( \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta\vartheta}{3,701} \right) \right], \quad (5)$$

где  $V_{nop}^*$  – пороговая динамическая скорость (м/с), при которой начинается снижение потерь напора;  $\beta$  – коэффициент, зависящий от вида полимера и его концентрации. Например, для полиакриламида Ю.А. Войтинская [5] рекомендует принимать  $V_{nop}^* = 0,05$  м/с, а  $\beta$  при ( $0,005\% < C < 0,012\%$ ) – находить по эмпирической формуле

$$\beta = 1000 \cdot C, \quad (6)$$

где  $C$  – объемная концентрация полимера (%).

При  $C = 0$ ;  $\beta = 0$ , т.е. при отсутствии полимерной добавки, уравнение (5) преобразуется в известную формулу Кольбука–Уайта:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \left( \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta\vartheta}{3,701} \right) \right], \quad (7)$$

т.е. в одно из расчетных уравнений гидравлики для определения  $\lambda$  при движении жидкости без полимерных добавок.

Было установлено [1, 2, 8, 10], что при наличии полимерных добавок коэффициент трения  $\lambda$ , а значит и потери давления в трубопроводе, зависят не только от числа Рейнольдса и шероховатости внутренней поверхности трубы, но и от вида вводимого полимера и его концентрации:

$$\lambda = f(Re; \frac{\Delta\vartheta}{d}; C; V_{nop}^*), \quad (8)$$

где  $C$  – объемная концентрация полимера,  $V_{пор}^*$  – переменная, значение которой зависит от вида применяемой добавки и определяется из справочных материалов [4].

### Влияние полимерной добавки и числа Рейнольдса на коэффициент трения

На кафедре инженерных систем зданий и сооружений Инженерной школы Дальневосточного федерального университета в 2016 г. нами проводились эксперименты по определению коэффициента трения  $\lambda$  на установке с насосной подачей жидкости в напорный резервуар, из которого водный раствор полиакриламида с концентрацией 0,01% поступал в трубу диаметром  $d = 10$  мм (рис. 1). Исследования проводились в диапазоне чисел  $Re$  от 5000 до 15000, потери напора определялись по разности показаний пьезометров, расположенных на расстоянии  $l = 1$  м, а коэффициент  $\lambda$  определялся из уравнения (1).



Рис. 1. Экспериментальная установка для определения коэффициента трения  $\lambda$ .

В исследуемом диапазоне чисел  $Re$  нами были рассчитаны коэффициенты трения  $\lambda$  для чистой воды по уравнению А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{\Delta z}{d} \right)^{0,25}, \quad (9)$$

где  $\Delta z$  принималось равным 0,1 мм; для водного раствора полимера несколько значений  $\lambda$  определялись по уравнению Ю.А. Войтинской (5).

Результаты экспериментальных и расчетных данных по уравнениям (5) и (7) с использованием разработанной программы представлены на рис. 2.

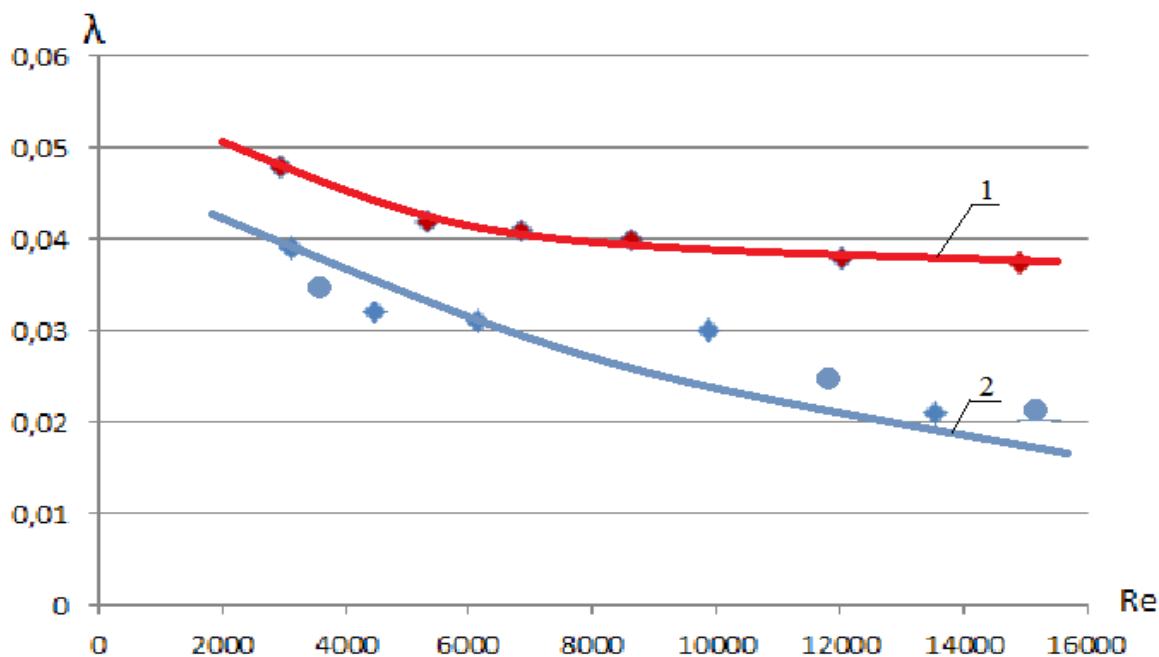


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения  $\lambda$  от числа Re:  
 1 –  $\lambda$  для чистой воды по уравнению (7), 2 –  $\lambda$  для водного раствора ПАА.  
 • – значения  $\lambda$ , полученные по уравнению (5); ♦ – экспериментальные значения.

### Определение значений коэффициента трения $\lambda$ с помощью авторской программы

Для упрощения расчетов, связанных с определением коэффициента трения  $\lambda$  по уравнениям (5), (7) и (9), нами была написана специализированная программа на языке программирования C++, с помощью которой удалось в кратчайшие сроки определить необходимые значения коэффициента трения  $\lambda$ . По результатам проделанной работы было получено соответствующее свидетельство [13]. Программа дала возможность оценить эффективность полимерной добавки ПАА при различных параметрах трубопроводной системы (расход, диаметр, вязкость перекачиваемой жидкости, шероховатость стенок трубопровода, вид и концентрация полимера)\*.

Наши экспериментальные данные показали возможность снижения коэффициента трения  $\lambda$  в среднем в 1,5 раза при использовании полимерных добавок, что согласуется с аналитическим расчетом, проведенным с помощью разработанной программы [13], а также с исследованиями других авторов [8, 11].

Эффект снижения коэффициента трения  $\lambda$  при использовании противотурбулентных присадок можно применить для решения обратной задачи, т.е. для уменьшения диаметра трубопровода и снижения строительных затрат трубопроводной системы. Расчеты показывают, что, используя полимерные добавки, снижающие коэффициент трения  $\lambda$  в 1,5 раза, можно уменьшить диаметр проектируемого нефтепровода на 20% в пределах проектных потерь напора. Уменьшение диаметра трубопровода сокращает металлоемкость системы, а также экологический ущерб, связанный с прокладкой магистрального нефтепровода. Кроме того, уменьшение диаметра трубы снижает и напряжения, возникающие в трубопроводе под давлением жидкости, тем самым повышая надежность его работы.

Окружные растягивающие напряжения  $\sigma$  в стенках трубы рассчитываются по уравнению Мариотта

\*Результаты нашей работы были представлены на научно-практической конференции ООО «Транснефть – Дальний Восток» в Хабаровске и награждены дипломом I степени. Руководство компании выразило высокую заинтересованность в продолжении исследований и обозначило наиболее перспективные направления дальнейшей работы.



$$\sigma = \frac{\rho d}{2\delta}, \quad (10)$$

где  $\delta$  – толщина стенки трубопровода (м),  $\rho$  – давление жидкости внутри трубы (Н/м<sup>2</sup>).

Уравнение (10) показывает, что надежность работы трубопровода в процессе его эксплуатации возрастает с уменьшением диаметра и увеличением толщины стенки трубы.

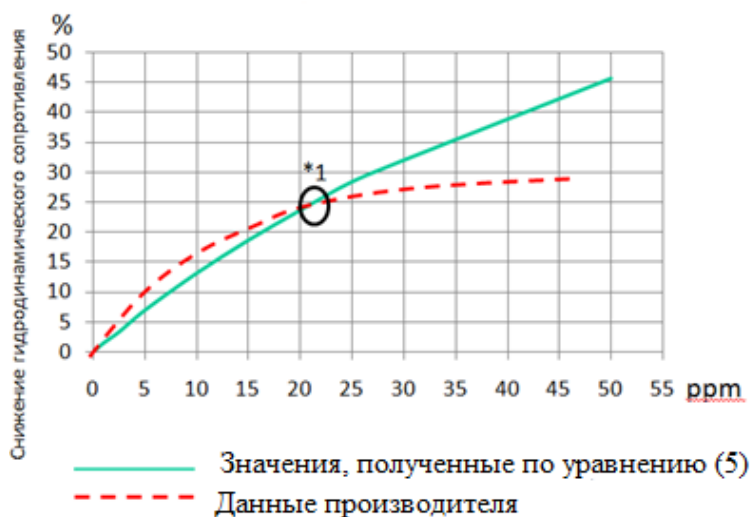
Необходимость обеспечения надежности работы магистральных трубопроводов оговорена в соответствующем приказе Федеральной службы по экологическому и атомному надзору от 6 ноября 2013 года [12], который предусматривает для наиболее опасных участков в линейной части проектной документации следующие специальные меры безопасности, снижающие риск аварий:

- увеличение толщины стенки трубопровода;
- ограничение диаметра;
- увеличение глубины залегания трубопровода;
- повышение требования к категории защитного покрытия и т.д.

Обозначенные выше положения могут быть реализованы при снижении проектного диаметра трубопроводной системы, так как этот параметр определяет объем проведения земляных работ и влияние процесса строительства трубопровода на окружающую среду, одновременно обеспечивая повышение надежности его работы.

С помощью разработанной нами программы была рассчитана эффективность современной высокомолекулярной противотурбулентной полимерной присадки FLO-MXA (рис 3). В расчетах параметры трубопровода и перекачиваемой жидкости приняты постоянными. Для оценки эффективности присадки была рассчитана зависимость снижения коэффициента гидравлического сопротивления от концентрации полимерной присадки.

График (рис. 3) показывает, что расхождение полученных с помощью разработанной программы значений  $\lambda$  наблюдается после прохождения точки оптимальной концентрации полимерной присадки, после которой эффективность снижения коэффициента гидравлического сопротивления от увеличения концентрации присадки снижается.



**Рис. 3. Сравнение рассчитанной эффективности противотурбулентной присадки FLO-MXA с практическими данными ее применения:**

**\*1 – оптимальное значение концентрации противотурбулентной присадки, после которой наступает снижение эффективности, 1 ppm=0,0001% объемной доли.**

### Обсуждение результатов

По нашему мнению, снижение коэффициента трения  $\lambda$  (рис. 3) объясняется тем, что в выбранном за основу для расчетов уравнении (5) и, соответственно, в представленной программе не учтено изменение вязкости раствора полимерной присадки с изменением доли присадки в растворе. Работа по этому направлению является одной из приоритетных задач наших дальнейших исследований.

Установлено [3], что растворы полимеров с большей молекулярной массой обладают более высокими значениями вязкости. Вязкость раствора определяется по уравнению

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5C), \quad (11)$$

где  $\mu$  – вязкость раствора полимера (Па·с),  $\mu_0$  – вязкость растворителя (Па·с),  $C$  – концентрация полимера (%).

### Выводы

Разработанная программа дает возможность оценить эффективность применения различных типов полимерных добавок в зависимости от параметров трубопроводной системы и концентрации ПТП, а также провести расчет оптимальной концентрации полимерной добавки. Основываясь на проведенных расчетах, было установлено, что уменьшение диаметра трубопровода за счет применения полимерных добавок при трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов имеет существенный потенциал технико-экономического сбережения в пределах 20% уменьшения проектного диаметра трубопроводной системы. Противотурбулентные присадки для этих целей могут быть использованы как на отдельных участках трубопровода, так и в целом по всей магистрали, снижая экологическую нагрузку в зонах прокладки трубопровода.

В перспективе планируется создание программного комплекса для расчета оптимального диаметра магистрального трубопровода, соответствующего минимальным эксплуатационным и капитальным затратам в зависимости от вида и концентрации применяемой противотурбулентной присадки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов Ю.Г., Хоанг Зань Бинь. Эффект аномального снижения гидравлического сопротивления при введении в поток линейных высокомолекулярных полимеров // Технологии техносферной безопасности: научный интернет-журнал. 2009. № 1. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 10.02.2017).
2. Альтшуль Ю.А. Снижение гидравлических сопротивлений трубопроводов, транспортирующих воду // Водоснабжение и сантехника. 1973. № 5. С. 5–8.
3. Белоусов Ю.П., Сухова И.И., Коваль Л.Б., Гареев М.М. Полимерные присадки для снижения гидродинамического сопротивления нефти // Нефтяное хозяйство. 1991. № 5. С. 36–37.
4. Валиев М.И., Жолобов В.В., Тарновский Е.И. К вопросу о механизме действия высокомолекулярных полимерных противотурбулентных присадок // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 3. С. 11–18.
5. Войтинская Ю.А. Исследование методов повышения пропускной способности трубопроводов, транспортирующих воду: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.23.04) / Моск. инж.-строит. ин-т им. В.В. Куйбышева. М.: [б. и.], 1973. 20 с.
6. Гареев М.М. Повышение эффективности магистральных нефтепроводов на основе использования агентов снижения гидравлического сопротивления и совершенствования системы учета нефти: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Уфа, 2006. 24 с.
7. Гольянов А.И., Жолобов В.В., Несын Г.В., Семин С.Л., Ширяев А.М. Снижение гидродинамического сопротивления при течении углеводородных жидкостей в трубах противотурбулентными присадками // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. № 2. С. 80–87.
8. Жолобов В.В., Варыбок Д.И., Морецкий В.Ю. К вопросу определения функциональной зависимости гидравлической эффективности противотурбулентных присадок от параметров транспортируемой среды // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 4. С. 52–57.
9. Лебедев Г.М. Снижение гидравлического сопротивления труб с помощью добавок полиакриламида // Сб. тр. МИНТ. 1976. № 521. С. 58–61.

10. Лисин Ю.В., Семин С.П., Зверев Ф.С. Оценка эффективности противотурбулентных присадок по результатам опытно-промышленных испытаний на магистральных нефтепроводах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 3. С. 6–11.
11. Муратова В.И. Оценка влияния противотурбулентных присадок на гидравлическую эффективность нефтепродуктопроводов: дис. ...канд. техн. наук. Уфа, 2014. 145 с.
12. Приказ Ростехнадзора от 06.11.2013 № 520 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов» (Зарегистрировано в Минюсте России 16.12.2013 № 30605).
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660703. Программа для расчета коэффициента трения  $\lambda$  раствора полимерных присадок / А.В. Балабуха, В.А. Зверева; рег. 20 сент. 2016.
14. Baker Hughes: сайт компании. URL: <https://www.bakerhughes.com/> (дата обращения: 07.03.2017).
15. Toms B.A. Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers. Proceeding Intern. Congress on Rheology. Amsterdam, North Holland Publishing Co., 1949, vol. 2, pp. 135–141.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)



## Geology and Geophysics

DOI.org/10.5281/zenodo.1196705

Zvereva V., Balabukha A.

VALENTINA ZVEREVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Engineering Systems of Buildings and Constructions, School of Engineering  
e-mail: v.zvereva2010@yandex.ru

ALEXEY BALABUKHA, Student, School of Engineering, e-mail: dein500@mail.ru  
*Far Eastern Federal University*  
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

### Application of polymeric additives for increasing the efficiency of main oil pipelines

**Abstract:** Nowadays, in oil and gas industries, there is a steady interest in the use of polymeric additives (anti-turbulent ones) when transporting oil and petroleum products. The complexity of determining the criteria for anti-turbulent agents and the absence of methods of assessing their application to reduce the cost of construction and exploitation require further investigations. The existing equations for determining the impact of polymer additives on the efficiency of pipelines are empirical, and their solution is highly time-consuming. The authors have developed a calculating computer programme that enables one to determine pressure losses and the friction coefficient  $\lambda$  affecting those losses quickly and with high accuracy. It takes into account the kind of fluid being pumped (its viscosity and density) as well as the flow rate, pipeline diameter, and type and concentration of polymer additives. Basing on the programme, the method of reducing operating expenses of the pipeline through the use of polymeric additives has been developed. The comparison of the estimated and experimental values demonstrates that difference between them makes up 3 per cent.

**Key words:** polymer additives, polyacrylamide, hydraulic resistance, flow rate, pressure losses, construction cost, the concentration of polymer, operating costs, drug reduction additives.

#### REFERENCES

1. Abrosimov U.G., Hoang Zan Binh. The effect of an abnormal decrease in hydraulic resistance when introducing linear high-molecular polymers into the flow. *Technology of technospheric security: an online journal*. 2009;1. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> – 10.02.2017.
2. Altshul U.A. Reduction of hydraulic resistance of pipelines that transport water. *Water supply and plumbing*. 1973;5:5–8.
3. Belousov U.P., Sukhova I.I., Koval L.B., Gareev M.M. Polymeric additives to reduce the hydrodynamic resistance of oil. 1991;5:36–37.
4. Valiev M.I., Zholobov V.V., Tarnovsky E.I. On the mechanism of action of high-molecular polymeric counter-turbulent additives. *Science and Technologies of Pipeline Transport of Oil and Oil Products*. 2013;3:11–18.
5. Voitinskaya U.A. The study of methods to improve throughput of pipelines, transporting water: abstract dis. on competition of a scientific degree of Candidate of Technical Sciences. M., 1973, 20 p.
6. Gareev M.M. Increasing the efficiency of trunk oil pipelines based on the use of agents to reduce hydraulic resistance and improve the system of oil metering: the author's abstract. dis. Doc. Tech. Sciences. Ufa, 2006, 24 p.
7. Golyanov A.I., Zholobov V.V., Nesyn G.V., Semin S.L., Shiryayev A.M. Reduction of the hydrodynamic resistance in the flow of hydrocarbon fluids in pipes with anti-turbulent additives. *Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products*. 2012;2:80–87.

8. Zholobov V.V., Varybok D.U. To the problem of determining the functional dependence of the hydraulic efficiency of anti-turbulent additives on the parameters of a transported medium. *Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products*. 2011;4:52–57.
9. Lebedev G.M. Decrease in hydraulic resistance of pipes with the help of additives of polyacrylamide. *Sb. tr. MINT*. 1976;521:58–61.
10. Lisin U.V., Semin S.P., Zverev F.S., Estimation of the effectiveness of anti-turbulent additives based on the results of pilot-industrial testers on main oil pipelines. *Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products*. 2013;3:6–11.
11. Muratova V.I. Estimation of the influence of anti-turbulent additives on the hydraulic efficiency of oil product pipelines: dis. cand. tech. sciences. Ufa, 2014, 145 p.
12. Order of Rostekhnadzor from 06.11.2013 N 520 On approval of the Federal rules and regulations in the field of industrial safety "Safety rules for hazardous production facilities of main pipelines" (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 16.12.2013 N 30605).
13. Balabukha A.V., Zvereva V.A. Certificate of state registration of the computer program N. 2016660703. Program for calculating the friction coefficient  $\lambda$  of a polymer additive solution. Date of state registration in the registry of computer programs Sept. 20, 2016.
14. The site of Baker Hughes. URL: <https://www.bakerhughes.com>. – 07.03.2017.
15. Toms B.A. Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers. *Proceeding International Congress on Rheology*. Amsterdam, North Holland Publishing Co., 1949, vol. 2, pp. 135–141.