

**ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ УГЛЕВОДОРОДОВ
С ПОЛИМЕРНЫМИ ПРИСАДКАМИ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ
PIPELINE TRANSPORT OF HYDROCARBONS WITH POLYMER
ADDITIVES IN THE ARCTIC CONDITIONS**

В. Н. Манжай, А. В. Поликарпов

V. N. Manzhai, A. V. Polikarpov

Институт химии нефти СО РАН, г. Томск

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Ключевые слова: полимер; температура; углеводородная жидкость; гидродинамическое сопротивление; вязкость

Key words: polymer; temperature; hydrocarbon fluid; hydrodynamic drag force; viscosity

Растворение в турбулентном потоке образца полимера большой молекулярной массы ($M_r > 1 \cdot 10^5$) сопровождается увеличением скорости турбулентного течения более вязкого полимерного раствора по сравнению со скоростью течения исходного маловязкого растворителя. Наблюдаемый эффект (эффект Томса) является следствием уменьшения коэффициента гидродинамического сопротивления (λ), входящего в уравнение Дарси — Вейсбаха

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{4\pi^2 \cdot R_w^5} \cdot \rho \cdot Q^2,$$

в соответствие с которым в присутствии макромолекул полимера происходит либо увеличение объемной скорости турбулентного течения при заданном перепаде давления ($\Delta P = \text{const}$), либо уменьшение потерь давления на трение при постоянном объемном расходе ($Q = \text{const}$).

Лабораторные исследования влияния полимерных добавок очень малых концентраций на величину объемного расхода при разной температуре проводили на турбулентном реометре, описанном в работах [1, 2]. Основным рабочим элементом турбореометра являлась трубка, радиус которой составлял $R_w = 0,88 \cdot 10^{-3}$ м, а длина равнялась $L = 0,76$ м. В качестве объектов исследования использовали растворы синтетического полибутадиена ($M_r = 6,6 \cdot 10^5$) в толуоле различных концентраций. Число Рейнольдса вычисляли по известной формуле $Re = 2Q/\pi \cdot \nu \cdot R_w$, а коэффициент гидродинамического сопротивления рассчитывали по преобразованной формуле Дарси — Вейсбаха

$$\lambda = \frac{4\pi^2 \cdot R_w^5}{\rho \cdot L} \cdot \frac{\Delta P}{Q^2} = K \cdot \frac{\Delta P}{Q^2}.$$

При ламинарном течении в соответствии с уравнением Пуазейля между заданным перепадом давления (ΔP) на рабочем участке трубы (L и R_w) и объемным расходом (Q) существует линейная зависимость

$$Q_{\text{лам}} = \frac{\pi \cdot R_w^4}{8\eta \cdot L} \cdot \Delta P,$$

а при более энергоемком турбулентном режиме течения ньютоновских жидкостей между объемной скоростью и перепадом давления реализуется степенная зависимость

$$Q_{\text{тур}} = 14,8 \cdot \left(\frac{\Delta P}{L \cdot \rho} \right)^{0,571} \cdot \left(\frac{R_w^{2,714}}{\nu^{0,143}} \right).$$

На рисунке 1 представлены графические зависимости объемной скорости от перепада давления при турбулентном течении толуола (кривая 1) и полимерных

растворов разных концентраций (кривые 2 и 3). Из рисунка видно, что при увеличении концентрации полимера становится заметным приближение функции $Q = f(\Delta P)$ к линейной зависимости, что свидетельствует о протекании возрастающей ламинаризации потока в присутствии противотурбулентных добавок.

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено [1, 3, 4], что значения коэффициентов гидродинамического сопротивления полимерных растворов (λ) расположены в области между кривой Блазиуса $\lambda_1 = 0,3164/Re^{0,25}$, которая при турбулентном режиме течения ($Re > 2\ 300$) является общей для всех низкомолекулярных (ньютоновских) жидкостей, и гипотетическим продолжением кривой Пуазейля для коэффициента гидродинамического сопротивления $\lambda_6 = 64/Re$ в области турбулентного течения (рис. 2). Величину снижения гидродинамического сопротивления (DR , %), показывающую процент уменьшения энергетических затрат на перекачку единицы объема жидкости [1, 4], принято рассчитывать по формуле

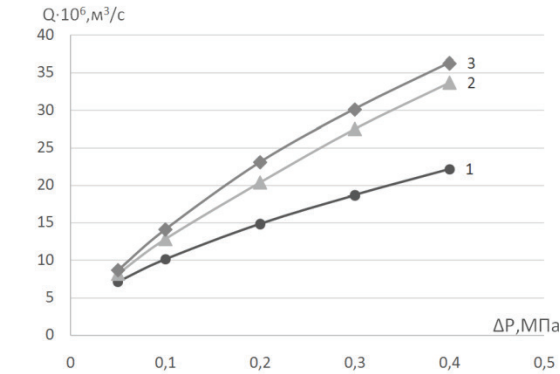


Рис. 1. Зависимость объемного расхода жидкости от перепада давления: 1 — толуол; 2 — раствор полибутадиена в толуоле ($C = 0,3 \text{ кг/м}^3$); 3 — раствор полибутадиена в толуоле ($C = 0,5 \text{ кг/м}^3$)

$$DR = \frac{\lambda_1 - \lambda}{\lambda_1}, \quad (1)$$

где λ_1 — коэффициент гидродинамического сопротивления в области турбулентного течения чистого растворителя; λ — коэффициент гидродинамического сопротивления в той же области раствора полимера.

Известным уравнением [4, 5], описывающим зависимость величины эффекта снижения гидравлического сопротивления от концентрации растворенного полимера (C), является выражение

$$DR = DR_{MAX} \frac{\alpha \cdot C}{1 + \alpha \cdot C}, \quad (2)$$

где величина DR_{MAX} — максимально достижимое значение эффекта для данного полимера; α — коэффициент, зависящий от физико-химической природы полимера и гидродинамических параметров течения. Величину DR_{MAX} рассчитывают после обработки результатов турбореометрических экспериментов при помощи линейного уравнения

$$\frac{C}{DR} = \frac{1}{\alpha \cdot DR_{MAX}} + \frac{1}{DR_{MAX}} \cdot C,$$

в котором численное значение максимального эффекта (DR_{MAX}) равно обратной величине тангенса наклона прямой, описывающей пропорциональную зависимость C/DR от C .

Приравняв левые части уравнений (1) и (2), можно получить формулу для расчета коэффициента гидродинамического сопротивления раствора полимера той или иной концентрации

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \left(1 - DR_{MAX} \cdot \frac{\alpha \cdot C}{1 + \alpha \cdot C}\right). \quad (3)$$

Как было указано выше, для кривой Блазиуса соответствует уравнение $\lambda_1 = 0,3164 / Re^{0,25}$, поэтому и коэффициент гидродинамического сопротивления раствора полимера (λ) в формуле (3) уменьшается не только при увеличении концентрации (C), но также и при росте числа Рейнольдса, то есть $\lambda = f(Re)$, что подтверждают результаты рисунка 2, типичного для всех систем полимер – растворитель. Формула (3) при достаточно высокой концентрации полимера ($C \rightarrow \infty$), когда множитель $\alpha \cdot C / (1 + \alpha \cdot C)$ становится равным единице, упрощается до вида

$$\lambda = \lambda_1 \cdot (1 - DR_{MAX}). \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что во всем исследованном нами диапазоне чисел Рейнольдса ($Re = 3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$) существуют предельно малые значения (λ_{MIN}), ниже которых коэффициент сопротивления полимерного раствора не опускается при любой концентрации. Графики зависимости $\lambda_{MIN} = f(Re)$ называются предельными или «оггибающими» линиями для растворов любой концентрации (см. рис. 2, кривая 5). Все кривые зависимости $\lambda = f(Re)$ для полимерных растворов различных концентраций лежат выше «оггибающих», а сверху они ограничены эмпирической кривой Блазиуса. Кривые, описываемые выражением (4), являются аналогом асимптоты Вирка $\lambda = 2,34 \cdot Re^{-0,58}$ для предельного снижения сопротивления [6].

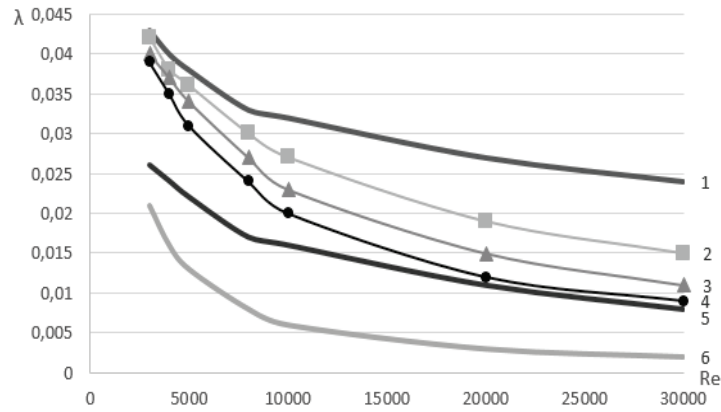


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса толуольных растворов полибутадиена различных концентраций при температуре 293 К: 1 — $\lambda_1 = 0,3164 / Re^{0,25}$ — кривая Блазиуса; 2 — 0,1 кг/м³; 3 — 0,3 кг/м³; 4 — 0,5 кг/м³; 5 — «оггибающая» кривая $\lambda_{MIN} = f(Re)$; 6 — $\lambda_6 = 64/Re$

Из рисунка 2 видно, что «оггибающая» линия (кривая 5) во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса находится на постоянном расстоянии от кривой Блазиуса, то есть $\lambda_1 - \lambda_{MIN} = const$. Если разницу коэффициентов сопротивления обозначить через величину $F = \lambda_1 - \lambda_{MIN}$, то для температуры 293 К она будет равна $F = 0,0165$. Значения этой величины F для растворов полибутадиена в толуоле при других температурах, определенные экспериментальным путем, представлены в таблице. Из таблицы следует, что при понижении температуры эффективность противотурбулентных добавок на основе полимеров повышается, так как «оггибающая» все больше приближается к кривой Пуазейля (λ_6), то есть происходит более значительная ламинаризация потока.

T, K	283	293	308	323
F	0,0170	0,0165	0,0155	0,140

Практика перекачки жидкостей свидетельствует о том, что при понижении температуры вязкость жидкостей увеличивается, следовательно, их текучесть должна уменьшаться. Но парадоксальность эффекта Томса проявилась и в условиях низких температур. Оказалось, что при снижении температуры наблюдается также и увеличение скорости турбулентного течения жидкости в присутствии растворенного полимера (рис. 3), вследствие уменьшения коэффициента гидродинамического сопротивления. Например, в работе [7] приведен рисунок 2, из которого видно, что во всей исследованной области чисел Рейнольдса для раствора полибутадиена в толуоле постоянной концентрации ($C = 0,1 \text{ кг/м}^3$) наблюдается уменьшение коэффициента гидродинамического сопротивления при понижении температуры. Следовательно, согласно формуле (1) происходит рост величины эффекта (DR), то есть увеличение энергосбережения при использовании противотурбулентных добавок в низкотемпературных условиях. Другими словами, в соответствии с уравнением Дарси — Вейсбаха уменьшение коэффициента сопротивления (λ) при постоянном перепаде давления должно сопровождаться ростом скорости турбулентного течения полимерного раствора по сравнению со скоростью течения чистого растворителя тем заметнее, чем ниже температура.

Экспериментальные результаты (см. рис. 3) подтверждают это предположение. Из рисунка следует, поскольку вязкость чистого толуола при температуре 293 К ($\eta = 0,585 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$) больше вязкости толуола при более высокой температуре 323 К ($\eta = 0,435 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$), то закономерно, что при более низкой температуре 293 К скорость его течения меньше. Но по мере увеличения содержания полибутадиена в толуоле рост скорости течения полимерных растворов при низкой температуре становится все более заметным (см. рис. 3, кривая 1), и уже при концентрации добавки полимера выше $C > 0,3 \text{ кг/м}^3$ скорость охлажденных растворов становится больше скорости нагретых растворов (см. рис. 3, кривая 2).

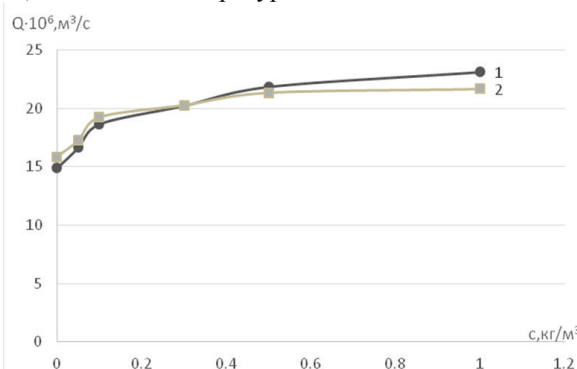


Рис. 3. Зависимость объемного расхода растворов полибутадиена в толуоле от концентрации при двух разных температурах: 1 — 293 К; 2 — 323 К

Таким образом, понижение температуры окружающей среды приводит к интенсификации процесса перекачки углеводородных жидкостей по трубопроводам в присутствии полимерных добавок. Такие температурные условия реализованы в северных широтах России, приближенных к Арктике. Для успешной реализации энергосберегающей технологии трубопроводного транспорта в суровых арктических условиях необходимо выполнение трех обязательных условий:

- хорошая растворимость используемого образца полимера в нефти и нефтепродуктах;
- дозирование в турбулентный поток жидкости полимеров сверхвысокой молекулярной массы ($M_r > 1 \cdot 10^6$);
- использование полимеров, имеющих температуры стеклования не ниже 223 К.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-43-700866 p_a
The work was supported by Russian Foundation for Basic Research Grant 16-43-700866 p_a*

Список литературы

1. Противотурбулентные присадки для снижения гидравлического сопротивления трубопроводов / М. М. Гарев [и др.] – СПб.: Недра, 2013. – 228 с.
2. Манжай В. Н. Экспериментальное изучение влияния напряжения сдвига и числа Рейнольдса на величину эффекта Томса // Известия вузов. Нефть и газ. – 2010. – № 4. – С. 85–89.
3. Хойт Д. У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1972. – № 2. – С. 1–31.
4. Белоусов Ю. П. Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
5. Манжай В. Н. Влияние концентрации полимерной добавки на снижение гидродинамического сопротивления нефти // Известия вузов. Нефть и газ. – 1987. – № 1. – С. 59–61.
6. Вирк П. С., Микли Х. С., Смит К. А. Предельная асимптота и структура среднего течения в явлении Томса // Прикладная механика. – 1970. – № 2. – С. 238–246.
7. Манжай В. Н. Влияние температуры на скорость турбулентного течения разбавленных растворов полимеров // Известия вузов. Нефть и газ. – 2010. – № 1. – С. 82–87.

Сведения об авторах

Манжай Владимир Николаевич, д. х. н., старший научный сотрудник Института химии нефти СО РАН, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Томского политехнического университета, г. Томск, e-mail: mang@ipc.tsc.ru

Поликарпов Александр Вячеславович, магистрант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений, Томский политехнический университет, г. Томск, e-mail: polikarpov93@gmail.ru

Information about the authors

Manzhai V. N., Doctor of Chemistry, Senior Researcher at Institute of Petroleum Chemistry of the SB RAS, Professor at the Department of Geology and Development of Oil Fields, Tomsk Polytechnic University, e-mail: mang@ipc.tsc.ru

Polikarpov A. V., Master's Student at the Department of Geology and Development of Oil Fields, Tomsk Polytechnic University, e-mail: polikarpov93@gmail.ru

УДК 622.692.4.053

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ INCREASING OIL FLOW CAPACITY IN EXTENDED OPERATION PIPELINES IN THE CONDITIONS OF LOW MONEY AND TIME COSTS

В. И. Суриков

V. I. Surikov

ООО Научно-исследовательский институт транспорта нефти и нефтепродуктов «Транснефть», г. Москва

Ключевые слова: магистральный нефтепровод; повышение пропускной способности; длительно эксплуатируемый трубопровод; шнековые колеса; стендовые испытания
Key words: main oil pipeline; capacity increase; long-running pipeline; screw wheels; bench tests

Современная эксплуатация магистральных трубопроводов отличается частыми изменениями объемов перекачки нефти по определенным направлениям. Это объясняется как развитием российской и мировой экономики, так и непостоянством современной политической ситуации в мире. К примеру, добыча нефти к 2016 году достигла рекордных значений для постсоветского времени. Так, за 2015 год было добыто 534 млн т, а за 2016 — 548,6 млн т, что на 2,9 % больше. При этом, согласно заседанию ОПЕК от 30 ноября 2016 года, Россия обратно снижает уровень добычи нефти на 300 тыс. баррелей, то есть 2,7 % от текущих значений.

Таким образом, объемы перекачки нефти могут претерпевать частые изменения как в меньшую, так и в большую сторону. При наступлении конъюнктуры, направленной на повышение объемов перекачки по определенным направлениям, наступает необходимость увеличения пропускной способности нефтепровода в сжатые временные рамки. Однако, учитывая непостоянство современной мировой обстановки, продолжительность перекачки повышенных объемов нефти по отдельным трубопроводам может быть небольшой, что вызывает сложности при применении капиталозатратных методов повышения пропускной способности