

УДК 541.64:532.135

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Манжай Владимир Николаевич,

д-р хим. наук, профессор каф. геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

Абдусаламов Артем Вячеславович,

аспирант кафедры высокомолекулярных соединений и нефтехимии Томского Государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

Носикова Юлия Рифкатовна,

аспирант Института химии нефти Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

Для увеличения пропускной способности нефтепроводов и снижения энергетических затрат на перемещение единицы объема жидкости используют традиционные пути уменьшения вязкости: подогрев, разбавление маловязким растворителем и введение депрессорных присадок. Вышеперечисленные методы требуют больших энергетических и материальных затрат, и они эффективны только для ламинарного режима течения, при котором объемный расход обратно пропорционален вязкости. Но в подавляющем большинстве случаев при перекачке нефти и нефтепродуктов по трубопроводам реализуется турбулентный режим течения, объемный расход при котором слабо зависит от вязкости. Поэтому в последнее время все чаще применяются энергосберегающие технологии трубопроводного транспорта с использованием противотурбулентных присадок. Дозирование в поток нефти очень малых доз полимерных добавок (несколько грамм на тонну) приводит к увеличению скорости её течения на 20–30 %. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения энергетических затрат на транспортировку нефти и нефтепродуктов (бензин, керосин и т. д.) по магистральным трубопроводам.

Цель работы: оценить возможность применения натуральных и синтетических каучуков в качестве агентов снижения гидродинамического сопротивления на магистральных нефтепроводах.

Методы исследования. Проведены исследования структуры макромолекул образцов натурального и синтетического каучука, а также бутадиенового и бутадиен-стирольного каучуков методами ИК-спектроскопии, вискозиметрии и геля-проникающей хроматографии. Турбореометрическим методом проведено исследование антитурбулентной эффективности данных образцов в различных растворителях.

Результаты. Установлен наиболее эффективный эластомер, способный снижать гидравлическое сопротивление. Определена оптимальная концентрация эластомера, необходимая для достижения максимального эффекта Томса. Рассчитаны объемы макромолекулярных клубков в различных растворителях, показано влияние растворителей на их размер, а также на величину снижения гидродинамического сопротивления эластомеров. Рассчитаны молярные массы образцов различными методами.

Ключевые слова:

Эластомер, макромолекула, полимер, турбулентность, реология, вязкость.

Введение

Каучуки в подавляющем большинстве случаев используют в качестве базовых материалов для формирования резинотехнических изделий, но они могут также применяться в энергосберегающих технологиях в качестве эффективного агента для снижения гидродинамического сопротивления при турбулентном течении углеводородных жидкостей в цилиндрическом канале. Известно, что скорость турбулентного течения разбавленных растворов полимеров выше по сравнению со скоростью течения исходного маловязкого растворителя. Этот эффект, впервые описанный Томсом [1] и получивший его имя, в настоящее время широко применяется в судоходстве для увеличения быстроходности судов, повышения дальности струй при пожаротушении, в трубопроводном

транспорте для интенсификации течения жидкостей и в некоторых других областях практической деятельности. Экспериментально установленные особенности явления снижения гидродинамического сопротивления и его практическое применение достаточно подробно описаны в многочисленных статьях и обзорах [2–6]. Но следует отметить, что большинство публикаций посвящено исследованиям эффекта Томса в водных растворах полимеров. В то же время количество статей, описывающих гидродинамические (антитурбулентные) свойства полимеров, растворимых в углеводородных жидкостях различной полярности, явно недостаточно. Классическими представителями таких полимеров являются каучуки.

Величину эффекта Томса или эффекта снижения гидродинамического сопротивления в трубе

($DR, \%$), характеризующую уменьшение энергетических затрат на перемещение единицы объёма жидкости с полимерной добавкой по сравнению с затратами на перекачку чистого растворителя, принято рассчитывать по формуле

$$DR, \% = \left[\frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s} \right] \cdot 100 \%, \quad (1)$$

в которой λ_s и λ_p – коэффициенты гидродинамического сопротивления чистого растворителя и полимерного раствора соответственно. Численные значения коэффициентов λ_s и λ_p рассчитывают после проведения экспериментов по уравнению Дарси–Вейсбаха [7–11]

$\Delta P = \lambda \frac{L}{4\pi^2 R^5} \rho Q^2$, в котором $Q = \pi R^2 U$ – объёмная скорость жидкости (объёмный расход); U – среднерасходная (линейная) скорость жидкости в трубе; $\Delta P = (P_{\text{нач}} - P_{\text{кон}})$ – потери давления на трение в трубе длины L и радиуса R ; ρ – плотность жидкости.

В многочисленных публикациях разных авторов отмечается [2, 3, 5, 12–16], что величина эффекта Томса зависит от большого числа гидродинамических параметров течения и физико-химических характеристик полимерных растворов, т. е. от напряжения сдвига и числа Рейнольдса, концентрации полимера и его молекулярной массы, вязкости, химической природы и компонентного состава растворителя, температуры и т. д. Но формула (1) в явном виде не показывает зависимость величины DR от вышеназванных параметров, поэтому для количественного описания и теоретического объяснения эффекта Томса целесообразно пользоваться уравнением (2), предложенным и обоснованным в работах [5, 6]

$$\Delta Q = \pi R^2 \Psi \tau_w \left(\frac{V_k}{\rho k T} \right)^{1/2} \left[1 - \left(\frac{k T}{\tau_w V_k} \right)^{1/2} \right], \quad (2)$$

где $\Delta Q = Q_p - Q_s$ – приращение объёмной скорости полимерного раствора (Q_p) по сравнению с объёмной скоростью растворителя (Q_s) в одинаковых гидро-

динамических условиях; $\Psi = \frac{[\eta]C}{1 + [\eta]C}$ – объёмная

доля макромолекулярных клубков в растворе, зависящая от характеристической вязкости $[\eta]$ и концентрации полимерного раствора (C);

$\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L}$ – напряжение сдвига на стенке трубы радиуса (R) и длины (L) при заданном в ней перепаде давления (ΔP); $V_k = \frac{M[\eta]}{N_A}$ – объём макромолекулярного клубка с иммобилизованным растворителем, зависящий от молярной массы полимерного образца (M) и характеристической вязкости его растворов $[\eta]$; ρ – плотность растворителя; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Экспериментальная часть

Для изучения гидродинамических свойств растворителей и полимерных растворов различных концентраций использовали турбулентный реометр, который конструктивно прост и подобен капиллярному вискозиметру. Реометр позволяет проводить измерения текучести жидкостей в ламинарном (при $Re < 2300$) и турбулентном режимах (при $Re > 2300$). В экспериментах прокачиваемой жидкости задавали различные напряжения сдвига на стенке цилиндрического канала (τ_w) и измеряли объёмные скорости течения растворителя (Q_s) и полимерных растворов (Q_p), а затем по формулам (1) и (2) проводили необходимые расчеты. Более подробное описание турбореометра приведено в работах [4, 5, 7].

На рис. 1, 2 представлены экспериментально полученные зависимости величины антитурбулентной эффективности ($DR, \%$) от напряжения сдвига на стенке цилиндрического канала (τ_w) и от концентрации (C) двух полимерных образцов в бензине (натурального каучука SVR-3L и синтетического каучука SKI-3S). Анализ ИК-спектров исследованных образцов показал, что они имеют схожую природу, т. е. являются полиизопреновыми каучуками с преимущественным (99,5 %) содержанием 1,4-цис-звеньев. Это подтверждается наличием в спектрах данных образцов интенсивной полосы поглощения 842 см^{-1} (деформационные колебания C-H при двойной связи в 1,4-цис-изопреновом звене). По литературным данным в натуральном каучуке содержится 2–4 % белков и аминокислот, 1,5–4 % ацетонового экстракта (олеиновая, стеариновая, линолевая кислоты, каротин и т. д.) и некоторые другие примеси [17–19]. Эти вещества являются природными ПАВ, которые стабилизируют коллоидную субстанцию (латекс) сока гевеи, из которого получают натуральный каучук. Для очистки натурального каучука от сопутствующих веществ провели его переосаждение этанолом из раствора полимера в гептане. В спектре образца SVR-3L после переосаждения заметно изменяется область спектра $1700\text{--}1650 \text{ см}^{-1}$, которая соответствует валентным колебаниям карбонильной группы. В частности, пропадает полоса 1629 см^{-1} , вероятно относящаяся к деформационным колебаниям N-H в амидной группе. Однако в ИК-спектре даже переосажденного натурального каучука, в отличие от синтетического каучука SKI-3S, по-прежнему присутствуют полосы поглощения 3289 и 1520 см^{-1} . Они могут характеризовать наличие гидроксильных групп.

Таким образом, хотя образцы SVR-3L и SKI-3S имеют близкую химическую природу, но, как видно из рис. 1, 2, они обладают различной антитурбулентной эффективностью. На рис. 1 концентрация обоих образцов в бензине одинакова и составляет $0,5 \text{ кг/м}^3$ (~0,05 мас. %). Гидродинамические исследования растворов проводили при варьировании напряжения сдвига в интервале от 4 до 18 Па. Результаты экспериментов, представленные на рис. 2, получены для растворов разных концентраций этих

же образцов полимеров, которые пропускались через турбулентный реометр при постоянном напряжении сдвига на стенке канала $\tau_w=18$ Па.

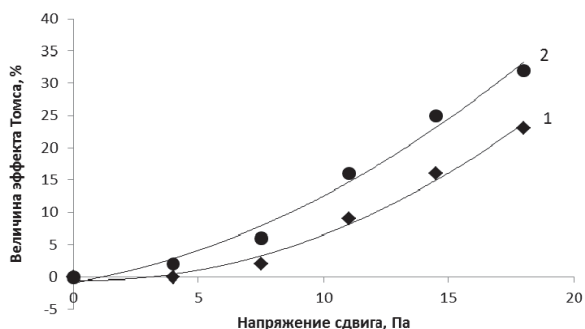


Рис. 1. Зависимость величины эффекта Томса от напряжения сдвига растворов образцов SKI-3S (1) и SVR-3L (2) в бензине

Fig. 1. Dependence of Toms effect value on shearing stress of SKI-3S (1) and SVR-3L (2) samples solutions in gasoline

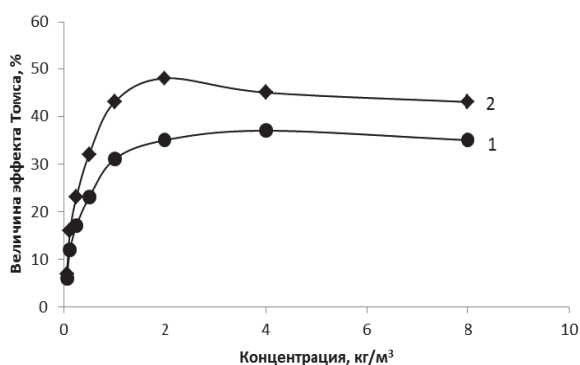


Рис. 2. Зависимость величины эффекта от концентрации растворов образцов SKI-3S (1) и SVR-3L (2) в бензине

Fig. 2. Dependence of the effect value on concentration of SKI-3S (1) and SVR-3L (2) samples solutions in gasoline

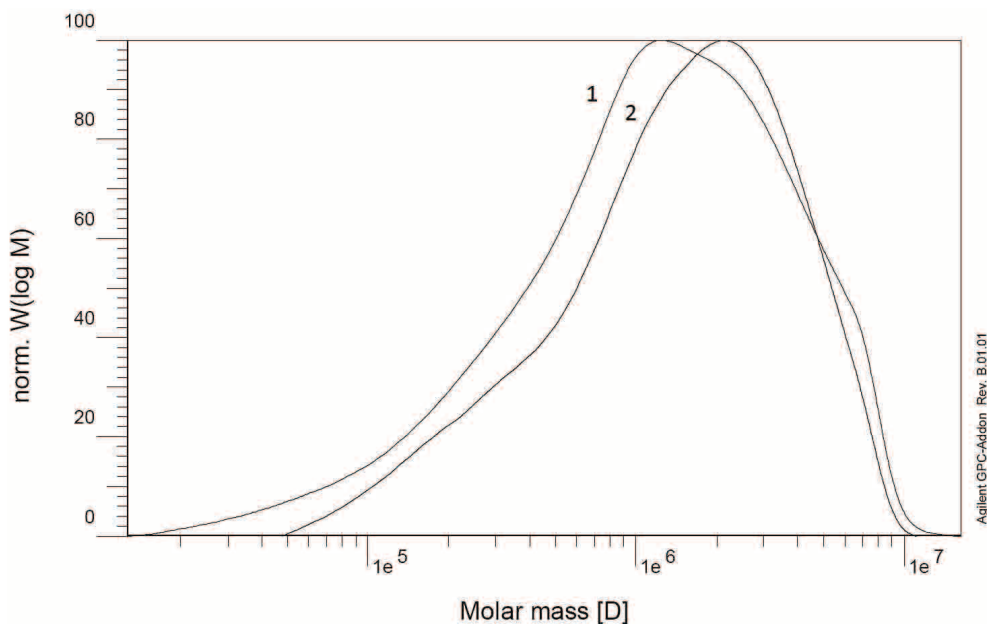


Рис. 3. Молекулярно-массовое распределение образцов SKI-3S (1) и SVR-3L (2)

Fig. 3. Molecular weight distribution of SKI-3S (1) and SVR-3L (2) samples

Обсуждение результатов

Для выяснения причины такого различия в антитурбулентной эффективности этих образцов полимеров следует обратиться к уравнению (2). Из выражения (2) следует, что величина эффекта Томса тем больше, чем больше объем макромолекулярного клубка (V_k) и, следовательно, в соответствии с преобразованной формулой Флори-Фокса

$$V_k = \frac{M \cdot [\eta]}{N_A},$$

наиболее эффективные полимерные

образцы должны обладать достаточно большой молярной массой (M).

Методом гель-проникающей хроматографии на приборе Agilent 1200 были получены следующие значения среднемассовой (M_w) и среднечисленной (M_n) молярных масс (рис. 3):

- для натурального каучука SVR-3L: $M_w=2,04 \cdot 10^6$ и $M_n=7,22 \cdot 10^5$ г/моль;
- для синтетического полиизопрена SKI-3S: $M_w=1,51 \cdot 10^6$ и $M_n=3,14 \cdot 10^5$ г/моль.

Аналитическое выражение (2) предсказывает, что полимерный раствор будет течь быстрее исходного растворителя ($\Delta Q > 0$) только при выполнении условия $[1 - (kT / \tau_w V_k)^{1/2}] > 0$, т. е. при реализации неравенства $\tau_w V_k > kT$. Таким образом, чем больше объем макромолекулярных клубков с иммобилизованным растворителем (V_k), тем при меньших значениях напряжения сдвига (τ_w) будет наблюдаться эффект.

Наряду с образцами полимеров SVR-3L и SKI-3S, имеющих молекулярные массы более одного миллиона (рис. 3), турбореометрическому тестированию подвергались и относительно низкомолекулярные полимеры другой природы: полибутадиен SB-24 ($M_w=3,28 \cdot 10^5$ и $M_n=1,31 \cdot 10^5$ г/моль) и сополимер бутадиена и стирола NS-116 ($M_w=2,19 \cdot 10^5$ и

$M_n=1,53 \cdot 10^5$ г/моль). Растворы этих образцов в бензине не снижают гидродинамическое сопротивление турбулентного течения в исследованном интервале напряжений сдвига от 1 до 20 Па. Отсутствие эффекта Томса у растворов этих образцов является следствием малых размеров макромолекулярных клубков (V_k), и для них не выполняется необходимое условие $\tau_w V_k > kT$.

Транспортируемые по магистральным трубопроводам нефть и нефтепродукты (бензин, керосин и т. д.) являются сложной смесью молекул углеводородов (алканов и циклоалканов, ароматических соединений и т. д.) различного строения и различной полярности. Растворимость полиизопрена в таких смесях зависит от их компонентного состава. Поэтому представляет несомненный интерес исследование гидродинамических свойств полимерных образцов в индивидуальных углеводородных жидкостях. Проведенными вискозиметрическими измерениями (ламинарный режим течения) определено, что характеристическая вязкость $[\eta]$ растворов натурального каучука SVR-3L в циклогексане имеет наибольшую величину, несколько меньше она в толуоле и наименьшее значение характеристической вязкости этого образца в гептане (таблица). Турбореометрическим методом установлено, что приращение объёмного расхода (ΔQ) образца натурального каучука SVR-3L также максимально в циклогексане и далее по эффективности следуют толуол и гептан. После проведения экспериментальных измерений на турбулентном реометре с целью определения величины ΔQ при помощи уравнения (2) можно рассчитывать объёмы макромолекулярных клубков (V_k) с иммобилизованным растворителем. Затем по преобразованной формуле Флори–Фокса $M = N_A V_k / [\eta]$ имеется возможность вычислять значения молярной массы (M) полимерного образца. Результаты вискозиметрических и турбореометрических измерений растворов образца SVR-3L, а также выполненных расчетов представлены в таблице.

Анализ результатов таблицы показывает, что при использовании жидкостей разной химической природы заметно меняются размеры (V_k) набухших макромолекулярных клубков. Это свидетельствует о том, что использованные растворители обладают различным термодинамическим качеством и поэтому иммобилизация молекул этих растворителей во внутренний объём полимерных клубков неодинакова. Но при этом величина молярной массы образца полимера SVR-3L, определенная методом турбулентной реометрии в различных растворителях, имеет в них практически постоянную величину ($M_w \approx 2,1 \cdot 10^6$ г/моль). Получен-

ный результат является закономерным потому, что в процессе замены растворителей и сопутствующих конформационных переходах с изменением объёмов клубков длина самой полимерной цепи не изменяется, т. е. не происходит изменения числа атомов в макромолекуле. Результат, полученный турбореометрическим методом, практически совпадает со значением среднemasсовой молекулярной массы ($M_w = 2,04 \cdot 10^6$ г/моль), определенной методом гель-проникающей хроматографии (рис. 3). Это соответствие результатов измерения молярных масс различными методами исследования подтверждает вывод, сделанный в работе [20], о том, что турбореометрия может использоваться для определения молекулярных характеристик полимерных образцов.

Таблица. Физико-химические характеристики растворов образца натурального каучука SVR-3L в растворителях разной химической природы

Table. Physico-chemical characteristics of natural rubber SVR-3L sample solutions in solvents with different chemical nature

Растворитель Solvent	$[\eta]$, м ³ /кг (m ³ /kg)	$V_k \cdot 10^{21}$, м ³ (м ³)	$M \cdot 10^{-6}$, г/моль (g/mole)
Гептан Heptane	0,31	1,1	2,13
Толуол Toluene	0,42	1,5	2,14
Циклогексан Cyclohexane	0,49	1,7	2,08

По результатам работы можно сделать ещё один вывод. В соответствии с условием $\tau_w V_k > kT$, являющимся следствием уравнения (2), и результатами, приведенными в таблице, начало проявления эффекта Томса при турбулентном режиме течения раствора образца эластомера (натуральный каучук SVR-3L) в циклогексане и толуоле будет наблюдаться при напряжении сдвига $\tau_w \sim 3$ Па, а растворов этого же образца в гептане – при более высоком напряжении, превышающем $\tau_w \sim 4$ Па. Дальнейшее увеличение напряжения сдвига в цилиндрическом канале сопровождается ростом величины эффекта Томса (рис. 1), независимо от химической природы растворителя, на основе которого приготовлен полимерный раствор.

Работа выполнена в рамках проекта «Использование противотурбулентных присадок для трубопроводного транспорта углеводородов в арктических условиях», входящего в программу Фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – V. 2. – P. 135–141.
2. Хойт Д.У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1972. – № 2. – С. 1–31
3. Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals // AJChE Journal. – 1975. – V. 21. – № 4. – P. 625–656.
4. Механизм действия, оценка эффективности и особенности получения полимерных антитурбулентных присадок для транспорта углеводородных жидкостей / Г.В. Несын, В.Н. Манжай, Ю.В. Сулейманова, В.С. Станкевич, К.Б. Коновалов // Высокомолекулярные соединения. – 2012. – Т. 54. – № 1. – С. 65–72.
5. Противотурбулентные присадки для снижения гидравлического сопротивления трубопровода / М.М. Гареев, Ю.В. Лисин, В.Н. Манжай, А.М. Шаммазов. – СПб.: Недра, 2013. – 228 с.
6. Physico-chemical concept of drag reduction nature in dilute polymer solutions (the Toms effect) / V.N. Manzhai, Yu.R. Nasibulina, A.S. Kuchevskaya, A.G. Filimoshkin // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2014. – № 80. – P. 38–42.
7. Новый метод реокинетических исследований, основанный на использовании эффекта Томса / А.Я. Малкин, Г.В. Несын, В.Н. Манжай, А.В. Илюшников // Высокомолекулярные соединения. – 2000. – Т. 42. – № 2. – С. 377–384.
8. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3 изд. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
9. Кутепов А.М. и др. Химическая гидродинамика: справочное пособие. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.
10. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980. – 278 с.
11. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: ГХИ, 1961. – 831 с.
12. Review on Drag Reduction and its Heat Transfer by Additives / Yi Wang, Bo Yu, J.L. Zakin, Haifeng Shi // Advance in Mechanical Engineering. – 2011. – V. 17. – P. 35–48.
13. Ge W. Studies on the nanostructure, rheology and drag reduction characteristics of drag reducing cationic surfactant solutions: Ph.D. thesis. – Ohio, 2008. – 455 p.
14. Hellsten M., Oskarsson H. A drag-reducing agent for use in injection water at oil recovery, application. Patent USA, no. W0/2004/007630, 2004.
15. Morgan S.E., McCormick C.L. Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of polymer structure // Prog. Polym. Sci. – 1990. – V. 15. – № 3. – P. 507–549.
16. Кленин В.И. Федусенко И.В. Высокомолекулярные соединения. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 512 с.
17. Энциклопедия полимеров: в 12 т. / гл. ред. В.А. Каргин. – М.: Советская энциклопедия, 1972. – Т. 1: Каучук натуральный. – 1001 с.
18. Семчиков Ю.Д. Высокомолекулярные соединения. – М.: Изд-во «Академия», 2010. – 368 с.
19. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. – 576 с.
20. Манжай В.Н., Климова Н.Л. Новые возможности турбореометрического метода исследования разбавленных растворов полимеров // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 85–88.

Поступила 24.10.2014 г.

UDC 541.64:532.135

INFLUENCE OF HIGH MOLECULAR ELASTOMERS ON A TURBULENT FLOW OF HYDROCARBON LIQUIDS

Vladimir N. Manzhay,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

Artem V. Abdusalyamov,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,
Russia. E-mail: mang@ipc.tsc.ru

Yulia R. Nosikova,

Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of
Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
E-mail: mang@ipc.tsc.ru

To increase the capacity of pipelines and reduce energy costs for movement of fluid volume unit the traditional ways of reducing viscosity are used. They are heating, dilution and add of low-viscosity solvent depressants. The above techniques require high energy and material costs, and they are effective only for the laminar flow regime, in which the volumetric flow rate is inversely proportional to viscosity. However, in most cases when pumping oil and petroleum products by pipeline the turbulent flow mode is implemented. In this case the volumetric flow rate weakly depends on viscosity. Therefore, in recent years the energy-saving technologies of pipelines with application of anti-turbulent additives are widely used. Dosing very low portions of polymer additives (a few grams per ton) into oil flow increases its flow rate by 20–30 %. Relevance of the research is caused by the need to reduce energy costs for oil and petroleum products (gasoline, kerosene, etc.) transportation through pipelines.

The main aim of the study is to evaluate the possibility of applying natural and synthetic rubbers as agents reducing hydrodynamic drag on the main oil pipelines.

The methods used in the study. The authors have studied the structure of macromolecules samples of natural and synthetic rubber, and butadiene and styrene butadiene rubber by IR-spectroscopy, viscosity method and gel-permeation chromatography. Turboreometry method was used to investigate anti-turbulent effectiveness of the samples in a variety of solvents.

The results. The authors determined the most effective elastomer capable of reducing flow resistance; defined optimum concentration of elastomer required for maximum Toms effect; calculated the volume of macromolecular coils in various solvents. The paper demonstrates the effect of solvents on their size and on amount of reduction of hydrodynamic resistance of elastomers. Molar mass of the samples were calculated by different methods.

Key words:

Elastomer, macromolecule, polymer, turbulence, rheology, viscosity.

The research was carried out within the project «Use of anti-turbulence additives for hydrocarbon pipeline transportation in arctic conditions», included into the program of the Fundamental researches of the RAS Presidium «Exploratory fundamental scientific researches for development of the RF Arctic zone».

REFERENCES

1. 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.
2. Hoyt D.U. Vliyanie dobavok na soprotivlenie treniya v zhidkosti [Effect of additives on frictional resistance in liquid]. *Journal of engineering for industry*, 1972, no. 2, pp. 1–31.
3. Virk P.S. Drag Reduction Fundamentals. *AJChE Journal*, 1975, vol. 21, no. 4, pp. 625–656.
4. Nesyn G.V., Manzhay V.N., Suleymanova Yu.V., Stankevich V.S., Kononov K.B. Mekhanizm deystviya, otsenka effektivnosti i osobennosti polucheniya polimernykh antiturbulentnykh prisadok dlya transporta uglevodородnykh zhidkostey [The mechanism of action, assessment of efficiency and features of preparation of polymeric antiturbulent additives for transporting hydrocarbon liquids]. *Polymer*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 65–72.
5. Gareev M.M., Lysin Yu.V., Manzhay V.N., Shammazov A.M. *Protivoturbulentnye prisadki dlya snizheniya gidravlicheskogo soprotivleniya truboprovodov* [Anti-turbulent additives to reduce the flow resistance of pipelines]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2013. 228 p.
6. Manzhay V.N., Nasibulina Yu.R., Kuchevskaya A.S., Filimoshkin A.G. Physico-chemical concept of drag reduction nature in dilute polymer solutions (the Toms effect). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014. No. 80, pp. 38–42.
7. Malkin A.Ya., Nesyn G.V., Manzhay V.N., Ilyushnikov A.V. Novy metod reokineticheskikh issledovaniy, osnovanny na ispolzovanii effekta Tomsa [A new method of reo-kinetic studies based on the effect of Toms]. *Polymer*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 377–384.
8. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Gidromekhanicheskie protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Hydromechanical processes of chemical technology]. 3rd ed. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 228 p.
9. Kutepov A.M. *Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoe posobie* [Chemical Hydrodynamics: a Reference Guide]. Moscow, Kvantum Publ., 1996. 336 p.
10. Rabinovich E.Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 278 p.
11. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technologies]. Moscow, GKHI Publ., 1961. 831 p.
12. Yi Wang, Bo Yu, Zakin J.L., Haifeng Shi. Review on Drag Reduction and Its Heat Transfer by Additives. *Advance in Mechanical Engineering*, 2011, vol. 17, pp. 35–48.
13. Ge W. *Studies on the nanostructure, rheology and drag reduction characteristics of drag reducing cationic surfactant solutions*. Ph.D. thesis. Ohio, 2008. 455 p.
14. Hellsten M., Oskarsson H. *A drag-reducing agent for use in injection water at oil recovery, application*. Patent USA, no: W0/2004/007630, 2004.
15. Morgan S.E., McCormick C.L. Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of polymer structure. *Prog. Polym. Sci.*, 1990. vol. 15, no. 3, pp. 507–549.
16. Klenin V.I., Fedusenko I.V. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [Macromolecular compounds]. St. Petersburg, Lan Publ., 2013. 512 p.
17. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of Polymers]. Ed. by V.A. Kargin. Vol. 1. *Kauchuk naturalny* [Natural rubber]. Moscow, Soviet Encyclopedia Press, 1972. 1001 p.
18. Semchikov Yu.D. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [Macromolecular compounds]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 368 p.
19. Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 576 p.
20. Manzhay V.N., Klimov N.L. Novye vozmozhnosti turboreometriceskogo metoda issledovaniya razdavlennykh rastvorov polimerov [New opportunities of turbo-reometric research method of dilute polymer solutions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 6, pp. 85–88.

Received: 24 October 2014.