DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-2-142-152

УДК 532.542

Чэнь Ян (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация; Юго-западный нефтяной университет, г. Чэньду, Китайская Народная Республика), **А.М. Нечваль, В.И. Муратова** (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК

Chen Yang (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation; South-West Petroleum University, Chengdu city, People's Republic of China), **Andrey M. Nechval, Vera I. Muratova** (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

ANALYSIS OF VARIOUS FACTORS AFFECTING HYDRAULIC REDUCTION EFFICIENCY BY DRAG REDUCING ADDITIVES

Введение

Известно, что инъекция в турбулентный поток перекачиваемого нефтепродукта малых добавок противотурбулентных присадок (ПТП) на основе α -полиолефина может значительно снизить гидравлическое сопротивление трубопровода. Однако гидравлическая эффективность вводимой присадки зависит от молекулярной массы полимера, его молекулярной структуры, реологических свойств, концентрации присадки, свойств нефтепродуктов, температуры и других условий потока.

Цели и задачи

Экспериментальное исследование закономерностей влияния указанных факторов и достижения максимальной эффективности снижения гидравлического сопротивления.

Background

It is known that the injection of small amount of drag reducing additives (DRA) consisting α -polyalphaolefin in the turbulent flow of oil product can significantly reduce the hydraulic resistance of the pipeline. However, the drag reduction efficiency of additives depends on the molecular weight of the polymer, its molecular structure, rheological properties, additive concentration, property of oil products, temperature and other flow conditions.

Aims and Objectives

Experimental study of the regularities of the influence of these factors and to achieve maximum efficiency of reducing hydraulic resistance.

Методы

Проведено лабораторное тестирование растворов пяти противотурбулентных присадок при концентрации 0-60 ppm для двух марок дизельного топлива. Исследования проводились на дисковом турбореометре в диапазоне чисел Рейнольдса $2 \cdot 10^4$ - $1,2 \cdot 10^7$, температуры 15-25 °C и времени 0-2 ч. Выполнен анализ факторов, влияющих на эффективность снижения гидравлического сопротивления при добавлении присадок.

Результаты

Полученные результаты показывают, что эффективность снижения гидравлического сопротивления возрастает при увеличении концентрации присадок, числа Рейнольдса, длине молекулярной цепи (молекулярной массы) и уменьшении вязкости дизельного топлива. В ходе эксперимента установлено, что с возрастанием температуры до определенного значения гидравлическая эффективность ПТП увеличивается, достигает максимума, а затем постепенно снижается. Продолжительность эксперимента позволила установить закономерность снижения гидравлической эффективности ПТП во времени, вызванной разрушением (деструкцией) макромолекул полимера. Темп снижения гидравлической эффективности ПТП пропорционален концентрации присадки в растворе.

Methods

Laboratory testing of solutions of five drag reducing additives with concentrations of 0-60 ppm in two brands of diesel fuel was carried out. The studies were carried out on a disk rheometer in the range of Reynolds number $2 \cdot 10^4$ - $1.2 \cdot 10^7$, temperature 15-25 °C and the time 0-2 h. The analysis of the factors influencing the efficiency of reducing the hydraulic resistance by additives.

Results

The results showed that the efficiency of reducing the hydraulic resistance increases with an increasing of concentration of additives, the Reynolds number, the length of the molecular chain (molecular weight) and a decreasing viscosity of diesel fuel. In the experiment, it was found out that with increasing temperature to a certain value, the hydraulic efficiency of DRA increases, reaches a maximum value, and then gradually decreases. The duration of the experiment allowed to establish a pattern of reducing the hydraulic efficiency of DRA in the period caused by the degradation (destruction) of polymer macromolecules. The rate of decrease in the hydraulic efficiency of DRA is proportional to the concentration of the additive in the solution.

Ключевые слова: противотурбулентные присадки; α -полиолефин; гидравлическое сопротивление; эффективность; дисковый турбореометр; дизельное топливо; деструкция полимера

Key words: drag reducing additives; α -polyolefin; turbulent resistance; efficiency; disk rheometer; diesel oil; molecular degradation

Введение

В настоящее время общая протяжённость магистральных нефтепродуктопроводов в мире превысила 390 тыс. км по данным «Всемирной книги фактов» за 2016 год. Значительные затраты энергии на перекачку нефтепродуктов можно уменьшить посредством ввода в турбулентный поток весьма ма-

лой добавки полимера - противотурбулентной присадки (ПТП). Гашение турбулентных пульсаций макромолекулами полимера позволяет существенно снизить гидравлическое сопротивление трубопроводов.

Эффективность снижения турбулентного сопротивления при использовании ПТП зависит от множества различных факторов: реологических свойств, молекулярной массы

полимера, структуры макромолекулы, концентрации присадки, свойств растворителя (нефтепродукта), температуры и других условий перекачки. Представляет интерес экспериментальное изучение закономерностей влияния различных факторов на гидравлическую эффективность ПТП.

На сегодняшний день были проведены обширные экспериментальные и теоретические исследования. В работах Н.Р. Karami [1], М.И. Валиева [2], М.В. Лурье [3] и т.д. проанализировано влияние температуры T , относительной шероховатости трубы ε , расхода потока, концентрации ПТП θ , свойств присадки и растворителя на эффективность снижения турбулентного сопротивления в трубах малого диаметра и промышленных трубопроводах.

Jinjia Wei [4], M.A. Raffael [5] проводили экспериментальные исследования реологических параметров растворов полимера на реометре с вращающимися коаксиальными цилиндрами: турбулентного сопротивления, времени t , числа Рейнольдса Re , молекулярной массы M , концентрации θ и температуры T . Den Tonner [6], Fengcheng Li [7] исследовали параметры, влияющие на снижение гидравлического сопротивления, методами численного моделирования.

Несмотря на имеющиеся обширные экспериментальные данные, существует ряд

нерешённых вопросов. Например, гидравлическая эффективность присадки непостоянна во времени вследствие разрушения макромолекул полимера под воздействием сдвиговых напряжений.

Остается малоизученной закономерность влияния температуры на эффективность присадки и т.д.

Проведенные экспериментальные исследования растворов нескольких противотурбулентных присадок на дисковом турбореометре позволили установить закономерность влияния различных факторов на эффективность снижения гидравлического сопротивления, а также достижения максимальной эффективности при определенном сочетании влияющих параметров.

Используемые методы

Экспериментальные исследования приведены на лабораторном дисковом турбореометре. Его конструктивная схема и общий вид представлены на рисунках 1 и 2.

До начала эксперимента подготавливались пробы растворов ПТП в дизельном топливе в диапазоне концентрации $\theta = 0-60$ ppm.

Характеристики используемых дизельных топлив и противотурбулентных присадок приведены в таблицах 1 и 2.

Рисунок 1. Принципиальная схема лабораторного дискового турбореометра

Рисунок 2. Общий вид дискового турбореометра

Таблица 1. Характеристики дизельных топлив

Тип дизельного топлива	ДЗ	ДЛ
Цвет	светло-прозрачный желтый	светло-желтый
Плотность кг/м ³	810	826
Кинематическая вязкость (20 °С), мм ² /с	2,32	3,86

Таблица 2. Свойства противотурбулентных присадок

Тип присадки	FLOXL	FLOMXA	Necadd-447	M-Flowtreat	EP
Внешний вид	серая суспензия	светло-белая непрозрачная жидкость	желтая суспензия	желтовато-белая суспензия	светло-белая суспензия
Основные ингредиенты	α-полигексен, α-полиоктен, α-полидодецилен	α-полигексен, α-полиоктен, α-полидодецилен, аллиловый спирт, 2-метил-2,4-пентанедиол	α-полиоктен	α-полигексен	полиолефиновый синтетический каучук, полиакриламидный воск, бутиловый эфир этиленгликоля
Плотность при 20 °С, кг/м ³	860-890	839	840-900	840-930	850
Вязкость при 20 °С, мПа·с	≥ 100	800-1000	30000-40000	1000	1000
Температура вспышки, °С	> 62	68,89	> 61	> 63	> 65
Температура застывания, °С	минус 30	минус 30	-	минус 50	-

В процессе эксперимента проводились измерения крутящего момента сопротивления при вращении диска диаметром D_d в замкнутой цилиндрической камере, заполненной пробой нефтепродукта и растворенной ПТП с заданной концентрацией θ . Далее определялись коэффициенты дискового трения и рассчитывались значения гидравлической эффективности противотурбулентной присадки (DR) при фиксированной частоте вращения диска:

$$DR(\theta, Re_\theta) = \left(1 - \frac{f_\theta}{f_0}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Re_θ - число Рейнольдса, $Re_\theta = \frac{\omega R_\theta^2}{\nu}$;

ω - угловая скорость диска, рад/с;

R - радиус диска, мм;

ν - кинематическая вязкость нефтепродукта, мм²/с;

f_θ, f_0 - коэффициенты дискового трения при наличии и отсутствии добавки присадки соответственно.

В ходе тестирования растворов ПТП в дизельном топливе проводились исследования:

- влияния частоты вращения диска $n = (1-5) \cdot 10^3$ мин⁻¹ на коэффициент дискового трения и гидравлическую эффективность ПТП при фиксированной начальной температуре пробы 20 °С;

- влияния начальной температуры пробы в диапазоне $T = 15-25$ °С на гидравлическую эффективность ПТП при постоянной частоте вращения;

- деструкции ПТП при фиксированных значениях частоты вращения диска $n = 3000$ мин⁻¹ и температуре $T = 28$ °С.

Результаты и обсуждение

1. Влияние свойств нефтепродукта (растворителя)

Тестированию подвергались пробы растворов присадки M-Flowtreat с концентрациями $\theta = (20; 40; 60)$ ppm в дизельном топливе (зимнем и летнем). Эксперименты проводились при постоянной начальной температуре

20 °С при пошаговом изменении частоты вращения диска турбореометра с 1000 мин⁻¹ до 5000 мин⁻¹.

Результаты приведены на рисунках 3, 4.

Анализ полученных результатов позволил установить следующие закономерности.

При постоянном значении числа Рейнольдса Re_θ при прочих равных условиях коэффициент дискового трения f_d в растворах ПТП в зимнем дизельном топливе меньше, чем в пробах ПТП в летнем дизельном топливе. Напротив, значения гидравлической эффективности проб ПТП в зимнем дизельном топливе меньше, чем в летнем. Это можно объяснить тем, что вязкость зимнего дизельного топлива меньше, чем летнего (таблица 1). В связи с этим при всех значениях концентраций ПТП гидравлическое сопротивление вращению диска в зимнем дизельном топливе меньше, чем в летнем. Это может привести к результату, что присадка M-Flowtreat в летнем дизельном топливе более эффективно способствует снижению турбулентности и гидравлического сопротивления.

При фиксированных значениях частоты вращения диска n и концентрации раствора θ ПТП M-Flowtreat (соответственно в зимнем и в летнем дизельном топливе) отношение чисел Рейнольдса обратно пропорционально отношению вязкости топлив:

$$\frac{Re_{\theta(ДЗ)}}{Re_{\theta(ДЛ)}} = \frac{\nu_{(ДЛ)}}{\nu_{(ДЗ)}}.$$

2. Влияние свойств противотурбулентной присадки

Испытания проб растворов четырех различных ПТП (FLOXL, FLOMHA, Necadd-447, M-Flowtreat) с концентрациями $\theta = (5; 10; 20; 40; 60)$ ppm в летнем дизельном топливе были проведены на дисковом турбореометре при начальной температуре проб 20 °С. Частота вращения диска n линейно увеличивалась с 1000 мин⁻¹ до 5000 мин⁻¹ с шагом 200 мин⁻¹.

Зависимость гидравлической эффективности DR указанных типов ПТП при концентрации их в растворе 60 ppm в качестве примера приведена на рисунке 4.

а) коэффициент дискового трения;
б) гидравлическая эффективность

Рисунок 3. Результаты исследования проб растворов ПТП М-Flowtreat в дизельном топливе

Рисунок 4. Зависимость DR от Re_d с 4 различными присадками при концентрации $\theta = 60$ ppm

Как следует из рисунка 4, эффективность DR различных присадок для одного и того же типа растворителя неодинакова и по убыванию составляет: M-Flowtreat, FLOMHA, Necadd-447, FLOXL. При увеличении числа Рейнольдса эта разница более очевидна. Анализ основных ингредиентов присадок (таблица 2) позволил предположить, что α -полигексен наиболее эффективно снижает турбулентное сопротивление, а его молекулярная масса в образце присадки M-Flowtreat больше, чем в остальных пробах.

3. Влияние концентрации присадки

Для указанных выше образцов проб растворов противотурбулентных присадок при аналогичных условиях эксперимента построены графические зависимости гидравлической эффективности DR от концентрации θ (рисунок 5).

Анализ полученных графических зависимостей позволил установить следующие закономерности для всех образцов испытуемых присадок. С повышением концентрации

присадки наблюдается возрастание гидравлической эффективности DR , которая достигает максимума при концентрации раствора $\theta = (20-40)$ ppm. Дальнейшее увеличение концентрации, напротив, приводит к некоторому снижению эффективности присадки. Это объясняется особенностями турбулентного обтекания жидкостью вращающегося диска в замкнутом объеме измерительного модуля турбореометра, а также затуханием эффекта Томса за счёт возрастания межмолекулярного взаимодействия полимерных клубков.

4. Влияние начальной температуры пробы

На дисковом турбореометре в диапазоне частоты вращения диска от 1000 мин^{-1} до 5000 мин^{-1} проведены испытания проб растворов присадки EP (производства КНР) в зимнем дизельном топливе. Концентрация растворов присадки составила $\theta = (40; 60)$ ppm; начальная температура проб $T = (15; 20; 25) ^\circ\text{C}$.

Результаты приведены на рисунке 6.

Рисунок 5. Зависимость DR от концентрации θ при различных числах Рейнольдса Re_d с присадкой M-Flowtreat

Рисунок 6. Зависимость DR от числа Рейнольдса Re_d при различных температурах пробы ЕР в дизельном топливе

Экспериментально установлено, что в принятом диапазоне при увеличении температуры наблюдается рост гидравлической эффективности присадки с концентрацией $\theta = 40$ ppm. Это объясняется тем, что при повышении начальной температуры пробы активность молекул полимера в растворе также возрастает. Однако при увеличении концентрации до $\theta = 60$ ppm, при повышении начальной температуры до $T = 25^\circ\text{C}$ величина DR снижается (рисунок 6, б). Уменьшение гидравлической эффективности в этом случае может происходить вследствие взаимодействия макромолекул полимера в замкнутом объёме измерительного модуля.

5. Влияние эффекта деструкции присадки

Исследование деструкции проводилось на образцах присадок M-Flowtreat и ЕР при их концентрации в зимнем дизельном топливе $\theta = (5; 10; 20; 40; 60)$ ppm. Тестирование проводилось при температуре $T = 25^\circ\text{C}$ и посто-

янной частоте вращения диска турбореометра $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$. Длительность тестирования образцов для всех проб присадок составляла 2 ч. Результаты эксперимента графически представлены на рисунке 7.

Из анализа полученных графических зависимостей следует, что в течение времени тестирования растворов ПТП гидравлическая эффективность DR снижается по закону, близкому к экспоненциальному. Это объясняется деструкцией присадки вследствие продолжительного воздействия значительных сдвиговых напряжений в измерительной ячейке турбореометра.

Установлено, что темп снижения гидравлической эффективности ПТП зависит от её концентрации в растворе и возрастает с увеличением θ . Результаты лабораторных испытаний показали, что при прочих равных условиях присадка ЕР превосходит M-Flowtreat как по величине гидравлической эффективности, так и по антидеструкционной устойчивости.

а) присадка EP;
б) присадка M-Flowtreat

Рисунок 7. Зависимость DR присадок EP и M-Flowtreat от продолжительности тестирования при их концентрации $\theta = (5; 10; 20; 40; 60)$ ppm

Выводы

На основании лабораторного тестирования образцов различных противотурбулентных присадок проанализировано влияние различных факторов на гидравлическую эффективность ПТП, полученные результаты позволил установить следующие выводы:

- при прочих равных условиях гидравлическая эффективность всех исследуемых проб ПТП возрастает с увеличением вязкости растворителя (дизельного топлива);
- наиболее эффективным компонентом ряда α -полиолефинов является α -полигексен, который обеспечивает наибольшую из исследуемых образцов гидравлическую эффективность ПТП;
- с увеличением концентрации присадки наблюдается рост гидравлической эффективности DR , которая достигает максимума при определенном сочетании концентрации ПТП в растворе и числа Рейнольдса Re_d . Дальнейшее увеличение концентрации, напротив, приводит к некоторому снижению эффективности присадки. Это явление можно объяснить особенностями турбулентного обтекания диска в замкнутом объеме, а также затуханием эффекта Томса за счёт возрастания межмолекулярного взаимодействия полимерных клубков;
- повышение начальной температуры исследуемой пробы присадки приводит к возрастанию гидравлической эффективности, что объясняется усилением турбулентных пульсаций и активным действием макромолекул полимера. Дальнейшее повышение температуры приводит к взаимному влиянию молекул полимера и, как следствие, уменьшению величины DR ;
- темп снижения гидравлической эффективности ПТП зависит от продолжительности воздействия сдвиговых напряжений в измерительном модуле турбореометра и прямо пропорционален концентрации присадки в растворе.

Список литературы

1. Karami H R, Mowla D. Investigation of the Effects of Various Parameters on Pressure Drop Reduction in Crude Oil Pipelines by Drag Reducing Agents // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 177. P. 37-45.
2. Валиев М.И., Хасбиуллин И.И., Казаков В.В. Особенности применения противотурбулентных присадок на основе полиальфаолефинов при различной температуре нефти // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 5 (25). С. 32-37.
3. Лурье М.В., Голунов Н.Н. Использование результатов стендовых испытаний малых противотурбулентных добавок для гидравлических расчётов промышленных трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 4 (24). С. 32-37.
4. Wei J., Kawaguchi Y., Yu B., e.a. Rheological Characteristics and Turbulent Friction Drag and Heat Transfer Reductions of a Very Dilute Cationic Surfactant Solution // *Journal of Heat Transfer*. 2006. Vol. 128 (10). P. 977-983.
5. Andrade R.M., Pereira A.S., Soares E.J. Drag Increase at the Very Start of Drag Reducing Flows in a Rotating Cylindrical Double Gap Device // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 212. P. 73-79.
6. Den Toonder J.M.J., Hulsen M.A., Kuiken G.D.C., e.a. Drag Reduction by Polymer Additives in a Turbulent Pipe Flow: Numerical and Laboratory Experiments // *Journal of Fluid Mechanics*. 1997. Vol. 337. P. 193-231.
7. Li F.C., Yu B., Wei J.J., e.a. Turbulent Drag Reduction by Surfactant Additives. John Wiley & Sons, 2012.

Авторы

• Чэнь Ян, канд. техн. наук Юго-западного нефтяного университета
Юго-западный нефтяной университет
Преподаватель кафедры «Хранение и транспорт нефти и газа»
Китайская Народная Республика, г. Чэньду, ул. Цинду, 8

Уфимский государственный нефтяной технический университет
Аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: doctorchenyang@foxmail.com

References

1. Karami H R, Mowla D. Investigation of the Effects of Various Parameters on Pressure Drop Reduction in Crude Oil Pipelines by Drag Reducing Agents. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2012, Vol. 177, pp. 37-45.
2. Valiev M.I., Khasbiullin I.I., Kazakov V.V. Osobennosti primeneniya protivoturbulentnykh prisadok na osnove polial'faolefinov pri razlichnoi temperature nefti [Specifics of Using Drag Reducing Additives Based on Polyalphaolefins at Various Oil Temperatures]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov – Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, No. 5 (25), pp. 32-37. [in Russian].
3. Lur'e M.V., Golunov N.N. Ispol'zovanie rezul'tatov stendovykh ispytaniy malykh protivoturbulentnykh dobavok dlya gidravlichesikh raschetov promyshlennykh truboprovodov [Application of Bench Test Results of Small Antiturbulent Additives for Industrial Pipeline Hydraulic Analysis]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov – Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, No. 4 (24), pp. 32-37. [in Russian].
4. Wei J., Kawaguchi Y., Yu B., e.a. Rheological Characteristics and Turbulent Friction Drag and Heat Transfer Reductions of a Very Dilute Cationic Surfactant Solution. *Journal of Heat Transfer*, 2006, Vol. 128 (10), pp. 977-983.
5. Andrade R.M., Pereira A.S., Soares E.J. Drag Increase at the Very Start of Drag Reducing Flows in a Rotating Cylindrical Double Gap Device. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2014, Vol. 212, pp. 73-79.
6. Den Toonder J.M.J., Hulsen M.A., Kuiken G.D.C. et al. Drag Reduction by Polymer Additives in a Turbulent Pipe Flow: Numerical and Laboratory Experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, Vol. 337, pp. 193-231.
7. Li F.C., Yu B., Wei J.J. e.a. *Turbulent Drag Reduction by Surfactant Additives*. John Wiley & Sons, 2012.

The Authors

• Chen Yang, Candidate of Engineering Sciences of South West Petroleum University (China)
South West Petroleum University
Lecturer of Storage and Transportation of Oil and Gas Department
Chengdu city, Xindu road, No.8
8, Xindu road, Chengdu city,
People's Republic of China

Ufa State Petroleum Technological University
Post-graduate Student of Transport and Storage of Oil and Gas Department
1, kosmonavtov str., Ufa, 450062, Russia Federation
e-mail: doctorchenyang@foxmail.com

• Нечваль Андрей Михайлович, канд. техн. наук,
доцент
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти
и газа»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: a_nechval@mail.ru

• Nechval Andrey M., Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Transport and Storage
of Oil and Gas Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russia Federation
e-mail: a_nechval@mail.ru

• Муратова Вера Ивановна, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти
и газа»
e-mail: v.muratova05@yandex.ru

• Muratova Vera I, Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Transport and Storage of Oil
and Gas Department
1, kosmonavtov str., Ufa, 450062, Russia Federation
e-mail: v.muratova05@yandex.ru