

ВЛИЯНИЕ ГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕФТИ

М. А. Промтов¹, Н. Ц. Гатапова¹, В. Я. Борщев¹,
А. Н. Колиух¹, А. Ю. Степанов¹, О. А. Шенна²

*Кафедры: «Технологические процессы, аппараты и техносферная
безопасность» (1), promtov.ma@mail.tstu.ru;
«Общетеоретические дисциплины» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: вязкость; гидродинамический кавитатор; кавитация; кривая течения; нефть; реологические свойства.

Аннотация: Исследована возможность изменения реологических свойств вязкой нефти путем гидроимпульсной кавитационной обработки. Предложен механизм, объясняющий изменение структуры сложных структурных единиц нефти в результате воздействия кавитации. Проведены экспериментальные исследования по обработке вязкой нефти в гидродинамическом кавитаторе с соплами Стентона. Анализ реологических характеристик показал, что снижение вязкости обработанной нефти достигает 50 %.

Обозначения

E – удельная энергия на обработку образца нефти, Дж/кг;	t – время обработки, с;
m – масса образца нефти, кг;	V – скорость жидкости в зоне с наименьшим давлением в горловине сопла Стентона, м/с;
N – расчетная потребляемая мощность, затраченная насосом на прокачку нефти через гидродинамический кавитатор, Вт;	v – объем образца нефти, м ³ ;
$N_{уд}$ – удельная мощность на обработку объема образца нефти, Вт/м ³ ;	ε – удельная энергия на обработку объема образца нефти, Дж/м ³ ;
P – давление насыщенных паров легких компонентов нефти при температуре обработки, Па;	μ – вязкость, Па·с;
P_V – наименьшее давление в горловине сопла Стентона, Па;	ρ – плотность, кг/м ³ ;
	σ – скорость сдвига, с ⁻¹ ;
	τ – напряжение сдвига, Па

Введение

Технология трубопроводного транспорта нефти существенно зависит от ее реологических свойств. Для улучшения реологических свойств вязкой нефти применяются следующие методы: разбавление вязкой нефти маловязкой нефтью, газовым конденсатом и т.п.; газонасыщение нефти; перекачка в виде водной эмульсии; перекачка с присадками и поверхностно-активными веществами; а также методы, основанные на внесении в поток дополнительной тепловой энер-

гии («горячие» трубопроводы с системами попутного подогрева) [1, 2]. Кроме того, могут быть применены методы физического воздействия, например, СВЧ, магнитное, ультразвуковое, электроимпульсное, гидроимпульсное, кавитационное воздействия [1 – 4]. Перспективным направлением является гидроимпульсная кавитационная обработка (ГКО), при которой происходит генерирование в жидкости микро- и макроимпульсов давления [3]. Гидроимпульсная кавитационная обработка осуществляется за счет генерирования в обрабатываемой жидкости пульсаций давления и скорости потока. При движении потока жидкости через канал с периодически изменяющейся площадью проходного сечения, потери энергии на создание импульсов давления в жидкости минимальны, так как в этом случае жидкость является как рабочим телом для создания пульсаций давления, так и объектом обработки. Данный метод реализуется в гидродинамических кавитаторах (ГК), в которые генерируются импульсы давления в потоке обрабатываемой жидкости [5 – 8].

Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти и нефтепродуктов позволяет снизить их вязкость и температуру застывания, изменить внутреннюю структуру дисперсной нефтяной системы. В процессе ГКО нефти энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, может привести к разрыву межмолекулярных связей, а при определенных условиях к разрыву и слабым внутримолекулярным связям [3, 9 – 14].

Теоретическая часть

Состояние нефтяной дисперсной системы зависит от таких объемных характеристик, как энергия и сила межмолекулярных взаимодействий. Во внутренней структуре нефтяных систем возможно сосуществование различных типов взаимодействий, которые определяются расстоянием между молекулами.

При близких расстояниях (порядка $\leq 0,2...0,3$ нм) между молекулами возникают химические связи с энергией более 100 кДж/моль; на средних (0,3...0,7 нм) – физико-химические взаимодействия характеризуются энергией 40...100 кДж/моль [15]; дальних (0,7...2,0 нм) и сверхдальних ($> 2,0$ нм) – существуют слабые межмолекулярные взаимодействия, энергия связи которых изменяется пропорционально 6-7 степени расстояния между взаимодействующими молекулами. Межмолекулярные комплексы образуются в нефти и за счет водородных связей. К образованию средних водородных связей склонны гетероатомы, ареновые фрагменты молекул смолисто-асфальтеновых веществ нефти. Слабые водородные связи (8...20 кДж/моль) характерны практически для всех углеводородов нефти [16]. Водородные связи с энергией до 40 кДж/моль разрушаются при тепловом воздействии.

При гидроимпульсной кавитационной обработке нефти возможны изменения межмолекулярных расстояний, что может привести как к разрушению структуры дисперсной системы (в случае увеличения расстояний между ее компонентами), так и химическим реакциям (в случае уменьшения расстояний между молекулами до $\leq 0,2...0,3$ нм). Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти различной химической природы приводит к изменению ее углеводородного состава: увеличивается доля низкомолекулярных *n*-алканов, ароматических и нафтеновых углеводородов, что связано с перестройкой сложных структурных единиц (ССЕ) и диффузией этих компонентов из состава дисперсной фазы в дисперсионную среду [2].

В высокопарафинистой нефти ядро ССЕ формируют парафины, кристаллы которых разрушаются при ГКО с увеличением удельной поверхности и, следовательно, повышением поверхностной энергии. Коллоидная углеводородная система после ГКО стремится к понижению избыточной энергии за счет снижения удельной поверхности. Для высокопарафинистой нефти, в которой содержание смол и ас-

фальтеновское, снижение поверхностной энергии происходит в процессе перекристаллизации *n*-алканов с образованием сплошной структурной сетки, что приводит к увеличению структурно-механических параметров дисперсной системы [2]. Снижение вязкости и напряжений сдвига нефти при ГКО в гидродинамическом реакторе с профилем сопла Вентури подтверждается авторами работ [17, 18].

Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти может вызвать разрыв молекулярной цепочки соединений по атомной связи С–С как более слабой по сравнению со связью С–Н [10]. Согласно [12 – 14], алкильные цепи и боковые цепи ароматических кольцевых структур в нефти разрываются за счет энергии, выделившейся при ГКО. Разрыв связей С–С и С–Н в молекулах *n*-алканов приводит к образованию свободных радикалов, реакции которых определяют состав и свойства конечных продуктов. Предполагается [14], что основные направления превращений короткоцепных *n*-алканов при кавитации связаны с реакциями диспропорционирования (реакции самоокисления – самовосстановления) [14] и изомеризации *n*-алканы ↔ изоалканы. Равновесие реакции в зависимости от условий ГКО сдвигается как в сторону образования продуктов реакции (в подавляющем большинстве), так и в противоположном направлении (после второго цикла кавитации для *n*-C₁₄H₃₀ и после третьего – для *n*-C₁₅H₃₂). Возможны промежуточные реакции, в которых *n*-алканы C₁₈₊ превращаются в низкомолекулярные соединения [13, 14]. Таковыми могут быть, например, реакции, протекающие по механизму «конденсация – деление». Можно сделать вывод, что ГКО нефти способствует разрушению надмолекулярных структур, разрыву межмолекулярных связей различной природы, приводит к деформации, изменению структуры и разрушению ССЕ.

Для определения гидродинамических параметров ГК проводили моделирование течения потока нефти через трубку с профилем сопла Стентона в программном комплексе ANSYS CFX. По численным данным скорости и давления определялись числа гидродинамической кавитации в области наибольшей скорости и наименьшего давления потока

$$C = (P - P_V) / (0,5\rho \cdot V^2). \quad (1)$$

Кавитация начинается при $C \approx 1$; если $C < 1$, то кавитация считается развитой. В качестве давления насыщенного пара легких компонентов нефти принимали давление насыщенного пара бензиновой фракции при температуре 25 °С, $P = 7$ кПа [19].

На рисунке 1 показана картина поля скоростей в последней ступени ГК с профилем сопла Стентона.

По результатам моделирования течения потока нефти в сопле Стентона, наименьшее давление в горловине составляет 30 кПа, наибольшая скорость потока 14,1 м/с. В соответствии с полученными параметрами наименьшее число гидродинамической кавитации $C = 0,26$, что указывает на развитую кавитацию в потоке нефти в диффузоре сопла Стентона.

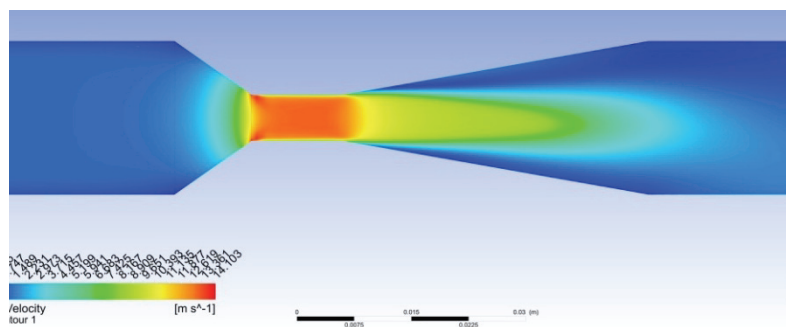


Рис. 1. Поле скоростей потока нефти в трубке с профилем сопла Стентона

Экспериментальная часть

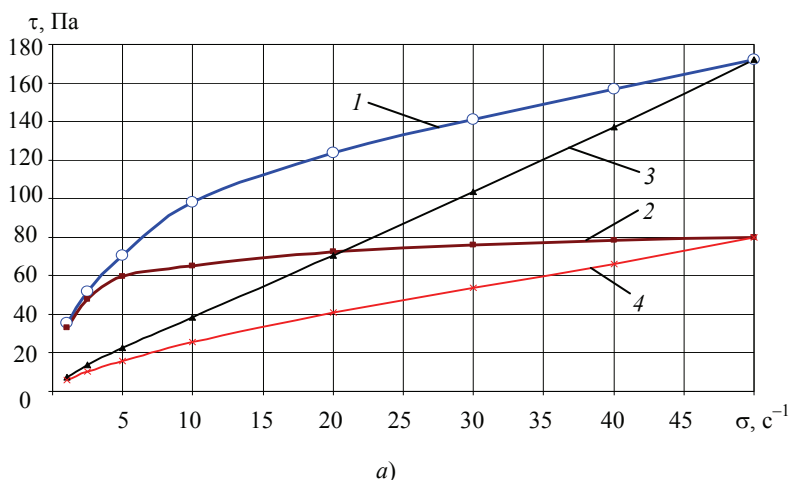
Гидродинамические кавитаторы являются эффективным оборудованием для многофакторного импульсного воздействия на жидкость в целях изменения физико-химических параметров жидкости, получения стабильных, высокодисперсных эмульсий и суспензий, интенсификации процессов растворения и экстрагирования веществ [5 – 8]. Обработка жидкости в ГК осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: вихреобразования, макро- и микромасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации. Макромасштабные импульсы давления – это импульсы, генерируемые в потоке жидкости при периодическом изменении проходного сечения ГК. Микромасштабные импульсы возникают при образовании и пульсациях вихревых структур и кавитационных образований в потоке жидкости. Условное разделение на микро- и макромасштабность импульсов давления характеризует величину объема жидкости, который подвергается воздействию импульсов давления.

Экспериментальные исследования проводились на установке, включающей ГК с четырьмя элементами для генерирования кавитации, имеющими профиль сопла Стентона.

Установка состоит из поршневого насоса, гидродинамического кавитатора, емкостей, приборов для измерения расхода, давления и температуры. Частота вращения вала насоса и, соответственно, его подача регулировались частотным преобразователем. Обработка нефти осуществлялась перекачиванием нефти под давлением через ГК из одной емкости в другую.

Для ГКО использовали нефть со следующими параметрами: плотность – 874,2 кг/м³; содержание, %, асфальтенов – 2,43; смол – 9,98; парафинов – 6,99; механических примесей – 0,08; воды – 0,09; серы – 0,93; температура застывания 19 °С.

Изменение реологических параметров исходной нефти и образца после обработки в ГК определяли по кривым течения (рис. 2, 3), полученным на программируемом ротационном вискозиметре DV2T RV Брукфильд при температурах 5 и 20 °С. Для поддержания постоянной температуры использовался жидкостной криотермостат.



а)
Рис. 2. Кривые течения нефти при 5 °С (а) (начало):
1, 3 – прямой и обратный ход для исходной нефти;
2, 4 – прямой и обратный ход для обработанного образца

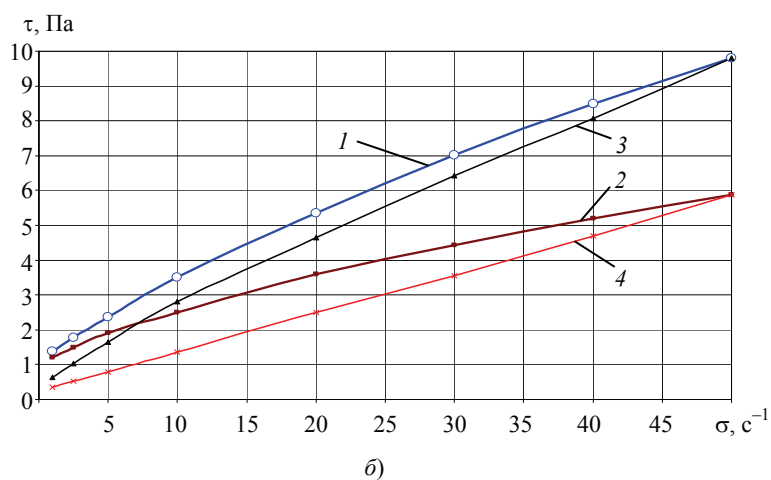


Рис. 2. Кривые течения нефти при 20 °С (б) (окончание)

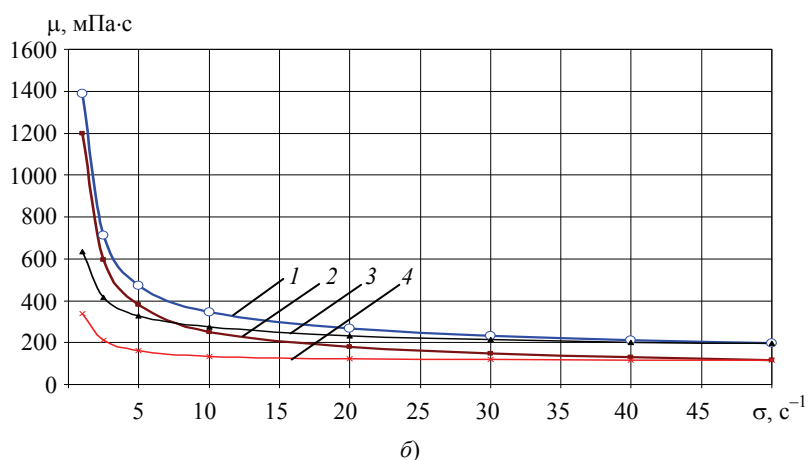
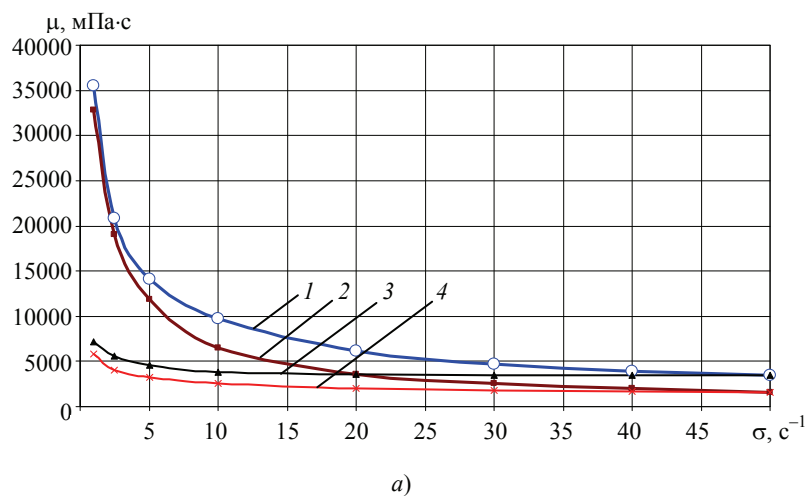


Рис. 3. Зависимости вязкости нефти от скорости сдвига при 5 °С (а) и 20 °С (б):

1, 3 – прямой и обратный ход для исходной нефти;
2, 4 – прямой и обратный ход для обработанного образца

Обсуждение результатов и выводы

При снятии кривых течения необработанного и обработанного образцов нефти были получены характерные петли гистерезиса при 5 и 20 °С (см. рис. 2). Линии прямого хода не повторяют линии обратного хода, что свидетельствует о тиксотропной структуре как обработанного, так и необработанного образцов нефти.

Кривые течения нефти (см. рис. 2, а) соответствуют модели Балкли-Гершеля (нелинейно-вязкопластичная жидкость с предельным напряжением сдвига) [20] и представлены следующими уравнениями:

$$\tau = 23,8 + 20,75 \cdot \sigma^{0,508} \text{ (кривая 1);} \quad (2)$$

$$\tau = 22,2 + 20,12 \cdot \sigma^{0,285} \text{ (кривая 2);} \quad (3)$$

$$\tau = 3,25 + 3,86 \cdot \sigma^{0,965} \text{ (кривая 3);} \quad (4)$$

$$\tau = 2,19 + 4,01 \cdot \sigma^{0,754} \text{ (кривая 4).} \quad (5)$$

Кривые течения нефти (см. рис. 2, б) также соответствуют модели Балкли-Гершеля:

$$\tau = 0,87 + 0,46 \cdot \sigma^{0,76} \text{ (кривая 1);} \quad (6)$$

$$\tau = 0,815 + 0,37 \cdot \sigma^{0,671} \text{ (кривая 2);} \quad (7)$$

$$\tau = 0,295 + 0,35 \cdot \sigma^{0,843} \text{ (кривая 3);} \quad (8)$$

$$\tau = 0,254 + 0,105 \cdot \sigma^{1,016} \text{ (кривая 4).} \quad (9)$$

Экспериментальные данные, полученные при обработке нефти в установке на базе ГК, позволяют определить удельные энергетические характеристики процесса. Удельная энергия, диссипируемая в массе образца нефти за единицу времени, определяется потребляемой мощностью N , затрачиваемой внешним насосом на подачу нефти в ГК за время обработки образца:

$$E = Nt/m; \quad (10)$$

$$N = \Delta PQ; \quad (11)$$

$$m = \nu\rho; \quad (12)$$

$$\varepsilon = Nt/\nu; \quad (13)$$

$$N_{\text{уд}} = N/\nu. \quad (14)$$

Расчетные значения потребляемой мощности, удельная энергия и удельная потребляемая мощность, затраченные на обработку образцов нефти, приведены в табл. 1.

На рисунке 4 показаны графики относительного уменьшения вязкости обработанного в ГК образца нефти по сравнению с необработанным, %, в зависимости от скорости сдвига при 5 и 20 °С, из которых видно, что с увеличением скорости сдвига происходит рост относительного уменьшения вязкости по экспоненциальной зависимости. Экстраполируя графики по скорости сдвига, можно предположить, что при скорости сдвига выше 60 с⁻¹ при 20 °С снижение вязкости нефти после обработки в ГК будет примерно 40 %, аналогично при скорости сдвига выше 100 с⁻¹ при 5 °С снижение вязкости нефти после обработки будет примерно 60 %. Таким образом, снижение вязкости нефти в результате гидродинамической кавитационной обработки можно получить около 50 %.

Параметры обработки нефти в ГК

Параметр	Величина
Давление на входе в ГК, МПа	2,3
Расход, л/с	0,36
Объем образца нефти, м ³	0,009
Температура образца начальная, °С	24,8
Температура образца конечная, °С	25,7
Время обработки, с	25
Расчетная потребляемая мощность, Вт	828
Удельная мощность на обработку: массы образца, Вт/кг	106
объема образца, Вт/м ³	92·10 ³
Удельная энергия на обработку: массы образца, Дж/кг	2650
объема образца, Дж/м ³	2,3·10 ⁶
Удельная потребляемая мощность, кВт·ч/т	0,737

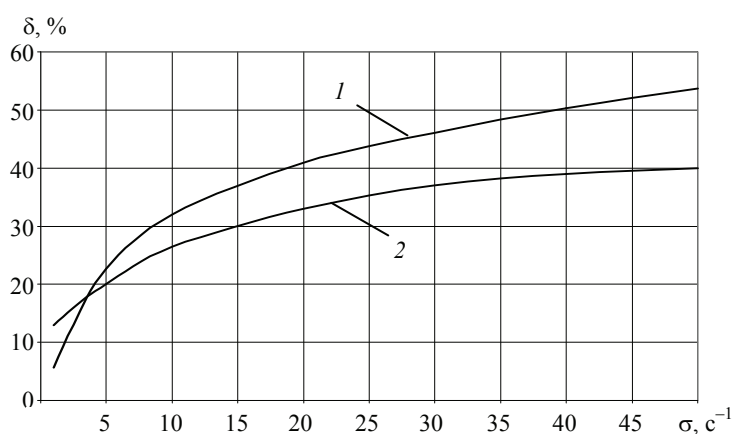


Рис. 4. Степень уменьшения вязкости нефти в зависимости от скорости сдвига:
1, 2 – прямой ход при 5 и 20 °С соответственно

Исходя из теоретических предположений и анализа экспериментальных данных, можно сделать вывод, что реологические свойства и физико-химические характеристики нефти могут быть улучшены за счет ГКО, которая способствует разрушению надмолекулярных структур, разрыву межмолекулярной связи различной природы, приводит к деформации, изменению структуры и разрушению ССЕ. В нефтяной дисперсионной системе могут разрываться слабые внутримолекулярные связи больших молекул. При разрыве связей между молекулами нефтяной дисперсной системы могут образовываться новые структуры с новыми физико-химическими свойствами.

Вероятнее всего, при ГКО нефти происходит диспергирование твердых кристаллов парафинов, а также разрушение надмолекулярных связей между ССЕ и разрушение их самих. Предполагается, что смолы образуют смешанные кристаллы с парафинами и изменяют их структуру. Смолы распределяются между двумя фазами, разрыхляют кристаллическую структуру и изменяют строение

ассоциатов кристаллов парафина. Адсорбция смол на разрушенных кристаллах парафина предотвращает их агрегацию. В высокопарафинистых нефтях ядро ССЕ формируют парафины, кристаллы которых разрушаются при ГКО с увеличением удельной поверхности и, следовательно, повышением поверхностной энергии. Коллоидная углеводородная система после ГКО стремится к понижению избыточной энергии за счет снижения удельной поверхности.

Список литературы

1. Обзор современных методов воздействия на реологические свойства тяжелых высоковязких нефтей / И. И. Хасанов, Р. А. Шакиров, А. Ю. Леонтьев [и др.] // Нефтегазохимия. – 2018. – № 3. – С. 49 – 54. doi: 10.24411/2310-8266-2018-10305
2. Волкова, Г. И. Влияние ультразвука на состав и свойства парафинистой высокосмолистой нефти / Г. И. Волкова, Р. В. Ануфриев, Н. В. Юдина // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56, № 5. – С. 454 – 460. doi: 10.7868/S0028242116050208
3. Промтов, М. А. Технологии импульсного энергетического воздействия на нефть и нефтепродукты / М. А. Промтов // Экологический вестник России. – 2011. – № 3. – С. 14 – 16.
4. Подготовка и транспорт проблемных нефтей (научно-практические аспекты) / Г. И. Волкова, Ю. В. Лоскутова, И. В. Прозорова, Е. М. Березина. – Томск : Издат. дом ТГУ, 2015. – 136 с.
5. Abiev, R. Sh. Hydrodynamics of Pulsating Flow Type Apparatus: Simulation and Experiments / R. Sh. Abiev, A. S. Galushko // Chemical Engineering Journal. – 2013. – No. 229. – P. 285 – 295.
6. Vichare, N. P. Optimization of Hydrodynamic Cavitation Using a Model Reaction / N. P. Vichare, P. R. Gogate, A. B. Pandit // Chemical Engineering & Technology. – 2000. – Vol. 23, No. 8. – P. 683 – 690.
7. Гидродинамическая кавитационная обработка как способ снижения вязкости высоковязких нефтей и повышения эффективности транспортировки / А. Э. Бранд, А. Г. Закирзаков, С. Ю. Торопов, С. М. Соколов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-3. – 6 с.
8. Промтов, М. А. Характеристики потока жидкости в каналах проточных гидродинамических статических кавитаторов / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 562 – 569.
9. Сурков, В. Г. Влияние условий механического воздействия на изменение состава парафинов нефти / В. Г. Сурков, А. К. Головкин, М. В. Можайская // Известия Томского политехн. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 3. – С. 148 – 152.
10. Промтов, М. А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 412 – 419. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419
11. Промтов, М. А. Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 455 – 460. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460
12. Превращение алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. II. Поведение среднецепных алканов C_{21} – C_{38} / В. Н. Торховский, С. И. Воробьев, Е. В. Егорова [и др.] // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. – 2014. – Т. 9, № 4. – С. 59 – 69.
13. Использование многоциклового кавитации для интенсификации переработки нефтяного сырья / В. Н. Торховский, С. И. Воробьев, С. Н. Антонюк [и др.] // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 2 (97). – С. 9 – 17.
14. Превращение короткоцепных *n*-алканов под действием гидродинамической кавитации / В. Н. Торховский, С. Н. Антонюк, С. И. Воробьев, М. В. Николаева // Тонкие химические технологии. – 2017. – Т. 12, № 5. – С. 65 – 70.

15. Туманян, Б. П. Научные и прикладные аспекты теории нефтяных дисперсных систем / Б. П. Туманян. – М. : ООО «ТУМА ГРУПП» ; Изд-во «Техника», 2000. – 336 с.

16. Сюняев, З. И. Нефтяные дисперсные системы / З. И. Сюняев, Р. З. Сафиева, Р. З. Сюняев. – М. : Химия, 1990. – 226 с.

17. Якименко, К. Ю. Применение технологии гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности транспортировки / К. Ю. Якименко, А. А. Венгеров, А. Э. Бранд // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 5-3. – С. 531 – 536.

18. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти / М. С. Муллакаев, В. О. Абрамов, В. М. Баязитов [и др.] // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2011. – № 5. – С. 24 – 27.

19. Хафизов, Ф. Ш. Давление насыщенных паров для нефтепродуктов / Ф. Ш. Хафизов, А. В. Краснов // *Электрон. науч. журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2012. – № 3. – С. 406 – 413.

20. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии : монография / Г. Шрамм ; пер. с англ. И. А. Лавыгина ; под. ред. В. Г. Куличихина. – М. : КолосС, 2003. – 312 с.

The Influence of Hydropulse Processing on Rheological Oil Parameters

M. A. Promtov¹, N. Z. Gatapova¹, V. Ya. Borschev¹,
A. N. Koliukh¹, A. Yu. Stepanov¹, O. A. Sheina²

Departments of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (1),

promtov.ma@mail.tstu.ru;

General Theoretical Disciplines (2), TSTU, Tambov, Russia

Keywords: viscosity; hydrodynamic cavitator; cavitation; curve current; oil; rheological properties.

Abstract: The possibility of changing the rheological properties of viscous oil by hydro-pulse cavitation treatment is investigated. A mechanism is proposed that explains the change in the structure of complex structural units of oil as a result of cavitation. Experimental studies on the processing of viscous oil in a hydrodynamic cavitator with Stanton nozzles have been carried out. An analysis of the rheological characteristics showed that a decrease in the viscosity of the processed oil reaches 50%.

References

1. Khasanov I.I., Shakirov R.A., Leont'yev A.Yu., Poletayeva O.Yu., Babayev E.R., Mamedova P.Sh. [Overview of modern methods of influencing the rheological properties of heavy high-viscosity oils], *Neftegazokhimiya* [Oil and gas chemistry], 2018, no. 3, pp. 49-54, doi: 10.24411/2310-8266-2018-10305 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Volkova G.I., Anufriyev R.V., Yudina N.V. [Influence of ultrasound on the composition and properties of paraffinic high-tar oil], *Neftekhimiya* [Petrochemistry], 2016, vol. 56, no. 5, pp. 454-460, doi: 10.7868/S0028242116050208 (In Russ.)

3. Promtov M.A. [Technology of pulsed energy exposure for oil and oil products], *Ekologicheskii vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], 2011, no. 3, pp. 14-16. (In Russ.)

4. Volkova G.I., Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Berezina Ye.M. *Podgotovka i transport problemnykh neftey (nauchno-prakticheskiye aspekty)* [Preparation and

transportation of problematic oils (scientific and practical aspects)], Tomsk: Izdatel'skiy dom TGU, 2015, 136 p. (In Russ.)

5. Abiev R.Sh., Galushko A.S. Hydrodynamics of Pulsating Flow Type Apparatus: Simulation and Experiments, *Chemical Engineering Journal*, 2013, no. 229, pp. 285-295.

6. Vichare N.P., Gogate P.R., Pandit A.B. Optimization of Hydrodynamic Cavitation Using a Model Reaction, *Chemical Engineering & Technology*, 2000, vol. 23, no. 8, pp. 683-690.

7. Brand A.E., Zakirzakov A.G., Toropov S.Yu., Sokolov S.M. [Hydrodynamic cavitation treatment as a way to reduce the viscosity of highly viscous oils and increase the efficiency of transportation], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 2-3, 6 p. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. [Characteristics of the fluid flow in the channels of flowing hydrodynamic static cavitators], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 562-569. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Surkov V.G., Golovko A.K., Mozhayskaya M.V. [Influence of mechanical stress on the composition of oil paraffins], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 3, pp. 148-152. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Promtov M.A. [Change in the fractional composition of oil during hydro-pulse cavitation treatment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 412-419, doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Promtov M.A. [Hydropulse cavitation oil treatment in a rotary pulse apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 455-460, doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Torkhovskiy V.N., Vorob'yev S.I., Yegorova Ye.V., Antonyuk S.N., Gorodskiy S.N. [Transformation of alkanes under the action of a single impulse of hydrodynamic cavitation. II. The behavior of mid-chain alkanes C₂₁ – C₃₈], *Vestnik MITKHT im. M. V. Lomonosova* [Bulletin of the Moscow Institute of Fine Arts M.V. Lomonosov], 2014, vol. 9, no. 4, pp. 59-69. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Torkhovskiy V.N., Vorob'yev S.I., Antonyuk S.N., Yegorova Ye.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskiy S.N. [The use of multi-cycle cavitation to intensify the processing of oil raw materials], *Tekhnologii nefii i gaza* [Oil and gas technology], 2015, no. 2 (97), pp. 9-17. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Torkhovskiy V.N., Antonyuk S.N., Vorob'yev S.I., Nikolayeva M.V. [Transformation of short-chain n-alkanes under the influence of hydrodynamic cavitation], *Tonkiye khimicheskiye tekhnologii* [Thin chemical technologies], 2017, vol. 12, no. 5, pp. 65-70. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Tumanyan B.P. *Nauchnyye i prikladnyye aspekty teorii neftyanykh dispersnykh sistem* [Scientific and applied aspects of the theory of oil dispersed systems], Moscow: OOO «TUMA GRUPP»; Izdatel'stvo «Tekhnika», 2000, 336 p. (In Russ.)

16. Syunyayev Z.I., Safiyeva R.Z., Syunyayev R.Z. *Neftyanyye dispersnyye sistemy* [Oil disperse systems], Moscow: Khimiya, 1990, 226 p. (In Russ.)

17. Yakimenko K.Yu., Vengerov A.A., Brand A.E. [Application of the technology of hydrodynamic cavitation treatment of high-viscosity oils in order to increase the efficiency of transportation], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, no. 5-3, pp. 531-536. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Mullakayev M.S., Abramov V.O., Bayazitov V.M., Baranov D.A., Novotortsev V.M., Yeremenko I.L. [The study of the effects of cavitation on the rheological properties of heavy oil], *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and technologies for the oil and gas complex], 2011, no. 5, pp. 24-27. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Khafizov F.Sh., Krasnov A.V. [Saturated vapor pressure for petroleum products], *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo»* [Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"], 2012, no. 3, pp. 406-413. (In Russ., abstract in Eng.)

20. Shramm G., Kulichikhin V.G. [Ed.] *Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii: monografiya* [Fundamentals of practical rheology and rheometry: monograph], Moscow: KolosS, 2003, 312 p. (In Russ.)

Wirkung der Hydroimpulsbehandlung auf die rheologischen Parameter des Öls

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit untersucht, die rheologischen Eigenschaften von viskosem Öl durch Hydro-Pulskavitationsbehandlung zu verändern. Es ist ein Mechanismus vorgeschlagen, der die Änderung der Struktur komplexer Struktureinheiten von Öl infolge der Exposition gegenüber Kavitation erklärt. Durchgeführt sind experimentelle Studien zur Verarbeitung von viskosem Öl in einem hydrodynamischen Kavitator mit Stanton-Düsen. Die Analyse der rheologischen Eigenschaften zeigt, dass die Abnahme der Viskosität des verarbeiteten Öls 50 % erreicht.

Influence du traitement par impulsion hydraulique sur les paramètres rhéologiques du pétrole

Résumé: Est étudiée la possibilité de modifier les propriétés rhéologiques de l'huile visqueuse par le traitement de cavitation par impulsion hydraulique. Est proposé un mécanisme qui explique le changement de la structure des unités structurales complexes de l'huile résultant de l'action de la cavitation. Sont réalisées des études expérimentales sur le traitement de l'huile visqueuse dans un cavitateur hydrodynamique avec des buses de Stenton. L'analyse des caractéristiques rhéologiques a montré que la réduction de la viscosité de l'huile traitée atteint 50 %.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Колух Александр Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Степанов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Шейна Ольга Александровна* – кандидат химических наук, старший педагог дополнительного образования кафедры «Общетеоретические дисциплины», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Дьячкова Татьяна Петровна* – доктор химических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.