

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОПАРАФИНИСТОЙ НЕФТИ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

М. А. Промтов¹, С. Е. Кутуков², А. Н. Колиух¹, Ф. С. Зверев³

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
mpromtov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия;
НТЦ ООО «НИИ Транснефть» (2), г. Уфа, Россия;
ООО «НИИ Транснефть» (3), г. Москва, Россия*

Ключевые слова: вязкость; затраты энергии; высокопарафинистая нефть; роторный импульсный аппарат.

Аннотация: Экспериментально исследованы закономерности изменения затрат энергии для снижения вязкости высокопарафинистой нефти при обработке в установке на базе роторного импульсного аппарата (РИА). Снижение вязкости нефти при обработке в РИА превышает 40 %. Увеличение величины подачи нефти в РИА позволяет снизить удельные энергозатраты на ее обработку при такой же относительной величине снижения вязкости. Удельные энергозатраты снижаются при увеличении расхода нефти через РИА по зависимости, близкой к логарифмической.

Введение

При транспортировке нефти по трубопроводам основные затраты энергии идут на преодоление сил вязкого трения [1, 2]. Вязкость нефти может быть снижена различными методами, в том числе и за счет физических эффектов, например, магнитной, электромагнитной, акустической, гидродинамической или термообработки [3 – 7]. Положительные результаты по снижению вязкости нефти получены при комплексной механической, гидродинамической и акустической обработке нефти в роторном импульсном аппарате (РИА) [8 – 11].

При обработке нефтяной коллоидной системы в РИА на дисперсные частицы оказывается механическое воздействие, которое проявляется в ударах, срезающих и истирающих напряжениях при контактах с рабочими частями РИА. Гидродинамическое воздействие на нефть проявляется в сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности, макропульсациях скорости и давления потока. Микропульсации давления и скорости потока генерируют кавитационные пузыри, динамически воздействующие на локальные микрообъемы нефти. При схлопывании кавитационных пузырей возникают кумулятивные струи, имеющие большую скорость, которые деформируют и разбивают сложные структурные единицы нефтяной системы. Многофакторная (механическая, гидродинамическая, кавитационная и акустическая) обработка нефти способствует разрыву межмолекулярных связей; слабым внутримолекулярных связей, что способствует снижению вязкости, изменению внутренней структуры дисперсной нефтяной системы.

Экспериментальная часть

Для оценки технологической и экономической эффективности работы РИА по снижению вязкости нефти необходимо определить абсолютные и удельные затраты энергии на обработку единицы массы нефти. В экспериментах по обработке нефти в РИА использовалась высокопарафинистая нефть, которая имела плотность 820 кг/м^3 ; концентрацию парафинов 20,57%; асфальтенов 1,08%; смол 8,14%; механических примесей 0,038%; серы 0,25%; температуру застывания $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Экспериментальные исследования по определению затрат энергии на обработку образца нефти проводились в пилотной установке на базе РИА, имеющей следующие энергетические характеристики:

Мощность электродвигателя, кВт:	
РИА-150.....	7,5
насоса.....	3,0
Частота вращения электродвигателя, об/мин:	
РИА-150.....	2 900
насоса.....	1 410
Напряжение питания электродвигателей, В.....	380
Частота тока, Гц.....	50
Величина $\cos\phi$ электродвигателя:	
РИА-150.....	0,88
насоса.....	0,81
КПД электродвигателя, %:	
РИА.....	87
насоса.....	79
Подача насоса (для нефти с вязкостью $1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$), $\text{м}^3/\text{ч}$	6,0
Давление насоса (для нефти с вязкостью $1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$), МПа.....	0,4

Технологическая схема, описание принципа работы установки и физико-химические параметры образца нефти представлены в работе [8]. Для подачи нефти под давлением в РИА в установке применялся шестеренный насос НМШ 5-25-4,0/10.

Исходный и обработанные в РИА образцы нефти исследовали на вискозиметрах ротационного типа DV2T RV Брукфильд и DV2T LV Брукфильд с использованием SSA адаптера для малых образцов с камерой SC4-13RPY, датчиком температуры RTD. Термостатирование образцов нефти осуществлялось жидкостным криотермостатом LOIP FT-311-80. Ротационный вискозиметр позволял получать значения динамической вязкости и напряжения сдвига при заданной частоте вращения шпинделя и скорости сдвига [8].

Изменение вязкости исходной и обработанной нефти определяли по графикам, построенным по данным измерений ротационного вискозиметра. Графики зависимости динамической вязкости нефти от скорости сдвига при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ представлены на рис. 1 [8]. Обработка нефти, в данном случае, проводилась при подаче насоса $Q = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и частоте вращения ротора РИА $n = 70 \text{ об/с}$, что соответствовало скорости сдвига на поверхности ротора РИА $\sigma_p = 440 \text{ с}^{-1}$.

Величина подачи (расход) нефти в РИА является одним из управляющих параметров многофакторного воздействия на обрабатываемую нефть за счет его пропорционального влияния на амплитуду импульсов давления, генерируемых

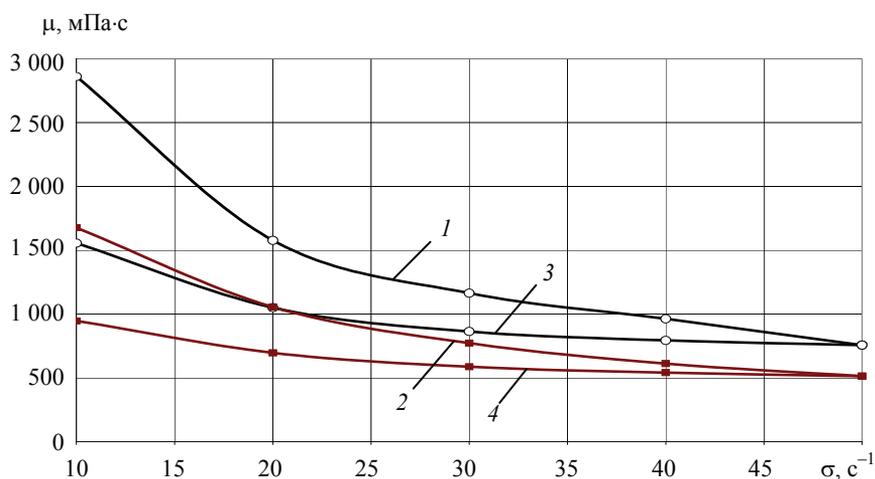


Рис. 1. Графики зависимости динамической вязкости нефти от скорости сдвига при температуре 20 °С (прямой и обратный ход для образцов нефти без обработки (1, 3) и после обработки в РИА (2, 4))

в каналы статора. Вторым фактором воздействия на жидкость является частота вращения ротора, от величины которой существенно зависят амплитуда и частота импульсов давления.

Экспериментальные данные, полученные при исследовании процесса обработки нефти в установке на базе РИА [8], позволяют определить удельные энергетические характеристики процесса. Удельная энергия ε , Дж/кг, затраченная на обработку единицы массы нефти за единицу времени, складывается из потребляемой мощности N_1 на вращение ротора РИА, и мощности внешнего насоса N_2 на подачу нефти в РИА за время обработки:

$$\varepsilon = (N_1 + N_2)\tau/m,$$

где τ – время обработки образца нефти, с; m – масса образца обрабатываемой нефти, кг, $m = V\rho$, V – объем образца обрабатываемой нефти, м^3 , ρ – плотность нефти, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В качестве потребляемой мощности РИА и насоса примем мощность электродвигателя на валу. Мощность электродвигателя рассчитывается по формуле

$$N = 1,73IU \cos \varphi(\eta/100),$$

где I – сила тока, А; U – напряжение, В; η – КПД электродвигателя, %.

Удельная потребляемая мощность в кВт·ч на обработку 1 т образца нефти определяется как $N_{\text{уд}} = \varepsilon/3\,600$, учитывая, что $1 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3\,600 \text{ Дж}$.

Экспериментальные и расчетные значения энергетических параметров и величины удельных значений снижения вязкости образца нефти после обработки в РИА, приведены в табл. 1.

На рисунках 2 и 3 показаны графики зависимости удельной потребляемой мощности на обработку нефти в зависимости от подачи нефти насосом в РИА и скорости сдвига на поверхности ротора.

Режимные параметры обработки образца нефти

Параметр	Подача насоса Q , м ³ /ч			
	2,5		5,4	
Частота вращения ротора РИА, об/с	50	70	50	70
Линейная скорость ротора, м/с	23,56	33	23,56	33
Скорость сдвига на поверхности ротора, с ⁻¹	314,1	440	314,1	440
Ток электродвигателя, А:				
РИА	5,0	5,6	6,1	6,6
насоса	4,6	4,6	3,8	3,8
Давление на входе в РИА, МПа	0,12	0,1	0,38	0,4
Фактическое время прокачки 1 м ³ нефти через РИА, с	1 500	1 500	700	700
Расчетная потребляемая мощность, Вт:				
РИА	2 517	2 819	3 070	3 322
насоса	2 315	2 315	1 913	1 913
Удельная мощность на обработку образца, Вт/кг	589	626	608	640
Удельная энергия на обработку образца, Дж/кг	8 839	9 391	4 254	4 470
Удельная потребляемая мощность, кВт·ч/т	2,45	2,6	1,2	1,25
Относительная величина снижения вязкости образца нефти при 20 °С для прямого хода кривой течения, %, при скорости сдвига вискозиметра, с ⁻¹ :				
10	32	41	40	29
30	22	32	27	18
50	15	32	24	7

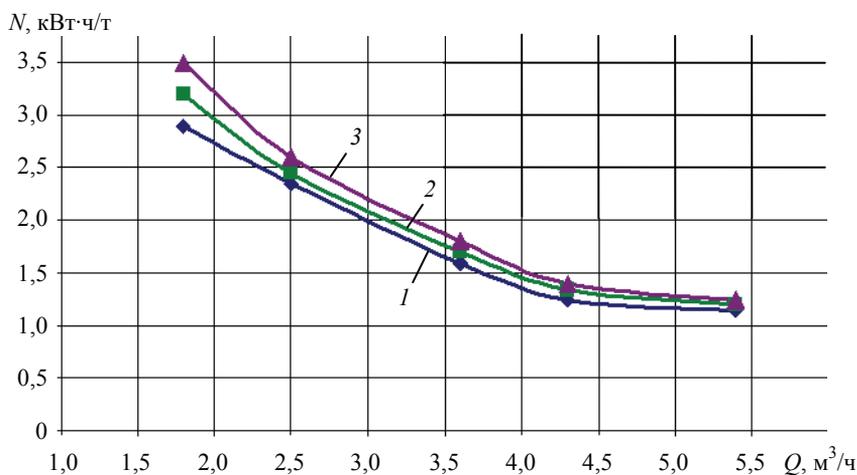
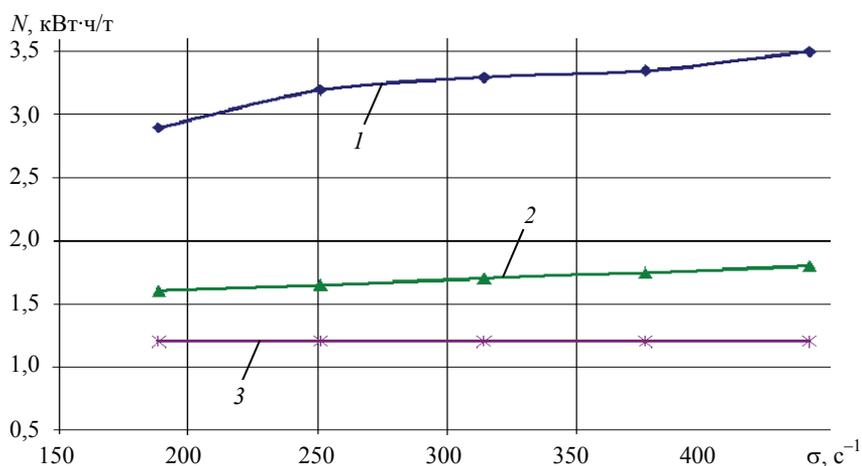


Рис. 2. Графики зависимости удельной потребляемой мощности на обработку нефти от величины подачи нефти насосом в РИА со скоростью сдвига, с⁻¹, на поверхности ротора:
1 – 190; 2 – 315; 3 – 440



**Рис. 3. Графики зависимости удельной потребляемой мощности на обработку нефти от скорости сдвига на поверхности ротора РИА при подаче нефти насосом Q , $\text{м}^3/\text{ч}$:
1 – 1,8; 2 – 3,6; 3 – 5,4**

Обсуждение результатов и выводы

Для исследуемого образца нефти наименьшая удельная потребляемая мощность 1,2 кВт·ч/т соответствует подаче насоса 5,4 $\text{м}^3/\text{ч}$. Низкие удельные энергозатраты обусловлены максимальной подачей насоса данного типа для исследуемого образца нефти, то есть высокой производительностью установки при относительно невысоких энергозатратах. Наибольшее снижение вязкости происходит при обработке с удельными затратами энергии в установке в среднем 2,6 кВт·ч/т при средней подаче насосом нефти в РИА около 2,5 $\text{м}^3/\text{ч}$. В этом случае наибольшее снижение вязкости происходит при наибольших удельных энергозатратах на обработку образца в установке на базе РИА.

При увеличении производительности в 2 раза, суммарные удельные затраты энергии на обработку нефти в РИА-150 снижаются также пропорционально. Режим с наибольшим расходом и относительно небольшой потребляемой мощностью также показывает существенное снижение вязкости нефти после однократного прохождения всего объема образца нефти через РИА. Низкие значения удельных энергозатрат обусловлены наибольшей подачей нефти в РИА для данной установки. Увеличение подачи нефти в РИА значительно снижает удельные энергозатраты на обработку при уменьшении вязкости нефти в среднем до 30 %.

Для роторного импульсного аппарата с данными геометрическими параметрами и характеристиками нефти зависимость удельной потребляемой мощности от величины подачи нефти в РИА и скорости сдвига на поверхности ротора описывается уравнением

$$N = (4,854 + 0,003\sigma)Q^{-0,96},$$

где N – удельная потребляемая мощность, кВт·ч/т; σ – скорость сдвига на поверхности ротора, с^{-1} ; Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Величина подачи нефти в РИА 5,4 $\text{м}^3/\text{ч}$ не является предельной для данного аппарата в экспериментальной установке. Давление на входе в РИА для режимов обработки с наибольшей подачей составило 0,4 МПа. Рабочее давление на входе в аппарат допускается до 1,2 МПа, что позволяет увеличить подачу нефти в РИА в 3 раза и тем самым снизить в большей мере удельные энергозатраты в соответствии с приведенной зависимостью.

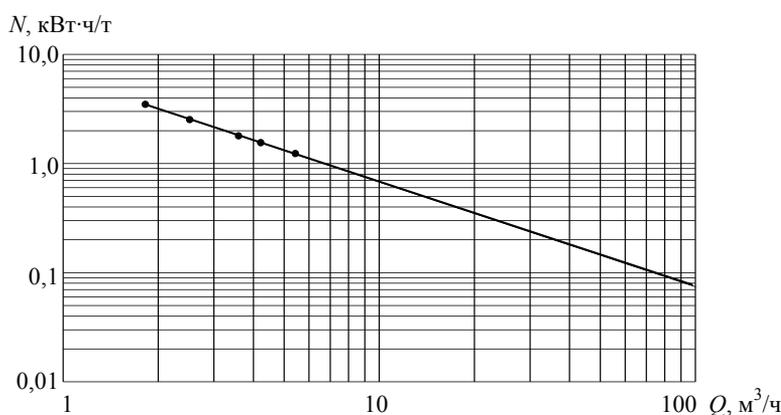


Рис. 4. График зависимости удельной потребляемой мощности на обработку нефти от подачи насоса в РИА (скорость сдвига на поверхности ротора $\sigma = 440 \text{ с}^{-1}$)

При промышленной обработке нефти РИА могут быть использованы для ее подготовки к транспортировке в трубопроводах. Роторные импульсные аппараты можно встроить в технологическую цепочку при перекачивании нефти из резервуаров в магистральные насосы на головных нефтеперекачивающих станциях. Установки непрерывного действия на базе РИА рекомендуется размещать на площадке головной нефтеперекачивающей станции между подпорными насосами и магистральной насосной станцией; на промежуточных нефтеперекачивающих станциях РИА – после магистральных насосов перед входом в трубопроводную систему. Обработку нефти целесообразно проводить после ее очистки в фильтрах-грязеуловителях.

Ориентируясь на зависимости снижения удельных энергозатрат при увеличении производительности пилотной установки на базе РИА, предварительные расчеты показывают, что для высокопарафинистой легкой нефти удельные энергозатраты для РИА такой же конструкции с производительностью $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более будут стремиться к величине менее $0,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ (рис. 4).

На основе опыта проектирования и эксплуатации РИА [12] сделан вывод, что промышленные аппараты для подготовки нефти к транспортировке можно изготовить с собственным напорным эффектом, производительностью $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более. При наличии лопаток в роторе падение давления РИА возможно компенсировать за счет гидравлического сопротивления аппарата. В этом случае нет необходимости в дополнительном насосе для подачи нефти в РИА, что также позволит снизить удельные энергозатраты на обработку высокопарафинистой нефти в РИА для улучшения ее реологических характеристик.

Список литературы

1. Кутуков, С. Е. Влияние вязкости нефти на энергоэффективность перекачки по магистральным нефтепроводам / С. Е. Кутуков, Я. М. Фридлянд, А. А. Шматов // Трубопроводный транспорт – 2017 : материалы XII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф., 24–25 мая 2017, Уфа. – Уфа, 2017. – С. 425 – 429.
2. Оценка гидравлической эффективности нефтепроводов по данным мониторинга технологических режимов эксплуатации / П. А. Ревель-Муроз, Я. М. Фридлянд, С. Е. Кутуков, А. И. Гольянов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 8 – 19. doi: 10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19

3. 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
4. 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
5. Experimental Study on Viscosity Reduction of Heavy Oil by Hydrogen Donors Using a Cavitating Jet / Chunhao Wan, Ruihe Wang, Weidong Zhou, Luopeng Li // Royal Society of Chemistry Advances. – 2019. – Vol. 9. – P. 2509 – 2515. doi: 10.1039/c8ra08087a
6. Влияние гидроимпульсной обработки на реологические параметры нефти / М. А. Промтов, Н. Ц. Гатапова, В. Я. Борщев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 243 – 253. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253
7. Сравнительная оценка эффективности «горячей» перекачки / А. И. Гольянов, Б. Г. Гриша, С. Е. Кутуков, О. В. Четверткова // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8, № 6. – С. 642 – 649.
8. Изменение реологических параметров высокопарафинистой нефти при многофакторном воздействии в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов, Р. З. Сунагатуллин, С. Е. Кутуков [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 5 (127). – С. 76 – 88. doi: 10.17122/ntj-oil-2020-5-76-88
9. 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
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. Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов / М. А. Промтов, А. С. Авсеев // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2007. – № 6. – С. 22 – 24.
12. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2015. – 148 с.

Estimation of Energy Costs when Processing High-Paraffinic Oil in Rotary Impulse Apparatus

M. A. Promtov¹, S. E. Kutukov², A. N. Koliukh¹, F. S. Zverev³

Department of Technological Processes, Apparatus and Technosphere Safety, mpromtov@yandex.ru; TSTU (1), Tambov, Russia;
Scientific and Technical Center LLC “NII Transneft” (2), Ufa, Russia;
LLC “Research Institute Transneft” (3), Moscow, Russia

Keywords: viscosity; energy costs; highly paraffinic oil; rotary pulse apparatus.

Abstract: The regularities of changes in energy consumption to reduce the viscosity of highly paraffinic oil during processing in an installation based on a rotary impulse apparatus (RIA) are experimentally investigated. The decrease in oil viscosity during processing in RIA exceeds 40%. An increase in the amount of oil supply to the RIA makes it possible to reduce the specific energy consumption for its processing

at the same relative value of the decrease in viscosity. Specific energy consumption decreases with an increase in oil consumption through the RIA according to the dependence close to the logarithmic one.

References

1. Kutukov S.Ye., Fridlyand Ya.M., Shmatkov A.A. *Truboprovodnyy transport - 2017* [Pipeline transport - 2017], Proceedings of the XII International educational, scientific and practical conferences, 24-25 May, 2017, Ufa, 2017, pp. 425-429. (In Russ.)
2. Revel'-Muroz P.A., Fridlyand Ya.M., Kutukov S.Ye., Gol'yanov A.I. [Assessment of the hydraulic efficiency of oil pipelines according to monitoring data of technological operating modes], *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov* [Science and technologies of pipeline transport of oil and oil products], 2019, vol. 9, no. 1, pp. 8-19, doi: 10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Khasanov I.I., Shakirov R.A., Leont'yev A. Yu. [et al.] [Review of modern methods of influencing the rheological properties of heavy high-viscosity oils], *Neftegazokhimiya* [Neftegazokhimiya], 2018, no. 3, pp. 49-54, doi: 10.24411/2310-8266-2018-10305 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Volkova G.I., Anufriyev R.V., Yudina N.V. [Influence of ultrasound on the composition and properties of paraffinic highly resinous oil], *Neftekhimiya* [Neftekhimiya], 2016, vol. 56, no. 5, pp. 454-460, doi: 10.7868/S0028242116050208 (In Russ.)
5. Wan Chunhao, Wang Ruihe, Zhou Weidong, Li Luopeng Experimental Study on Viscosity Reduction of Heavy Oil by Hydrogen Donors Using a Cavitating Jet, *Royal Society of Chemistry Advances*, 2019, vol. 9, pp. 2509-2515, doi: 10.1039/c8ra08087a
6. Promptov M.A., Gatapova N.Ts., Borshchev V.Ya., Koliukh A.N., Stepanov A.Yu., Sheina O.A. [Influence of hydraulic impulse treatment on rheological parameters of oil], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 243-253, doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Gol'yanov A.I., Grisha B.G., Kutukov S.Ye., Chetvertkova O.V. [Comparative evaluation of the efficiency of "hot" pumping], *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov* [Science and technology of pipeline transport of oil and oil products], 2018, vol. 8, no. 6, pp. 642-649. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Promptov M.A., Sunagatullin R.Z., Kutukov S.Ye. [et al.] [Changes in the rheological parameters of highly paraffinic oil under multifactor impact in a rotary impulse apparatus], *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov* [Problems of collection, preparation and transport of oil and oil products], 2020, no. 5 (127), pp. 76-88, doi: 10.17122/ntj-oil-2020-5-76-88 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Promptov M.A. [Hydroimpulse cavitation treatment of oil in a rotary impulse 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.)
10. Promptov M.A. [Changing the fractional composition of oil during hydroimpulse 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. Promptov M.A., Avseyev A.S. [Impulse technologies of oil refining and oil products], *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskiye dostizheniya i peredovoy opyt* [Neftepererabotka i neftekhimiya. Scientific and technical achievements and best practices], 2007, no. 6, pp. 22-24. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods of calculating the characteristics of a rotary impulse apparatus], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2015, 148 p. (In Russ.)

Die Bewertung der Energiekosten bei der Verarbeitung des hochparaffinierten Öls im Drehpulsgerät

Zusammenfassung: Es sind die Gesetzmäßigkeiten der Änderung des Energieverbrauchs zur Viskositätsreduzierung von hochparaffinischem Öl während der Verarbeitung in einer Anlage auf Basis eines Rotations-Impuls-Apparates (RIA) experimentell untersucht. Die Verringerung der Ölviskosität während der Verarbeitung in RIA übersteigt 40%. Die Erhöhung der Ölzufuhrmenge zum RIA ermöglicht es, den spezifischen Energieverbrauch für seine Verarbeitung bei gleichem relativen Wert der Viskositätsabnahme zu reduzieren. Der spezifische Energieverbrauch sinkt mit steigendem Ölverbrauch durch den RIA entsprechend der Abhängigkeit nahe der logarithmischen.

Estimation de la consommation d'énergie lors du traitement du pétrole hautement raffiné dans un appareil à impulsions rotatives

Résumé: Sont étudiés expérimentalement les modèles de la variation de la consommation de l'énergie pour réduire la viscosité du pétrole hautement raffiné lors du traitement dans une installation à impulsion rotative (IIR). La diminution de la viscosité du pétrole lors du traitement dans IIR dépasse 40 %. L'augmentation de la quantité du pétrole fourni à IIR permet de réduire les coûts énergétiques spécifiques pour son traitement avec la même valeur relative de la diminution de la viscosité. Les coûts énergétiques spécifiques diminuent avec l'augmentation de la consommation du pétrole à travers IIR en fonction d'une relation proche de celle logarithmique.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Кутуков Сергей Евгеньевич* – доктор технических наук, главный научный сотрудник управления математического моделирования и технологий трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, НТЦ ООО «НИИ Транснефть», г. Уфа, Россия; *Колух Александр Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Зверев Федор Сергеевич* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией химических реагентов, ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Россия.

Рецензент: *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.