

## КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ДИЗЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ НЕФТИ

**В.Б. Терентьева<sup>@</sup>, А.И. Николаев, Б.В. Пешнев, Н.А. Конькова***Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия**<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: [terenteva@mitht.ru](mailto:terenteva@mitht.ru)*

*Представлены результаты исследований влияния механохимической обработки дизельной фракции нефти на её физико-химические характеристики. Механохимическая обработка дизельной фракции достигалась созданием в гидродинамическом режиме кавитационного эффекта. Исследования проводились в диапазоне градиентов давлений до 50 МПа, число циклов обработки варьировалось от 1 до 5, температура сырья на входе в аппарат - 0 °С. Показано, что эффект от кавитационного воздействия проявляется не только при обработке высококипящих углеводородов, но и на среднестиллятных фракциях. Так, в результате кавитационного воздействия снижается плотность дизельной фракции, температура её застывания, происходит изменение фракционного состава. Высказано предположение о том, что эти изменения связаны с деструкцией углеводородов. Схлопывание пузырьков газа приводит к локальному повышению температуры среды до 800 °С, что, в свою очередь, и приводит к деструкции углеводородов. Повышение градиента давлений гидродинамического потока усиливает отмеченный эффект. При увеличении числа циклов обработки отмечено снижение достигнутого эффекта. Возможная причина заключается в деструкции углеводородов, образовавшихся на первом этапе обработки и образовании полициклических и ароматических структур. Представленные в статье результаты расширяют представления о закономерностях протекания кавитации в среде углеводородов.*

**Ключевые слова:** кавитационная обработка, кавитация, дизельная фракция, температура застывания.

## CAVITATIONAL TREATMENT OF OIL DIESEL FRACTION

**V.B. Terentyeva<sup>@</sup>, A.I. Nikolaev, B.V. Peshnev, N.A. Kon'kova***Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia**<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: [terenteva@mitht.ru](mailto:terenteva@mitht.ru)*

*The results of investigation on the effect of mechanochemical treatment of the diesel fraction on its physicochemical characteristics are presented. Mechanochemical treatment of the diesel fraction was achieved by creating a cavitation effect in the hydrodynamic regime. The studies were carried out in the range of pressure gradients up to 50 MPa, the number of treatment cycles varied from 1 to 5, the temperature of raw material at the apparatus inlet was 0 °C. It is shown that the effect of cavitation is manifested not only in the processing of high-boiling hydrocarbons, but also in a middle distillate directions. So, as a result of the cavitation effect, the density of the diesel fraction and its pour point decrease, and the fractional composition changes. It is suggested that these changes are associated with hydrocarbon degradation. The collapse of gas bubbles leads to a local increase in the temperature of the medium to 800 °C, which, in turn, leads to the destruction of hydrocarbons. Increasing the pressure gradient of the hydrodynamic flow enhances the noted effect. Increasing the number of treatment cycles reduces the effect achieved. A possible reason is the destruction of hydrocarbons formed in the first stage of processing and the formation of polycyclic and aromatic structures. The results presented in the article extend ideas about cavitation regularities in the hydrocarbon environment.*

**Keywords:** cavitation treatment, cavitation, diesel fraction, pour point.

В последние годы заметно изменилось отношение к кавитации. Помимо нежелательного, отрицательного явления, приводящего к разрушению лопастей турбин гидроэлектростанций и гребных винтов судов [1], ее стали рассматривать как способ интенсификации процессов массообмена [2, 3]. Установлено, что кавитационная обработка позволяет существенно изменить характеристики широкого спектра материалов, включающего как разнообразные нефтепродукты (моторные топлива, мазуты, битумы), так и продукты питания (молоко) [4–7].

Особое место в ряду этих работ занимают исследования влияния кавитационной обработки на характеристики нефтей и нефтепродуктов. Это связано с тем, что в энергетическом балансе страны с каждым годом возрастает доля высоковязких нефтей, запасы которых почти в пять раз превышают запасы нефтей малой и средней вязкости [8]. Их добыча и последующая транспортировка связаны с повышенными затратами. Одним из способов изменения реологических характеристик высоковязких нефтей (соответственно, и снижения затрат на транспортировку) является их ультразвуковая обработка в комбинации с добавками химических реагентов [9, 10]. Между тем, в работе [11] показано, что в результате только кавитационной обработки возможно снижение плотности нефти и тяжелых нефтяных фракций (мазута, гудрона).

О причинах изменения характеристик нефтепродуктов в результате кавитационного эффекта существуют различные предположения. По мнению авторов, изменение плотности нефтепродуктов, наиболее вероятно, связано с тем, что под действием изменяющегося давления энергия, образующаяся при схло-

пывании растворенных в нефтепродукте пузырьков газа, высвобождается. Это приводит к повышению температуры в точке схлопывания пузырька.

По данным работы [1], температура в точке схлопывания пузырька может достигать 800 °С. При таких температурах в объеме углеводородов протекают реакции их разложения, приводящие к образованию углеводородов с меньшей, по сравнению с исходной, молекулярной массой [12], а соответственно – плотностью. В окружающей точку схлопывания среде температура практически не изменяется, и эту среду можно считать закалочной жидкостью, не позволяющей развиваться дальнейшей деструкции углеводородов.

Уменьшение молекулярной массы углеводородов приводит не только к снижению плотности и вязкости нефтепродуктов, но и к уменьшению температуры их застывания. Следует отметить, что задача, связанная со снижением температуры застывания, актуальна не только для транспортировки высоковязких нефтяных фракций, но и для дизельных фракций. Климатические условия в Российской Федерации таковы, что сезонные и суточные изменения температуры могут варьироваться в широком диапазоне значений, и к низкотемпературным свойствам нефтяных фракций, топлив, в том числе дизельного, предъявляются повышенные требования.

В статье представлены результаты исследования кавитационного воздействия на изменение характеристик дизельной фракции нефти.

### Экспериментальная часть

Физико-химические характеристики объекта исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики дизельной фракции

Показатель	Значение
Температура застывания, °С	-12
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0.8363
Цетановое число, ед.	52
Фракционный состав, °С	
температура начала кипения	155
температура выкипания 50% об.	267
температура выкипания 96% об.	356

Обработка дизельной фракции проводилась в дезинтеграционном аппарате ДА-1 [13, 14]. Принцип действия аппарата основан на перетекании нефтепродукта через щель регулируемого сечения из зоны высокого давления (которое можно регулировать) в зону атмосферного давления. Именно в результате такого резкого снижения давления и возникает кавитационный эффект. В процессе исследований давление на входе в аппарат варьировалось от 20 до

50 МПа, а количество циклов обработки – от 1 до 5 раз. Температура дизельной фракции на входе в зону высокого давления составляла ~ 0 °С.

### Результаты и их обсуждение

Влияние давления обработки (однократное воздействие) на температуру застывания и плотность дизельной фракции показано в табл. 2.

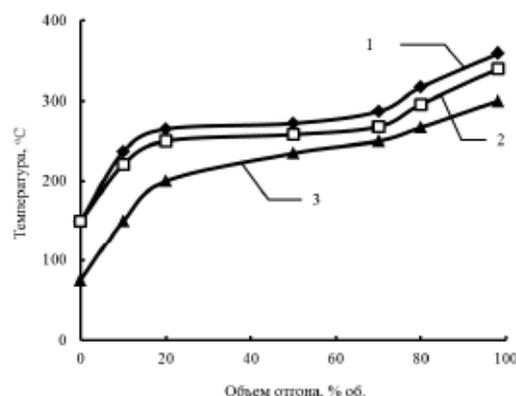
Таблица 2. Влияние давления кавитационного воздействия на характеристики дизельной фракции (1 цикл обработки)

Показатель	Давление кавитационного воздействия, МПа			
	20	30	40	50
Температура застывания, °С	-13	-15	-16	-32
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0.8355	0.8354	0.8335	0.8301

Видно, что с увеличением давления кавитационного воздействия температура застывания дизельной фракции снижается. Наилучший результат был получен при давлении 50 МПа. В результате этого воздействия температуру застывания дизельной фракции удалось понизить от -12 до -32 °С. Плотность дизельной фракции также снижалась при повышении давления кавитационной обработки.

Полученные данные вполне объяснимы, если допустить, что в результате кавитационного воздействия протекают реакции деструкции углеводородов (с образованием продуктов с меньшей молекулярной массой). Образование продуктов с меньшей молекулярной массой (меньшей температурой кипения) подтверждается сопоставлением данных о фракционном составе исходной и обработанной дизельной фракции (рисунок).

Надо отметить, что изменения углеводородного состава дизельной фракции, происходящие в результате однократного кавитационного воздействия и приводящие к уменьшению значений ее температуры застывания и плотности, негативно сказываются на способности фракции к самовоспламенению. Так, значение цетанового числа дизельной фракции снижается с 52 единиц у исходной фракции до 48 единиц, отмеченных у фракции, подвергнутой кавитационному воздействию при 50 МПа. Однако это



Влияние давления обработки на фракционный состав дизельной фракции:

- 1 – исходная дизельная фракция; 2 – дизельная фракция, подвергнутая однократному воздействию при  $P = 20$  МПа; 3 – дизельная фракция, подвергнутая однократному воздействию при  $P = 50$  МПа.

снижение не критично, существенно не сказывается на эксплуатационных характеристиках и полностью нивелируется положительным эффектом, достигаемым снижением температуры застывания.

Информация о влиянии числа циклов кавитационного воздействия на характеристики дизельной фракции показано в табл. 3.

Таблица 3. Влияние числа циклов кавитационной обработки на характеристики дизельной фракции (давление обработки 50 МПа)

Показатель	Число циклов кавитационного воздействия		
	1	3	5
Температура застывания, °С	-32	-15	-14
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0.8301	0.8425	0.8485
Цетановое число	48	50	51
Фракционный состав, °С			
температура начала кипения	74	79	80
температура выкипания 50% об.	249	263	270
температура выкипания 96% об.	313	346	355

Видно, что увеличение числа циклов кавитационного воздействия приводит к повышению цетанового числа с 48 до 51 единицы, но при этом также повышаются температура застывания и плотность дизельной фракции.

Для выявления причин этого явления необходимы дополнительные исследования. Наиболее

вероятно, это связано с тем, что при увеличении числа циклов обработки процессы деструкции, приводящие к образованию циклических, полициклических и ароматических углеводородов (имеющих большую плотность, более высокие температуры кипения и застывания), получают дальнейшее развитие.

Представленные результаты расширяют представления о закономерностях протекания кавитации в среде углеводородов. Они свидетельствуют, что это явление можно рассматривать как вариант

термического воздействия на углеводороды и проявляется оно не только при обработке высококипящих фракций, но и в случае среднестиллятных фракций.

#### Список литературы:

1. Пирсол И. Кавитация. М.: Мир, 1975. 95 с.
2. Хафизов Ф.Ш., Афанасенко В.Г., Хафизов Н.Ф. Кавитирование жидкой фазы как способ интенсификации массообменных процессов // *Естественные и технические науки*. 2007. № 4. С. 267–268.
3. Хафизов И.Ф., Доронин Д.Б. Кавитация как интенсификатор в процессах массообмена // *Нефть и газ*. Тюмень. 2014. № 2. С. 106–110.
4. Хафизов И.Ф., Дегтерев Н.С., Докучаев В.В. Получение строительных битумов улучшенного качества с использованием кавитационно-вихревых эффектов // *Строительные материалы*. 2007. № 9. С. 42–43.
5. Зубрилов С.П., Селиверстов В.М., Браславский М.И. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах. Судостроение, 1988. 80 с.
6. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // *Вестник ТГТУ*. 2008. Т. 14. № 4. С. 861–869.
7. Промтов М.А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2008. № 2. С. 6–8.
8. Тахавудинов Ш.Ф., Муслимов Р.Х., Хисамов Р.С., Юсупов И.Г., Ибатуллин Р.Р., Абдулмазитов Р.Г. Разработка месторождений высоковязких нефтей и методы увеличения нефтеотдачи месторождений Республики Татарстан // *Сб. трудов науч.-практ. конф. «Высоковязкие нефти, природные битумы и остаточные нефти разрабатываемых месторождений»*. Казань, 1999. С. 28.
9. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Волкова Г.И., Прозорова И.В., Юдина Н.В. Исследование влияния ультразвукового воздействия и химических реагентов на реологические свойства вязких нефтей // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2010. № 5. С. 31–34.
10. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Баязитов В.М., Баранов Д.А., Новоторцев В.М., Еременко И.Л. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2011. № 5. С. 24–27.
11. Аистов Н.М., Моисеева Л.С. Применение ультразвуковой кавитации для улучшения качества товарного мазута // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 2-3. С. 55–57.
12. Сурков В.Г., Головкин А.К., Можайская М.В.

#### References:

1. Pirsol I. Cavitation. Moscow: Mir Publ., 1975. 95 p. (in Russ.).
2. Khafizov F.Sh., Afanasenko V.G., Khafizov N.F. Cavitation of the liquid phase as a method of mass-exchange processes intensification // *Estestvennye i tehicheskie nayki (Natural and Technical Sciences)*. 2007. № 4. P. 267–268. (in Russ.).
3. Khafizov I.F., Doronin D.B. Cavitation as an intensifier in mass-transfer processes // *Neft' i gas (Oil and Gas)*. Tyumen. 2014. № 2. P. 106–110. (in Russ.).
4. Khafizov I.F., Degterev N.S., Dokuchaev V.V. Preparation of construction bitumens of improved quality using cavitation-vortex effects // *Stroitelnye materiali (Construction Materials)*. 2007. № 9. P. 42–43. (in Russ.).
5. Zubrilov S.P, Seliverstov V.M., Braslavskiy M.I. Ultrasonic cavitation treatment of fuels on ships. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1988. 80 p. (in Russ.).
6. Promtov M.A. Prospects of applying cavitation technologies for intensification of chemical-technological processes // *Vestnik TGTU (Herald of TSTU)*. 2008. V. 14. № 4. P. 861–869. (in Russ.).
7. Promtov M.A. Cavitation technology for improving the quality of hydrocarbon fuels // *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie (Chemical and Petroleum Engineering)*. 2008. № 2. P. 6–8. (in Russ.).
8. Takhautdinov Sh.F., Muslimov R.Kh., Khisamov R.S., Yusupov I.G., Ibatullin R.R., Abdumazitov R.G. Development of high-viscosity oil deposits and increasing methods of oil recovery in the Tatarstan Republic // *Proceed. of the scientific-practical conference «High viscosity oil, natural bitumen and residual oil of developed deposits»*. Kazan', 1999. P. 28. (in Russ.).
9. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Volkova G.I., Prozorova I.V., Yudina N.V. Investigation of ultrasonic action and chemical reagents influence on the rheological properties of viscous oils // *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa (Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex)*. 2010. № 5. P. 31–34. (in Russ.).
10. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Bayazitov V.M., Baranov D.A., Novotortsev V.M., Eremenko I.L. The study of the effect of cavitation on the rheological properties of heavy oil // *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa (Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex)*. 2011. № 5. P. 24–27. (in Russ.).
11. Aistov N.M., Moiseeva L.S. Application of ultrasonic cavitation for improving the quality

Влияние условий механического воздействия на изменение состава парафинов нефти // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 3. С. 148–152.

13. Воробьев С.И., Торховский В.Н., Титорский И.А., Казмалы И.К. Механодеструкция углеводородов нефти с помощью дезинтегратора высокого давления // Вестник МИТХТ. 2008. Т. 3. № 3. С. 77–84.

14. Николаев А.И., Терентьева В.Б., Торховский В.Н., Воробьев С.И. Получение нефтяного кокса из модифицированного сырья // АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо. 2016. № 7 (112). С. 3–6.

of commercial fuel oil // Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk (Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences). 2017. № 2–3. P. 55–57. (in Russ.).

12. Surkov V.G., Golovko A.K., Mozhayskaya M.V. Influence of conditions of mechanical action on the change in composition of oil paraffin // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University). 2012. V. 321. № 3. P. 148–152. (in Russ.).

13. Vorobyev S.I., Torkhovskiy V.N., Tutorskiy I.A., Kazmaly I.K. Mechanical destruction of petroleum hydrocarbons with a high pressure disintegrator // Vestnik MITHT (Fine Chemical Technologies). 2008. V. 3. № 3. P. 77–84. (in Russ.).

14. Nikolaev A.I., Terentyeva V.B., Torkhovskiy V.N., Vorobyev S.I. Petroleum coke production from modified raw materials // AvtoGazoZapravochnyi Kompleks + Alternativnoe toplivo (AutoGaz Filling Complex + Alternative Fuel). 2016. № 7(112). P. 3–6. (in Russ.).

#### Об авторах:

**Терентьева Вера Борисовна**, аспирант кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

**Николаев Александр Игоревич**, доктор технических наук, доцент кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

**Пешнев Борис Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

**Конькова Нина Александровна**, студент кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

#### About the authors:

**Vera B. Terentyeva**, Postgraduate Student, A.N. Bashkirov Chair of Petrochemical Synthesis and Synthetic Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

**Alexandr I. Nikolaev**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, A.N. Bashkirov Chair of Petrochemical Synthesis and Synthetic Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

**Boris V. Peshnev**, D.Sc. (Engineering), Professor, A.N. Bashkirov Chair of Petrochemical Synthesis and Synthetic Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

**Nina A. Kon'kova**, Student, A.N. Bashkirov Chair of Petrochemical Synthesis and Synthetic Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).