

## ГИДРОИМПУЛЬСНАЯ КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА НЕФТИ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

М. А. Промтов

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; promtov@tambov.ru*

**Ключевые слова:** гидроимпульсная обработка; кавитация; микрокрекинг; нефть; роторный импульсный аппарат.

**Аннотация:** Выполнен анализ результатов экспериментальных исследований по оценке возможности микрокрекинга легкой и тяжелой нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке в роторном импульсном аппарате (РИА). Экспериментально установлено, что гидроимпульсное кавитационное воздействие РИА на нефть увеличивает выход дистиллята при перегонке под атмосферным давлением.

### Обозначения

$a, h$ – ширина и высота прямоугольного канала статора соответственно, м;	$t$ – время совмещения каналов ротора и статора, с;
$B(t)$ – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока;	$V(t)$ – средняя по сечению канала статора скорость потока жидкости, м/с;
$c$ – скорость звука в жидкости, м/с;	$\delta$ – величина зазора между ротором и статором, м;
$d$ – эквивалентный диаметр канала статора, м;	$\lambda(t)$ – коэффициент гидравлического сопротивления трения;
$E$ – энергия импульса давления, Дж;	$\nu$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м <sup>2</sup> /с;
$l$ – суммарная длина каналов ротора и статора, м;	$\xi(t)$ – суммарный коэффициент местного гидравлического сопротивления;
$\Delta P$ – общий перепад давления между полостью ротора и камерой статора, Па;	$\rho$ – плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> .
$R$ – радиус ротора, м;	$\nu$ – объем жидкости, м <sup>3</sup> ;
$S$ – площадь сечения канала статора, м <sup>2</sup> ;	$\omega$ – угловая скорость ротора, с <sup>-1</sup>

### Введение

Технология гидроимпульсной кавитационной обработки нефти позволяет увеличить выход светлых фракций при атмосферной перегонке за счет разрыва связей в углеводородных молекулах. Энергия, необходимая для разрыва связи углеводородных соединений, может быть сконцентрирована в локальном объеме при коллапсе кавитационных пузырьков [1]. Роторный импульсный аппарат (РИА) предназначен для структурных преобразований жидкости на микро- и наноуровнях в целях изменения ее физико-химических параметров, интенсификации массообменных и гидромеханических процессов [2]. Обработка жидкости в РИА осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: пульсаций давле-

ния, интенсивной кавитации, вихреобразования, ударных волн и нелинейных гидроакустических эффектов. Роторный импульсный аппарат осуществляет преобразование энергии низкой плотности в энергию высокой локальной концентрации в неустойчивых точках структуры вещества. Пространственная и временная концентрации энергии позволяют получить большую мощность импульсного энергетического воздействия, совершить энергетическую накачку, высвободить внутреннюю энергию вещества, инициировать многочисленные квантовые, каталитические, цепные, самопроизвольные, лавинообразные и другие энергонасыщенные процессы.

В работах [3 – 8] приводится информация об изменении молекулярного состава нефти при ее импульсной гидродинамической и кавитационной обработке. Гидродинамическая кавитационная обработка нефтепродуктов приводит к заметным изменениям их фракционного, углеводородного, группового и элементного составов.

### Теоретическая часть

Гидроимпульсная кавитационная обработка углеводородных жидкостей вызывает микрокрекинг больших углеводородных молекулярных соединений [3]. Необходимым условием для разрыва связи в молекулах углеводородных соединений является высокая локальная концентрация энергии импульсного воздействия в малом объеме обрабатываемой жидкости, которая должна быть сопоставима с энергией разрыва связи в молекулах углеводородных соединений.

При периодическом совмещении каналов ротора и статора в объем жидкости, находящемся в канале статора, генерируется импульс давления. Энергия импульса давления определяется по формуле [2]

$$E = \frac{\rho S^2}{2\pi c} \int_0^t \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 dt. \quad (1)$$

Зависимость изменения скорости жидкости за время совмещения каналов ротора и статора может быть определена по нестационарному уравнению Бернулли [2]

$$l \frac{dV}{dt} + \lambda(t) \frac{lV^2}{2d} + \xi(t) \frac{V^2}{2} + \frac{B(t)vV}{2d} = \frac{\Delta P}{\rho}. \quad (2)$$

Методика решения уравнения Бернулли приведена в работах [2, 9]. На основе решения уравнения (2) можно также определить зависимость ускорения потока жидкости от времени в канале статора и объем жидкости, который входит в канал статора за время совмещения каналов ротора и статора,

$$v = S \int_0^t V(t) dt, \quad (3)$$

где  $S = ah$ ,  $d = 2ah/(a + h)$ ,  $t = 2a/(\omega R)$ .

Удельную энергию на моль вещества обрабатываемой жидкости в канале статора можно определить по расчетному значению энергии в соответствии с уравнением (1) и величине молярной массы жидкости.

### Экспериментальная часть

Для определения возможности микрокрекинга нефти при гидроимпульсном кавитационном воздействии проведены эксперименты по обработке легкой ( $866 \text{ кг/м}^3$ ) и тяжелой ( $999 \text{ кг/м}^3$ ) нефти в РИА-250. Геометрические и технологи-

ческие параметры РИА-250 приведены в [2]. Нефть десять раз подвергалась импульсному многофакторному воздействию в РИА. Энергия, вводимая в объем обрабатываемой нефти с учетом затрат энергии на их подачу в РИА центробежным насосом, составила не менее 350 кДж/моль для обрабатываемых типов нефтей. Удельные затраты энергии при обработке нефти соотносятся с энергией диссоциации связей в молекулах углеводородов [1].

После обработки в РИА нефть перегоняли на лабораторном аппарате АРН-2 под атмосферным давлением. Данные по выходу дистиллята при разгонке обработанной и необработанной нефти представлены в табл. 1.

Анализируя данные по выходу дистиллята при разгонке обработанной и необработанной нефти, можно сделать вывод, что температура начала кипения (НК) легкой нефти снизилась на 9 %, температура НК для тяжелой нефти возросла на 6,7 %. Выход дистиллята до температуры 350 °С для обработанной легкой нефти по сравнению с необработанной нефтью увеличился на 6 %, выход дистиллята до температуры 350 °С для обработанной тяжелой нефти по сравнению с необработанной нефтью повысился на 23 %.

По экспериментальным данным отмечено, что плотность обработанной тяжелой нефти увеличилась. Величина изменения плотности нефти соизмерима с погрешностью измерения, и однозначный вывод об увеличении плотности обработанной нефти сделать нельзя. Изменение плотности нефти как положительное, так и отрицательное после гидродинамической кавитационной обработки также рассмотрено в работах [3, 7, 8].

Гидроимпульсная обработка нефти в РИА может вызвать разрыв молекулярной цепочки соединений по атомной связи С–С [2]. Предположим, что алкильные и боковые цепи ароматических кольцевых структур в нефти разрываются, что приводит к недостатку атомов водорода в образовании непредельных углеводородов (алкенов). Если при обработке нефти обеспечить введение водорода, то могли бы образовываться алканы, что привело бы к увеличению числа насыщенных алифатических углеводородов.

Таблица 1

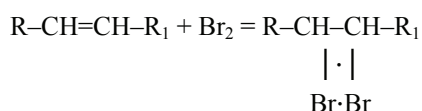
**Данные по выходу дистиллята при разгонке обработанной и необработанной нефти**

Показатели	Тип нефти			
	необработанная		обработанная	
	легкая	тяжелая	легкая	тяжелая
Плотность, кг/м <sup>3</sup> при 20 °С	867	999	866	1006
Температура НК, °С	56	112	51	120
Выход дистиллята, об. %, при температуре, °С:				
до 150	12,7	2,1	15,8	2,3
» 200	21,9	5,2	24,6	7,2
» 250	31,6	12,3	33,1	15,1
» 300	39,8	21,6	42,0	25,0
» 350	50,0	60,2	53,2	78,4

Значения бромного числа для тяжелой нефти

Вид тяжелой нефти	Бромное число	Изменение бромного числа, %
Необработанная тяжелая нефть	11,46	–
Тяжелая нефть после 10-кратной обработки в РИА	12,04	4,8
Смесь тяжелой нефти и 10%-го водного раствора лимонной кислоты после 10-кратной обработки в РИА	13,18	13,1

Для определения двойных связей в непредельных соединениях используют реакцию присоединения брома [10]



По количеству брома, затраченному на бромирование, вычисляют содержание непредельного соединения. Для смеси нескольких непредельных соединений или смеси неизвестного состава и молекулярного веса результаты выражают в виде условной величины – бромного числа. Бромное число – количество граммов брома, которое присоединяется к 100 г вещества.

В таблице 2 показаны значения бромного числа для тяжелой нефти (999 кг/м<sup>3</sup> при 15 °С). Необработанная тяжелая нефть имеет бромное число 11,46; обработанная в РИА при 10 циклах нефть – 12,04. Бромное число смеси тяжелой нефти с 10%-м водным раствором лимонной кислоты в соотношении 1:1 и последующей 10-кратной обработкой в РИА составило 13,18. Когда олефины реагируют с бромом, их двойные связи разрываются, атом брома прикрепляется к атому углерода и, в результате, бром теряет свою красно-коричневую окраску.

### Обсуждение результатов и выводы

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что гидроимпульсная кавитационная обработка в РИА может вызвать микрокрекинг углеводородных молекул как в легкой, так и в тяжелой нефти. Проведенные эксперименты показали, что выход дистиллята до температуры 350 °С для обработанной легкой нефти по сравнению с необработанной нефтью увеличился на 6 %, выход дистиллята до температуры 350 °С для обработанной тяжелой нефти по сравнению с необработанной нефтью увеличился на 23 %. Предположение о возможности микрокрекинга углеводородных молекул подтверждается увеличением бромного числа после обработки нефти в РИА.

### Список литературы

1. 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.
2. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата : монография / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с.

3. Нестеренко, А. И. Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации / А. И. Нестеренко, Ю. С. Берлиозов // *Химия и технология топлив и масел*. – 2007. – № 6. – С. 43 – 44.
4. 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.
5. О возможности увеличения глубины отбора вакуумных дистиллатов при перегонке нефти за счет предварительной механоактивации / С. В. Иванов [и др.] // *Вестник МИТХТ*. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 48 – 50.
6. Низкотемпературный крекинг углеводородов в кавитационных ультразвуковых полях / Б. И. Бахтин [и др.] // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. – 2009. – № 6. – С. 14 – 18.
7. Askarian, M. Heavy Oil Upgrading Via Hydrodynamic Cavitation in the Presence of an Appropriate Hydrogen Donor / M. Askarian, A. Vatani, M. Edalat // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – March. – Vol. 151. – P. 55 – 61.
8. Process Intensification of Upgradation of Crude Oil and Vacuum Residue by Hydrodynamic Cavitation and Microwave Irradiation / K. B. Ansari [et al.] // *Indian Chemical Engineer*. – 2015. – Apr. – P. 1 – 26.
9. Промтов, М. А. Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 83 – 89.
10. Пузин, Ю. И. Практикум по химии нефти и газа / Ю. И. Пузин. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – 142 с.

---

## Hydro-Pulse Cavitation Treatment of Crude Oil in the Rotor-Stator Device

M. A. Promtov

*Department of Technological Processes, Devices and Anthropogenic Safety,  
TSTU, Tambov, Russia; promtov@tambov.ru*

**Keywords:** cavitation; crude oil; hydro-pulse treatment; microcracking; rotor-stator device.

**Abstract:** The paper presents the analysis of the results of experimental studies to assess the feasibility of cracking of light and heavy oil by the hydro-pulse cavitation treatment in a rotor-stator device (RSD). It was established experimentally that hydro-pulse cavitation effect of RSD on the oil increases the yield of distillate due to its atmospheric distillation.

### *References*

1. Promtov M.A. [Change in the Fractional Composition of Petroleum Under Hydroimpulse Cavitation Treatment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 412-419. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata: monografiya* [Methods for Calculating the Characteristics of a Rotary Pulse Apparatus], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2015, 148 p. (In Russ.)
3. Nesterenko A.I., Berliozov Yu.S. [The Possibility of Cracking Hydrocarbons Under the Action of Cavitation], *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and Technology of Fuels and Oils], 2007, no. 6, pp. 43-44. (In Russ.)

4. Surkov V.G., Golovko A.K., Mozhaiskaya M.V. [Effect of Mechanical Impact on the Change in the Composition of Oil Paraffins], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 3, pp. 148-152. (In Russ.)

5. Ivanov S.V., Antonyuk P.S., Lutskovskaya V.A., Kravchenko V.V., Vorob'ev S.I., Torkhovskii V.N. [About the Possibility of Increasing the Depth of Selection of Vacuum Distillates During the Distillation of Oil due to Pre-Mechanical Activation], *Vestnik MITKhT* [Herald MITHT], 2012, vol. 7, no. 2, pp. 48-50. (In Russ.)

6. Bakhtin B.I., Desyatov A.V., Korba O.I., Kubyshkin A.P., Skorokhodov A.A. [Low-Temperature Cracking of Hydrocarbons in Cavitation Ultrasonic Fields], *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* [The World of Oil Products. Bulletin of Oil Companies], 2009, no. 6, pp. 14-18. (In Russ.)

7. Askarian M., Vatani A., Edalat M. Heavy Oil Upgrading via Hydrodynamic Cavitation in the Presence of an Appropriate Hydrogen Donor, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, March, vol. 151, pp. 55-61.

8. Ansari K.B., Loke N.H., Pandit A.B., Gaikar V.G., Sivakumar R., Kumar R., Das S. Process Intensification of Upgradation of Crude Oil and Vacuum Residue by Hydrodynamic Cavitation and Microwave Irradiation, *Indian Chemical Engineer*, 2015, Apr., pp. 1-26.

9. Promtov M.A., Stepanov A.Yu. [Computer System for Calculating the Rotary Pulse Apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 83-89. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Puzin Yu.I. *Praktikum po himii nefi i gaza* [Workshop on the Chemistry of Oil and Gas], Ufa: Izdatel'stvo UGNTU, 2004, 142 p. (In Russ.)

---

## Hydroimpuls - Kavitationsbehandlung von Öl in dem Drehimpulsapparat

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Bewertung der Möglichkeit der Mikrokrackbildung von Leicht- und Schweröl bei der Hydropuls- Kavitationsverarbeitung in einem Drehimpulsapparat (RIA) analysiert. Es wurde experimentell festgestellt, dass der Hydropuls-Kavitationseffekt von RIA auf Öl die Ausbeute an Destillat während der Destillation unter Atmosphärendruck erhöht.

---

## Traitement hydropulsé par cavitation du pétrole dans un appareil rotor d'impulsion

**Résumé:** Sont analysés les résultats des études expérimentales sur l'évaluation de la possibilité de microcraquage de l'huile légère et lourde dans lors du traitement hydropulsé par cavitation dans un appareil rotor d'impulsion (ARI). Expérimentalement est constaté que l'effet de la cavitation hydropulsé de l'ARI sur le pétrole augmente la production du distillat lors de la distillation sous pression atmosphérique.

---

**Автор:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.