

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**THEORETICAL BASES OF CHEMICAL TECHNOLOGY**

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482>



УДК 66-963;620.93

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**Оценка влияния гидродинамической кавитационной обработки темных нефтепродуктов на выход фракций, выкипающих до 400 °С**

**Б.В. Пешнев<sup>1</sup>, Е.В. Бурляева<sup>1</sup>, В.Б. Терентьева<sup>2</sup>, Д.В. Никишин<sup>1,✉</sup>, А.И. Николаев<sup>1</sup>, К.С. Андронов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова), Москва, 119571 Россия

<sup>2</sup>25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации, Москва, 121467 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: [nikishin@mirea.ru](mailto:nikishin@mirea.ru)

**Аннотация**

**Цели.** Снижение антропогенной нагрузки человечества на окружающую среду связывают с использованием альтернативных источников энергии. Однако часть из них имеет только региональное значение, а эффективность других дискуссионна. Для сокращения углеродного следа не меньший интерес представляют инновационные процессы, направленные на увеличение глубины переработки нефти. К числу таких процессов можно отнести и волновые технологии, частным случаем которых является кавитация. Кавитационные явления для нефтепереработки создают различными методами, наиболее перспективным из которых считаются гидродинамические. Установлено, что эффективность воздействия возрастает как при повышении давления при прокачке нефтепродукта, так и при увеличении количества актов воздействия. Цель данной работы – какой из двух факторов – градиент давлений или количество циклов воздействия – оказывает большее влияние на изменение характеристик нефтепродукта.

**Методы.** Явление кавитации создавали, прокачивая темные нефтепродукты через диффузор. Давление варьировалось от 20 до 50 МПа, а количество актов воздействия – от 1 до 10. Анализировалось влияние условий кавитации на изменение фракционного состава нефтепродуктов. В качестве целевых рассматривались фракции, выкипающие до 400 °С.

**Результаты.** Показано, что выход целевых фракций линейно увеличивается при повышении давления, возникающего в диффузоре. Зависимость выхода этих фракций от количества циклов обработки описывается моделью роста с насыщением. Предложено уравнение, описывающее влияние давления и количества циклов на выход фракции от температуры начала кипения ( $T_{НК}$ ) до 400 °С после кавитационной обработки темных нефтепродуктов. Установлена связь некоторых из коэффициентов этого уравнения с физико-химическими характеристиками исходного сырья.

**Выводы.** Предложено уравнение, позволяющее по физико-химическим характеристикам исходного сырья предсказать максимально возможный выход фракции  $T_{НК}$ –400 °С в результате кавитационной обработки при различных условиях ведения процесса. Ошибка прогнозирования не превышает 12%. Анализ полученного уравнения и сопоставление энергозатрат при различных режимах ведения процесса показывают, что больший выход целевого продукта достигается в результате увеличения давления, а не числа циклов обработки.

**Ключевые слова:** кавитация, нефтепродукты, переработка нефти, глубина переработки, энергетическая эффективность

*Для цитирования:* Пешнев Б.В., Бурляева Е.В., Терентьева В.Б., Никишин Д.В., Николаев А.И., Андронов К.С. Оценка влияния гидродинамической кавитационной обработки темных нефтепродуктов на выход фракций, выкипающих до 400 °С. *Тонкие химические технологии.* 2022;17(6):473–482. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482>

## RESEARCH ARTICLE

# Evaluation of the influence of hydrodynamic cavitation treatment of dark petroleum products on the yield of fractions with boiling points up to 400°C

**Boris V. Peshnev<sup>1</sup>, Elena V. Burlyayeva<sup>1</sup>, Vera B. Terenteva<sup>2</sup>, Denis V. Nikishin<sup>1,✉</sup>, Alexander I. Nikolaev<sup>1</sup>, Konstantin S. Andronov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

<sup>2</sup>The 25th State Research Institute of Himmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, 121467 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: [nikishin@mirea.ru](mailto:nikishin@mirea.ru)

### Abstract

**Objectives.** The reduction of the anthropogenic burden on the environment is generally associated with the transition to alternative energy sources. However, some of these have only regional significance, while the effectiveness of others remains doubtful. On this point, innovative processes aimed at increasing the depth of oil refining may be equally important for reducing the carbon footprint. Wave-based technologies such as cavitation may also be included in these processes. Among the various methods for inducing such cavitation phenomena in oil refining, hydrodynamic approaches are especially promising. It has been shown that the treatment effectiveness increases with greater pressure or when augmenting the number of cavitation processing cycles. The aim of this work is to identify the factor (i.e., pressure gradient or number of treatment cycles) having the greatest influence on the change of the characteristics of the oil product.

**Methods.** Cavitation phenomena were created by pumping dark oil products through a diffuser. The pressure gradient ranged from 20 to 50 MPa, while the number of cavitation processing cycles varied from 1 to 10. The influence of cavitation conditions on the change of fractional composition of petroleum products was analyzed. Target fractions are those having a boiling point up to 400°C.

**Results.** It is shown that increased pressure generated in the diffuser leads to a linear increase in the yield of desired cuts. The dependence of the yield of these fractions on the number of processing cycles is described by the growth model with saturation. A proposed equation describes the influence of pressure and number of cycles on the yield of the fractions from initial boiling point temperature ( $T_{IBP}$ ) to 400°C following cavitation processing of dark oil products. Some of the coefficients of this equation have been associated with the physicochemical characteristics of the feedstock.

**Conclusions.** An equation for predicting the maximum possible yield of the  $T_{IBP}$ –400°C fraction as a result of cavitation processing under different conditions of the process is proposed according to the physicochemical characteristics of the feedstock. The prediction error did not exceed 12%. The equation analysis and comparison of energy consumption between different process regimes shows that a higher yield of the target product is achieved by increasing pressure gradient rather than the number of processing cycles.

**Keywords:** cavitation, petroleum products, oil refining, depth of oil refining, energy efficiency

**For citation:** Peshnev B.V., Burlyayeva E.V., Terenteva V.B., Nikishin D.V., Nikolaev A.I., Andronov K.S. Evaluation of the influence of hydrodynamic cavitation treatment of dark petroleum products on the yield of fractions with boiling points up to 400°C. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2022;17(6):473–482 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482>

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировой энергетике прослеживается тенденция минимизации выбросов в атмосферу оксидов углерода (продуктов сгорания углеводородов). Для достижения этого предлагаются различные варианты: ветровая энергетика, водородная энергетика, аккумуляция солнечной энергии и т.п. Каждый из рассматриваемых способов имеет как свои достоинства (которые детально рассматривают авторы), так и недостатки (о которых они, как правило, умалчивают). Например, ветровая и геотермальная энергетика имеют только региональное значение. Использование солнечной энергии также осложняется сезонным фактором. Возобновляемые источники сырья (биотопливо) предполагают использование значительных площадей сельскохозяйственных угодий. Не все однозначно и с водородной энергетикой. Нулевой углеродный след у данного энергоносителя фиксируется только при получении водорода электролизом воды. Во всех остальных случаях углеродный след может оказаться даже больше, чем из традиционных энергоносителей.

В этой связи, для уменьшения антропогенной нагрузки человечества на окружающую среду целесообразно обратить внимание на технологии,

ориентированные на повышение глубины переработки нефти.

Под глубиной переработки нефти понимают отношение объема продуктов, полученных из нефти (за вычетом затрат на ее переработку), к объему переработанной нефти [1, 2]. При этом, как правило, рассматриваются только светлые продукты. Глубина переработки нефти в России оценивается в 84.4% и варьируется от 74.5% (предприятия ПАО НК «Роснефть») до 94.6% (Омский НПЗ, ПАО «Газпром нефть»). Для сравнения, глубина переработки нефти на предприятиях Европейского союза оценивается в 85%, а в Соединенных Штатах Америки – в 96%<sup>1</sup>.

Повышение глубины переработки нефти, как правило, связывают с использованием процессов висбрекинга, гидрокрекинга, коксования. В последние годы для увеличения выхода светлых фракций в процессах переработки нефти все чаще предлагают использовать новые процессы,

<sup>1</sup> Территория открытий. ПАО «НК «Роснефть». Годовой отчет. 2020. URL: [https://www.rosneft.ru/upload/site1/document\\_file/a\\_report\\_2020.pdf](https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2020.pdf) (дата обращения: 21.09.2021). [The territory of discoveries. PJSC Rosneft. Annual report. 2020. URL: [https://www.rosneft.ru/upload/site1/document\\_file/a\\_report\\_2020.pdf](https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2020.pdf) (accessed: September 21, 2021).]

базирующиеся на плазменных и волновых технологиях [3–5]. Последние следует признать более перспективными, т.к. они не предполагают полной деструкции сырья, но при этом удачно сочетаются (комбинируются) с традиционными процессами [6, 7]. К частным случаям волновых технологий относят и явление кавитации.

Явление кавитации заключается в зарождении на границе раздела фаз (жидкость–жидкость, жидкость–твердое тело) зародыша пузырька газа, его росте и последующем схлопывании. Отмечается, что на стадии сжатия пузырька газа температура может достигать 5000 К, а после схлопывании возрастать до 10000 К [8–10]. Если это явление происходит в среде углеводородов, то оно может привести к реакциям крекинга. Справедливость такого предположения подтверждается сообщениями о снижении температуры начала кипения нефтепродуктов и температур отгона 50% фракций и снижении вязкости [11–13]. Ряд исследователей после кавитационного воздействия фиксировали появление непредельных углеводородов и углеводородов меньшей молекулярной массы [14, 15].

Исследованию влияния кавитационного воздействия на физико-химические характеристики нефтепродуктов посвящено большое количество публикаций, но подавляющее их количество носит описательный характер. Авторы преимущественно фиксируют происходящие изменения, а попыток обобщить их, предложить математическую модель, которая позволяла бы прогнозировать изменения, базирясь на характеристиках исходного сырья практически не предпринималось.

Остался в стороне и еще один важный момент. Исследователи отмечали, что при обработке сырья в гидродинамическом потоке изменения зависят не только от давления, возникающего в диффузоре, но и от количества циклов воздействия, но какой из этих факторов влияет на результат более существенно, не рассматривалось.

Настоящая работа посвящена выявлению оказывающих наибольшее влияние на изменение характеристик нефтепродукта факторов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были выбраны темные нефтепродукты первичной и вторичной переработки нефти: мазуты, газойль каталитического крекинга (ГКК), вакуумный газойль (ВГ) и мазут (ММ), предоставленные АО «Газпромнефть – МНПЗ», Россия, а также мазут (МК), предоставленный ПО «Киришиннефтеоргсинтез», Россия. Характеристики объектов исследования приведены в табл. 1.

Исследования проводились в соответствии с методикой, описанной в работах [6, 16]. Нефтепродукты прокачивались через диффузор, на котором создавалось давление и возникало явление кавитации. Давление варьировалось от 20 до 50 МПа, а количество циклов воздействия – от 1 до 10. За целевой показатель был принят суммарный выход фракций, выкипающих в температурном интервале от температуры начала кипения ( $T_{НК}$ ) до 400 °С.

**Таблица 1.** Характеристика объектов исследования  
**Table 1.** Characteristic of research subjects

Показатель Indicator	Образец Sample			
	ГКК CGO	ВГ VGO	ММ FOM	МК FOK
Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	1.1002	0.8998	0.9684	0.9478
Выход фракции $T_{НК}-350$ °С, мас. % Yield of $T_{НК}-350$ °С fraction, wt %	5.2	8.4	5.0	13.2
Выход фракции 350–400 °С, мас. % Yield of 350–400 °С fraction, wt %	25.8	34.5	9.0	15.8
Выход фракции 400–480 °С, мас. % Yield of 400–480 °С fraction, wt %	69.0	40.9	28.0	47.0
Выход фракции 480+ °С, мас. % Yield of 480+ °С fraction, wt %		16.2	58.0	24.0

*Примечание:* ГКК – газойль каталитического крекинга; ВГ – вакуумный газойль; ММ – мазут, предоставленный АО «Газпромнефть – МНПЗ»; МК – мазут, предоставленный ПО «Киришиннефтеоргсинтез».

*Note:* CGO – catalytic gas oil; VGO – vacuum gas oil; FOM – fuel oil provided by Gazpromneft – MNPZ; FOK – fuel oil provided by Kirishinefteorgsintez.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние условий обработки образца ММ на выход фракции  $T_{НК} - 400\text{ }^\circ\text{C}$  показано на рис. 1.

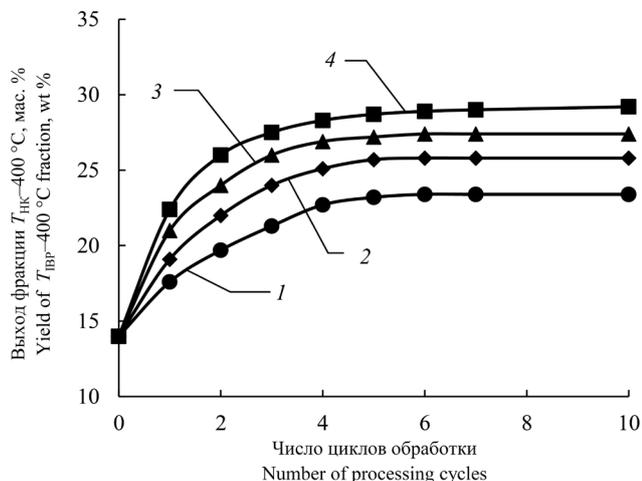


Рис. 1. Влияние условий обработки образца ММ на выход фракции  $T_{НК} - 400\text{ }^\circ\text{C}$ :

1 – давление обработки 20 МПа; 2 – давление обработки 30 МПа; 3 – давление обработки 40 МПа; 4 – давление обработки 50 МПа.

Fig. 1. Influence of the processing conditions on the yield of fractions  $T_{IBP} - 400\text{ }^\circ\text{C}$  of a fuel oil (Gazpromneft – NMPZ) sample: 1 – treatment pressure 20 MPa; 2 – treatment pressure 30 MPa; 3 – treatment pressure 40 MPa; 4 – treatment pressure 50 MPa.

Представленные результаты согласуются с полученными ранее: увеличение давления и количества циклов воздействия приводило к увеличению выхода фракции, выкипающей до  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . При этом наибольшее увеличение выхода целевых фракций происходило на первых циклах обработки. После 5 циклов воздействия существенного увеличения выхода фракций не фиксировалось, а кривая зависимости их выхода от количества циклов обработки выходила на линию насыщения. Аналогичные результаты были получены и для других образцов.

Подобные зависимости хорошо описываются моделями роста с насыщением. Такие модели на основе экспоненциальной зависимости часто называют функциями линейного роста, поскольку скорость роста исследуемой величины представляет собой убывающую линейную функцию [17]. Одна из таких моделей предложена Л. Берталанфи и в дальнейшем широко использовалась для решения задач в области химии и биологии [18].

В соответствии с этой моделью зависимость выхода фракций  $R$  от количества циклов  $t$  можно описать уравнением (1):

$$R(t) = A(1 - Be^{-kt}), \quad (1)$$

где  $A$  – предельное значение  $R$  (значение насыщения),  $B$  – коэффициент, характеризующий разность между начальным и предельным значениями  $R$  ( $R(0) = A(1-B)$ ),  $k$  – коэффициент скорости роста. Чем больше  $k$ , тем быстрее достигается насыщение.

Для всех образцов зависимость выхода целевых фракций от давления, вне зависимости от количества циклов обработки, носит линейный характер (рис. 2), а значения коэффициента корреляции между выходом фракции  $T_{НК} - 400\text{ }^\circ\text{C}$  и давлением превышают 0.98.

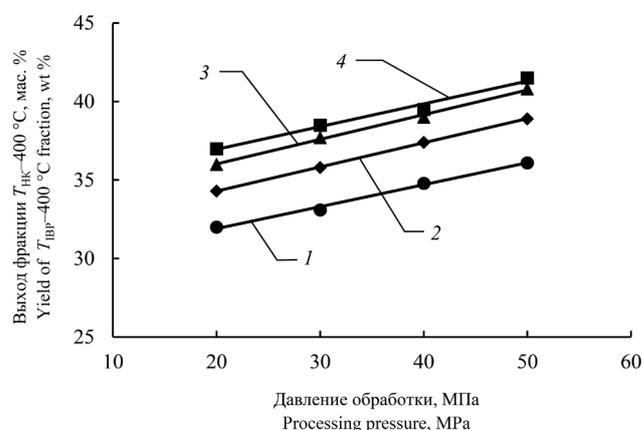


Рис. 2. Влияние давления обработки на выход фракции  $T_{НК} - 400\text{ }^\circ\text{C}$  образца МК: 1 – 1 цикл обработки; 2 – 3 цикла обработки; 3 – 5 циклов обработки; 4 – 10 циклов обработки.

Fig. 2. Influence of the processing conditions on the yield of fractions  $T_{IBP} - 400\text{ }^\circ\text{C}$  of a fuel oil (FOK) (Kirishinefteorgsintez) sample: 1 – 1 processing cycle; 2 – 3 processing cycles; 3 – 5 processing cycles; 4 – 10 processing cycles.

В итоге взаимосвязь между выходом фракции  $T_{НК} - 400\text{ }^\circ\text{C}$ , давлением и количеством циклов обработки образца можно описать следующей математической моделью (2):

$$R = (A_0 + A_1 \cdot p)(1 - (B_0 + B_1 \cdot p)e^{-(k_0 + k_1 \cdot p)t}) \quad (2)$$

Для каждого образца методом наименьших квадратов были рассчитаны все коэффициенты модели. Ошибка расчетных значений выхода фракции для каждого образца не превышала 3% (табл. 2). Таким образом, предложенная модель хорошо описывает экспериментальные данные.

Таблица 2. Коэффициенты модели роста и значения ошибки расчетов  
Table 2. Growth model coefficients and calculation error values

Образец Sample	Коэффициенты Coefficients						Ошибка, % Error, %	Ошибка при средних значениях $k$ , % Error at average values of $k$ , %
	$A_0$	$A_1$	$B_0$	$B_1$	$k_0$	$k_1$		
ГКК / CGO	33.4	0.45	0.16	0.005	0.38	0.005	1.7	2.0
ВГ / VGO	42.8	0.21	0.025	0.003	0.4	0.002	2.7	4.0
ММ / FOM	21.8	0.14	0.37	0.003	0.01	0.015	1.3	2.9
МК / FOK	34.4	0.13	0.16	0.002	0.15	0.011	2.7	2.9

Дальнейший анализ показал, что между выходом фракции  $T_{НК-400}$  °С исходного образца (до его обработки,  $R_0$ ) и значениями коэффициентов  $A_0$  и  $B_0$  имеется линейная зависимость, которая описывается уравнениями (3) и (4):

$$A_0 = 0.72 \cdot R_0 + 12.3 \quad (3)$$

$$B_0 = -0.012 \cdot R_0 + 0.53 \quad (4)$$

Значение коэффициента корреляции между  $A_0$  и  $R_0$  составляет 0.98, а между  $B_0$  и  $R_0$  – 0.99.

Использование средних по всем образцам значений коэффициентов роста  $k_0 = 0.26$  и  $k_1 = 0.009$  приводит лишь к незначительному увеличению ошибки, не более чем до 4%, поэтому эти коэффициенты можно принять за константы. Значения ошибки при выбранных значениях  $k_0$  и  $k_1$  также приведены в табл. 2.

Коэффициенты  $A_1$  и  $B_1$  характеризуют связь между выходом целевой фракции, давлением и количеством циклов. Связи между значениями этих коэффициентов и характеристиками исходного образца на основании имеющихся данных установить не удалось. Возможно, на значения этих коэффициентов влияет групповой состав сырья или его газосодержание. В работе [19] приведены результаты, свидетельствующие о влиянии газосодержания на выход и характеристики фракций нефтепродуктов при их кавитационной обработке. Эти результаты также позволяют предполагать влияние группового состава.

Анализ полученных результатов позволил предположить, что значение выхода фракции  $T_{НК-400}$  °С после проведения 7 циклов обработки (после выхода кривой на насыщение) при различных значениях давления может быть предсказано с использованием только данных об исходном образце (до проведения обработки). С помощью метода наименьших квадратов были определены коэффициенты линейной зависимости (5):

$$R = 0.25 \cdot p + 0.85 \cdot R_0 + 7.4 \quad (5)$$

Построенная модель является адекватной по критерию Фишера. Значение коэффициента детерминации  $R^2$  для этой модели составляет 0.85, ошибка – 12%.

Таким образом, до проведения кавитации можно оценить, до какой максимальной величины повысится выход целевой фракции в результате обработки при различном давлении.

Представленные результаты свидетельствуют о возможности прогнозирования эффективности воздействия (давления, создаваемого в диффузоре, и количества циклов воздействия) на выход фракций, выкипающих до 400 °С.

Анализ уравнения (2) позволяет предположить, что давление оказывает большее влияние на увеличение выхода целевой фракции. Для подтверждения были сопоставлены энергозатраты на создание кавитационных явлений при различных давлениях и циклах обработки и выход целевого продукта. Для этого использовалось уравнение (6), приведенное в работе [20] для расчета полезной мощности насоса:

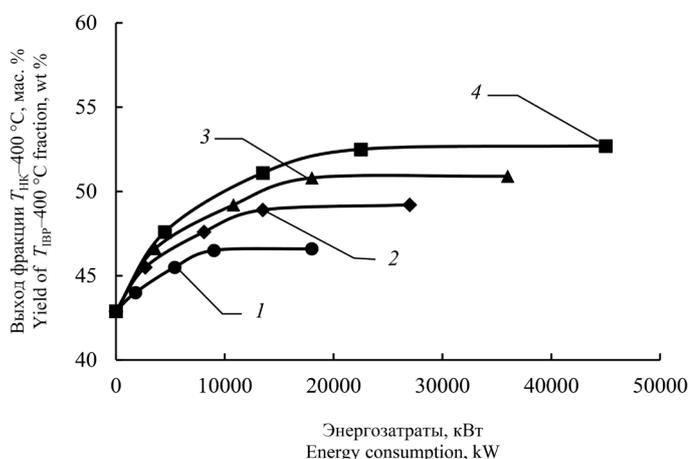
$$N_{п} = \rho V g H, \quad (6)$$

где  $N_{п}$  – полезная мощность насоса,  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;  $V$  – объемный расход (производительность) насоса,  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – напор.

При расчетах делалось допущение о постоянстве массы образца в процессе обработки, для этого было необходимо учитывать изменение плотности образца после каждого цикла воздействия. Во всех случаях объемный расход исходного образца принимался равным 0.1 м<sup>3</sup>/с.

Из уравнения (6) следует, что повышение давления (в 2, 3 и т.д. раз) или увеличение числа циклов обработки (в такое же количество раз) приводит к одинаковому возрастанию энергозатрат.

Связь между затратами энергии на создание кавитации при различных условиях ведения процесса и выходом фракции  $T_{НК}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Влияние энергозатрат и давления на выход фракции  $T_{НК}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  при кавитационной обработке образца ВГ: 1 – давление обработки 20 МПа; 2 – давление обработки 30 МПа; 3 – давление обработки 40 МПа; 4 – давление обработки 50 МПа.

**Fig. 3.** Influence of energy consumptions and pressure on the yield of fractions  $T_{НК}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  of a vacuum gasoil sample in cavitation processing: 1 – treatment pressure 20 MPa; 2 – treatment pressure 30 MPa; 3 – treatment pressure 40 MPa; 4 – treatment pressure 50 MPa.

Аналогичные результаты были получены и для других образцов. Видно, что энергозатраты сопоставимо возрастают как при увеличении давления, так и при увеличении числа циклов обработки, но больший эффект (увеличение выхода фракций  $T_{НК}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) достигается при повышении давления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Капустин В.М. *Технология переработки нефти*. В 4-х частях. Часть первая. *Первичная переработка нефти*. М.: КолосС; 2013. 334 с. ISBN 978-5-9532-0825-3
- Чеботова В.И., Уланов В.В. Глубина переработки нефти в России. *Деловой журнал NEFTEGAZ.RU*. 2021;(109):14–17.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований предложено уравнение, описывающее влияние давления и количества циклов на выход фракции  $T_{НК}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  после кавитационной обработки темных нефтепродуктов. Установлена связь некоторых из коэффициентов этого уравнения с физико-химическими характеристиками исходного сырья. Уравнение позволяет предсказать максимально возможный выход фракции  $T_{НК}-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  в результате кавитационной обработки при различных условиях ведения процесса по физико-химическим характеристикам исходного сырья. Ошибка прогнозирования не превышает 12%. Анализ полученного уравнения и сопоставление энергозатрат при различных режимах ведения процесса показывают, что больший выход целевого продукта достигается в результате увеличения градиента давлений, а не числа циклов обработки.

## Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

## Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

## REFERENCES

- Kapustin V.M. *Tekhnologiya pererabotki nefii*. V 4 ch. Ch. 1. *Pervichnaya pererabotka nefii (Oil Refining Technology. In 4 v. V. 1. Primary oil refining)*. Moscow: KolosS; 2013. 334 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9532-0825-3
- Chebotova V.I., Ulanov V.V. Oil refining depth in Russia. *Delovoi zhurnal NEFTEGAZ.RU = Business magazine Neftegaz.RU*. 2021;(109):14–17 (in Russ.).

3. Artemov A.V., Pereslavitsev A.V., Krutyakov Yu.A., Voshchinin S.A., Kudrinskii A.A., Bul'ba V.A., Ostryi I.I. Плазменные технологии переработки углеводородного сырья и отходов. *Экология и промышленность России*. 2011;(10):18–23.
4. Ганиева Г.Р., Тимеркаев Б.А. Плазмохимическое разложение тяжелых углеводородов. *Нефтехимия*. 2016;56(6):651–654. <https://doi.org/10.7868/S0028242116060046>
5. Пивоварова Н.А. Использование волновых воздействий в переработке углеводородного сырья (Обзор). *Нефтехимия*. 2019;59(7):727–738. <https://doi.org/10.1134/S002824211907013X>
6. Иванов С.В., Воробьев С.И., Торховский В.Н., Герзелиев И.М. Применение гидродинамической кавитации для повышения эффективности каталитического крекинга вакуумного газойля. *Тонкие химические технологии (Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова)*. 2013;8(3):67–69.
7. Балпанова Н.Ж., Тусипхан А., Гюльмалиев А.М., Ма Ф., Кызкенова А.Ж., Айтбекова Д.Е., Халикова З.С., Байкенова Г.Г., Байкенов М.И. Кинетика кавитации средней фракции каменноугольной смолы. *Химия твердого топлива*. 2020;(4):21–27. <https://doi.org/10.31857/S0023117720040027>
8. Иваницкий Г.К. Численное моделирование динамики пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2011;(7):52–58.
9. Bhangu S.K., Ashokkumar M. Theory of Sonochemistry. *Top. Curr. Chem.* 2016;374(4):56. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0054-y>
10. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.* 2018;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
11. Askarian M., Vatani A., Edalat M. Heavy oil upgrading via hydrodynamic cavitation in the presence of an appropriate hydrogen donor. *J. Petr. Sci. Eng.* 2017;151:55–61. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.037>
12. Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке. *Вестник Тамбовского государственного университета*. 2017;23(3):412–419. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>
13. Tao R., Xu. X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. *Energy & Fuels*. 2006;20(5):2046–2051. <https://doi.org/10.1021/ef060072x>
14. Бесов А.С., Колтунов К.Ю., Брулев С.О., Кириленко В.Н., Кузьменков С.И., Пальчиков Е.И. Деструкция углеводородов в кавитационной области в присутствии электрического поля при активации водными растворами электролитов. *Письма в журнал технической физики (Письма в ЖТФ)*. 2003;29(5):71–77.
15. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В., Иванов С.В., Антонюк С.Н., Городский С.Н. Превращение алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. Поведение среднецепных алканов C<sub>21</sub>-C<sub>38</sub>. *Тонкие химические технологии (Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова)*. 2014;9(4):59–69.
16. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Антонюк С.Н., Егорова Е.В., Иванов С.В., Кравченко В.В., Городский С.Н. Использование многоциклового кавитации для интенсификации переработки нефтяного сырья. *Технологии нефти и газа*. 2015;97(2):9–17.
3. Artemov A.V., Pereslavitsev A.V., Krutyakov Yu.A., Voshchinin S.A., Kudrinskii A.A., Bul'ba V.A., Ostryi I.I. Plasma technologies for processing hydrocarbon raw and waste materials. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;(10):18–23 (in Russ.).
4. Ganieva G.R., Timerkaev B.A. Plasmachemical method of exposure to heavy hydrocarbons. *Neftekhimiya*. 2016;56(6):651–654 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0028242116060046>
5. Pivovarova N.A. Use of wave effect in processing of the hydrocarbonic raw material (Review). *Pet. Chem.* 2019;59(6):559–569. <https://doi.org/10.1134/S0965544119060148>  
[Original Russian Text: Pivovarova N.A. Use of wave effect in processing of the hydrocarbonic raw material (Review). *Neftekhimiya*. 2019;59(7):727–738 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S002824211907013X>]
6. Ivanov S.V., Vorobyev S.I., Torhovskiy V.N., Gerzeliev I.M. The application of hydrodynamic cavitation to increase the efficiency of the catalytic cracking of vacuum gas oil. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol. (Vestnik MITHT)*. 2013;8(3):67–69 (in Russ.).
7. Balpanova N.Zh., Tusipkhan A., Gyl'maliev A.M., Ma F., Kyzkenova A.Zh., Aitbekova D.E., Khalikova Z.S., Baikenova G.G., Baikenov M.I. Kinetics of cavitation of an intermediate fraction of coal tar. *Solid Fuel Chem.* 2020;54(4):208–213. <https://doi.org/10.3103/S0361521920040023>  
[Original Russian Text: Balpanova N.Zh., Tusipkhan A., Gulmaliev A.M., Ma F., Kyzkenova A.Zh., Aitbekova D.E., Khalikova Z.S., Baykenova G.G., Baykenov M.I. Kinetics of cavitation of an intermediate fraction of coal tar. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2020;(4):21–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0023117720040027>]
8. Ivaniitskiy G.K. Numerical simulation of bubble cloud behavior in hydrodynamic cavitation. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii = Modern science: Researches, Ideas, Results, Technologies*. 2011;(7):52–58 (in Russ.).
9. Bhangu S.K., Ashokkumar M. Theory of Sonochemistry. *Top. Curr. Chem.* 2016;374(4):56. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0054-y>
10. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.* 2018;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
11. Askarian M., Vatani A., Edalat M. Heavy oil upgrading via hydrodynamic cavitation in the presence of an appropriate hydrogen donor. *J. Petr. Sci. Eng.* 2017;151:55–61. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.037>
12. Promtov M.A. Change in fractional composition of oil in hydro-pulse cavitation processing. *Vestnik TGTU = Transactions TSTU*. 2017;23(3):412–419 (in Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>
13. Tao R., Xu. X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. *Energy & Fuels*. 2006;20(5):2046–2051. <https://doi.org/10.1021/ef060072x>
14. Besov A.S., Koltunov K.Yu. Brulev S.O., Kirilenko V.N., Kuz'menkov S.I., Pal'chikov E.I. Destruction of hydrocarbons in the cavitation region activated by aqueous electrolyte solutions in the presence of electric field. *Tech. Phys. Lett.* 2003;29(3):207–209. <https://doi.org/10.1134/1.1565635>  
[Original Russian Text: Besov A.S., Koltunov K.Yu., Brulev S.O., Kirilenko V.N., Kuz'menkov S.I., Pal'chikov E.I. Destruction of hydrocarbons in the cavitation region activated by aqueous electrolyte solutions in the presence of electric field. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2003;29(5):71–77 (in Russ.).]

17. Скрябов Г.Я. Модели массопереноса и популяции с механизмом насыщения. *Математическое моделирование*. 2007;19(4):27–36.

18. Bertalanffy L. Basic concepts in quantitative biology of metabolism. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*. 1964;9(1–4):5–37. <https://doi.org/10.1007/BF01610024>

19. Пешнев Б.В., Николаев А.И., Терентьева В.Б., Никишин Д.В. Механохимическая активация нефтяного сырья. *Актуальные проблемы нефтехимии: Сборник тезисов докладов XII Российской конференции*. М.: ИХС РАН; 2021. С. 153–157. ISBN 978-5-990389144

20. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. *Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2014. 1758 с. ISBN 978-5-9963-2214-5

15. Torhovskiy V.N., Vorobyev S.I., Egorova E.V., Antonyuk S.N., Gorodskiy S.N., Ivanov S.V. Transformation of alkanes under treatment of single impulse of hydrodynamic cavitation. Behaviour of medium-chain alkanes C<sub>21</sub>–C<sub>38</sub>. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol. (Vestnik MITHT)*. 2014;9(4):59–69 (in Russ.).

16. Torhovskiy V.N., Vorob'ev S.I., Antonjuk S.N., Egorova E.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskiy S.N. Intensification of petroleum feedstock processing by multi-cycle cavitation. *Tekhnologii nefii i gaza = Oil and Gas Technologies*. 2015;97(2):9–17 (in Russ.).

17. Skryabov G.Ya. Models of mass transfer and population with saturation mechanism. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 2007;19(4):27–36 (in Russ.).

18. Bertalanffy L. Basic concepts in quantitative biology of metabolism. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*. 1964;9(1–4):5–37. <https://doi.org/10.1007/BF01610024>

19. Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Terent'eva V.B., Nikishin D.V. Mechanochemical activation of crude oil. In: *Aktual'nye problemy neftehimii (Actual Problems of Petrochemistry)*: Collection of Abstracts of Reports of the 12th Russian Conference. Moscow: INHS RAN; 2021. P. 153–157. (in Russ.). ISBN 978-5-990-389-144

20. Ainshtein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. Obshchii kurs. (Processes and Apparatuses of Chemical Technology. General Course)*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2014. 1758 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9963-2214-5

#### Об авторах:

**Пешнев Борис Владимирович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: peshnev@mirea.ru. Scopus Author ID 6507362823, <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

**Бурляева Елена Валерьевна**, д.т.н., профессор кафедры информационных систем в химической технологии Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: burlyayeva@mirea.ru. Scopus Author ID 36964878300, SPIN-код РИНЦ 3566-5894, <https://orcid.org/0000-0003-1371-1410>

**Терентьева Вера Борисовна**, к.т.н., младший научный сотрудник, 25 Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации (121467, Россия, Москва, ул. Молодоговардейская, д. 10). E-mail: terenteva-vb@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 9086-5440, <https://orcid.org/0000-0003-4624-1507>

**Никишин Денис Васильевич**, аспирант, заведующий лабораторией кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: nikishin@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4089-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4466-4402>

**Николаев Александр Игоревич**, д.т.н., доцент, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: nikolaev\_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57197582338, <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

**Андронов Константин Сергеевич**, магистр, кафедра технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: kostya.andronov.88@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6214-8607>

**About the authors:**

**Boris V. Peshnev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: peshnevbv@mail.ru. Scopus Author ID 6507362823, <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

**Elena V. Burlyaeva**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Information Systems in Chemical Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: burlyaeva@mirea.ru. Scopus Author ID 36964878300, RSCI SPIN-code 3566-5894, <https://orcid.org/0000-0003-1371-1410>

**Vera B. Terenteva**, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, 25th State Research Institute of Himmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation (10, Molodogvardeyskaya ul., Moscow, 121467, Russia). E-mail: terenteva-vb@mail.ru. RSCI SPIN-code 9086-5440, <https://orcid.org/0000-0003-4624-1507>

**Denis V. Nikishin**, Postgraduate Student, Head of the Laboratory, A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: nikishin@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4089-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4466-4402>

**Alexander I. Nikolaev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: nikolaev\_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57197582338, <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

**Konstantin S. Andronov**, Master, A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). [kostya.andronov.88@mail.ru](mailto:kostya.andronov.88@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0001-6214-8607>

*Поступила: 01.03.2022; получена после доработки: 20.06.2022; принята к опубликованию: 17.11.2022.  
The article was submitted: March 01, 2022; approved after reviewing: June 20, 2022; accepted for publication: November 17, 2022.*