

EDN: OHIJJZ

УДК 638.35

Disposal of Used Petroleum Products and Conditioning of Waste Water Based on Cavitation Technology in Circumpolar Territories

Tatiana A. Kulagina, Elena N. Zaitseva,
Olga G. Dubrovskaya and Ludmila V. Kulagina*
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 02.05.2024, received in revised form 17.05.2024, accepted 31.05.2024

Abstract. The problem of intensive development of the riches of Siberia and the North has become fundamentally relevant for Russia due to the depletion of the main explored reserves of natural resources in its European part. Accelerated development of the North and the Arctic, including the coast and shelf of the Arctic seas, aimed at strengthening the economic potential of Russia, means the development of basic industries (mining, oil and gas) with the creation of appropriate infrastructure. According to statistics, only about 0.3 % of the world's water resources can be obtained from rivers, lakes or available groundwater resources. Rapid growth in industrialization, especially in parts of Asia, is leading to severe pollution of rivers and aquifers due to unsustainable use of available resources. Thanks to the rapid development of water transport and intensive exploitation of liquid hydrocarbon reserves such as oil, the number of accidents and emergencies that initiate pollution of open water bodies is growing. The environmental and economic damage from oil spills in inland rivers is especially high due to their special geographical location and the extreme toxicity of the mixture of hydrocarbons. In this regard, the task of ensuring technogenic, environmental and energy safety of complex technical facilities and circumpolar regions as a whole comes to the fore. The rational and economical use of petroleum products is of particular importance. This applies, among other things, to all known types of oils: motor, industrial, compressor, transformer, turbine and others. Waste oils entering the natural environment are only partially removed or rendered harmless as a result of natural processes. The main part of them is a source of pollution of soils, soils, water bodies and atmospheric air, and leads to disruption of the reproduction of birds, fish, mammals, and has a harmful effect on humans. The main objective of this study, aimed at reducing the environmental impact of industrial enterprises on the natural environment, is the disposal and recycling of all types of waste from primary production. It is shown that the efficiency of recycling waste oils and other petroleum products in the Far North, taking into account environmental protection, requires a differentiated approach to the problem, taking into account the climate and accessibility of Arctic territories, as well as the use of cavitation technology.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: klvation@gmail.com

Keywords: oily waste, wastewater, recycling, cavitation impact, energy resources, natural environment.

Citation: Kulagina T. A., Zaitseva E. N., Dubrovskaya O. G., Kulagina L. V. Disposal of used petroleum products and conditioning of waste water based on cavitation technology in circumpolar territories. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(4), 414–428. EDN: OHIJZ



Утилизация отработанных нефтепродуктов и кондиционирование промышленных стоков на базе кавитационной технологии в условиях циркумполярных территорий

**Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева,
О. Г. Дубровская, Л. В. Кулагина**
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Проблема интенсивного освоения богатств Сибири и Севера стала принципиально актуальной для России в связи с исчерпанием основных разведанных запасов природных ресурсов в ее европейской части. Ускоренное освоение Севера и Арктики, включая побережье и шельф арктических морей, направленное на усиление экономического потенциала России, означает развитие базовых отраслей промышленности (горнодобывающей, нефтяной и газовой) с созданием соответствующей инфраструктуры. По статистике, только около 0,3 % мировых водных ресурсов можно получить из рек, озер или доступных ресурсов подземных вод. Быстрый рост индустриализации, особенно в некоторых частях Азии, приводит к сильному загрязнению рек и водоносных горизонтов из-за нерационального использования имеющихся ресурсов. Благодаря быстрому развитию водного транспорта и интенсивной эксплуатации запасов жидких углеводородов, таких как нефть, растет количество аварий и ЧС, инициирующих загрязнение открытых водоемов. Особенно высок эколого-экономический ущерб от разливов нефтепродуктов во внутренних реках, из-за их особого географического положения и крайней токсичности смеси углеводородов. В связи с этим на первый план выходит задача обеспечения техногенной, экологической и энергетической безопасности сложных технических объектов и циркумполярных регионов в целом. Особую важность приобретает рациональное и экономное расходование нефтепродуктов. Это относится в том числе и ко всем известным видам масел: моторным, индустриальным, компрессорным, трансформаторным, турбинным и другим. Отработанные масла, попадающие в окружающую природную среду, лишь частично удаляются или обезвреживаются в результате природных процессов. Основная их часть является источником загрязнения почв, грунтов, водных объектов и атмосферного воздуха и приводит к нарушению воспроизводства птиц, рыб, млекопитающих, оказывает вредное воздействие на человека. Основной задачей данного исследования, направленного на снижение экологического воздействия на природную окружающую среду промышленных предприятий, является утилизация и переработка всех видов отходов основного производства. Показано, что эффективность утилизации отработанных масел и других нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера с учетом защиты окружающей среды требует дифференцированного подхода к проблеме с учётом особенностей климата и доступности арктических территорий, а также использованием кавитационной технологии.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, стоки, утилизация, кавитационное воздействие, энергетические ресурсы, окружающая природная среда.

Цитирование: Кулагина Т. А. Утилизация отработанных нефтепродуктов и кондиционирование промышленных стоков на базе кавитационной технологии в условиях циркумполярных территорий / Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, О. Г. Дубровская, Л. В. Кулагина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(4). С. 414–428. EDN: OHIJZ

Введение

На данном этапе социально-экономического развития Российской Федерации на повестке дня стоит национальный комплексный проект модернизации и развития восточных территорий России от Урала до Тихого океана, где сосредоточена подавляющая часть природных ресурсов страны [1]. Топливо-энергетические ресурсы можно существенно расширить путем восстановления отработанных нефтепродуктов. Восстановленное топливо не уступает качеству первичного, а в отработанном масле доля содержания ценных углеводородов достаточно высока [2, 3]. Эффективность утилизации отработанных масел, когда их использование рассматривается в качестве источника энергии, зависит от качества и физических свойств топливной смеси.

Таким образом, на сегодняшний день несомненна тенденция к эколого-эффективной утилизации нефтесодержащих отходов, обусловленная ростом числа экологических проблем как локального, так и глобального уровней [4]. Однако полученных данных оказывается недостаточно, для результативной утилизации отработанных масел и других нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера с учетом защиты окружающей среды, требующих дифференцированного подхода к проблеме с учётом особенностей климата и доступности арктических территорий, а также использованием кавитационной технологии [5–13]. В этой связи особое значение приобретает создание эффективной и точной модели прогнозирования параметров качества воды для оценки экономической составляющей ликвидации аварийных состояний и принятия решения о способе локализации разлива.

Существующее требование Росприроднадзора по прекращению бесцельного сжигания отработанных масел является нормативным правовым актом прямого действия, согласно которому:

- отработанная продукция подлежит сдаче на пункты ее сбора для подготовки к последующей переработке (утилизации);
- прямой запрет применения отработанных масел в качестве топлива;
- обезвреживание отработанных масел в виде сжигания или любого другого метода их обработки, не приводящего к получению товарного сырья, не допускается.

Таким образом, ставится задача получения из отработанных промышленных масел товарного продукта в виде топлива. В большинстве арктических регионов, как и в целом по стране, наблюдается тенденция увеличения образования отходов производства и потребления. Подавляющая часть образующихся отходов в данных регионах приходится на предприятия добывающей промышленности. Важный экологический показатель – доля использованных и обезвреженных отходов, он отражает применение отходов для производства товаров, выполнения работ, оказания услуг или получения энергии, а также характеризует процессы обработки отходов, в том числе сжигание и обеззараживание на специализированных установках, в целях предотвращения вредного воздействия на здоровье человека и окружающую среду.

Атмосферный воздух в арктической зоне – жизненно важный компонент окружающей среды, состояние которого является одним из ведущих факторов, определяющих здоровье насе-

ления, санитарную и эпидемиологическую ситуацию на территории [14]. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух российской Арктики выше почти в три раза, чем в среднем по стране, объясняются высоким уровнем развития отраслей промышленности в этих регионах: энергетики, добычи полезных ископаемых, нефте- и газопереработки, лесопереработки и металлургии и пр. [15]. Высокий уровень развития отраслей промышленности в Арктическом регионе сделал весьма чувствительным экосистему данной территории к внешнему воздействию, а пространственное освоение неминуемо привело к негативному воздействию на окружающую природную среду Арктики, последствия которого становятся необратимыми.

Результаты и обсуждение

С целью получения хорошего эколого-экономического эффекта при утилизации отработанных масел путем сжигания разработаны технологии получения водотопливных эмульсий (ВТЭ). При сжигании ВТЭ увеличивается полнота сгорания, снижается объём выбросов CO, B(a)П и NOx, происходит минимальное сажеобразование, снижается температура в радиантной части печи или топках других устройств [6, 12].

Для сравнения образования компонентов технологических газов при сжигании различных видов жидкого топлива произведен расчет образования загрязняющих веществ согласно действующей методики определения выбросов ЗВ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час, по следующим вариантам:

- 1) сжигание мазута;
- 2) сжигание отработанного масла;
- 3) сжигание ВТЭ (отработанное масло + вода, в различных соотношениях).

Расход углеводородного топлива для котла ПКН-2М, заявленной мощностью 730 кВт, составляет 72 кг в час, годовая потребность в топливе определена величиной 5 тыс. тонн. Необходимые для расчета характеристики топлив взяты из табл. 1. Результаты полученных расчетов сведены в табл. 2 и представлены на рис. 1 и 2. На основе проведенных расчетов показано, что при сжигании водотопливной эмульсии, содержащей от 10 до 30 масс.% активированной воды, снижаются выбросы оксида углерода и оксидов азота на 15–30 %, бензапирена на 25–40 %.

Таблица 1. Характеристики топлив

Table 1. Fuel characteristics

Вид топлива		Годовой расход топлива, т	Характеристики		
			Q_p^H , МДж/кг	A^p , %	S^p , %
Мазут		5000	39,73	0,1	1,4
Отработанное трансмиссионное масло		5000	41,0	0,3*	0,5
ВТЭ «отработанное масло-вода»	воды 10 %	4500			
	воды 15 %	4250			
	воды 30 %	3500			

* наличие в маслах присадок, всегда содержащих тот или иной металл, приводит не только к повышению зольности масла, но также и к пропорциональному повышению коксового числа, что никак само по себе не может рассматриваться в качестве отрицательного фактора.

Таблица 2. Результаты расчетов образования загрязняющих веществ

Table 2. Results of calculations of the formation of pollutants

Вид топлива	Выбросы загрязняющих веществ, т/год (г/с)						Итого:
	NO ₂	SO ₂	CO	Углерод черный (сажа)	Б(а)П	V ₂ O ₅	
Мазут	22,0876 (0,7004)	137,2 (4,3506)	25,7987 (0,8181)	0,500 (0,0159)	0,000059 (0,0000019)	1,0555 (0,0335)	186,641859 (5,918375)
Отработанное трансмиссионное масло	22,7937 (0,7227)	49,00 (1,5538)	26,6234 (0,8442)	1,500 (0,0476)	0,000063 (0,0000019)	0	50,917163 (1,614572)
ВТЭ (10 масс.% воды)	20,5143 (0,6505)	44,10 (1,3984)	23,9610 (0,7597)	1,350 (0,0428)	0,000057 (0,0000018)	0	45,825357 (1,453113)
ВТЭ (15 масс.% воды)	19,3746 (0,6143)	41,65 (1,3207)	22,6298 (0,7176)	1,2750 (0,0404)	0,000045 (0,0000014)	0	43,279445 (1,372382)
ВТЭ (30 масс.% воды)	15,9556 (0,5059)	34,30 (1,0876)	18,6363 (0,5909)	1,0500 (0,0333)	0,000024 (0,0000007)	0	35,641924 (1,130197)

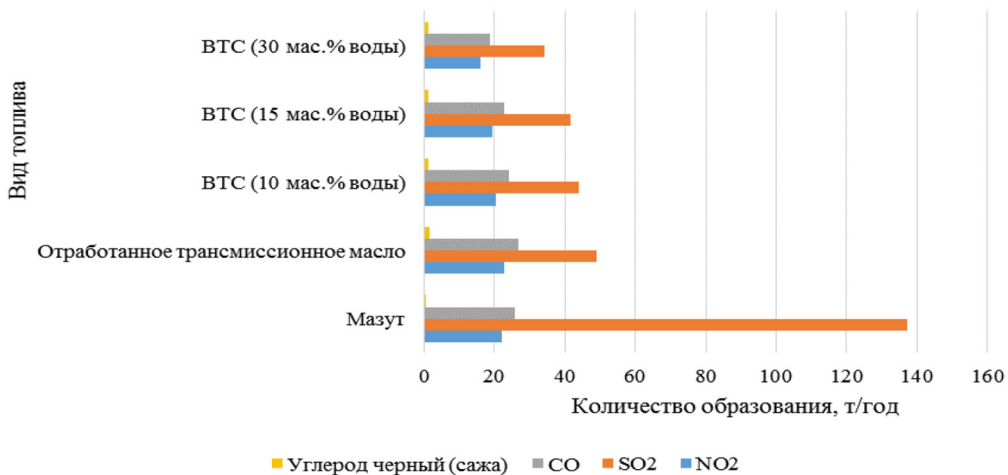


Рис. 1. Образование загрязняющих веществ в зависимости от вида сжигаемого топлива

Fig. 1. Formation of pollutants, depending on the type of fuel burned

Сжигание водотопливных эмульсий, представляющих собой смесь отработанного масла и воды, взамен исходного 100 % по составу углеводородного отхода позволяет сократить выбросы газообразных веществ и бензапирена. Данный способ утилизации отработанных масел в составе ВТЭ в условиях северных территорий является альтернативным решением, в отличие от дорогостоящей транспортировки использованных масел в средние регионы страны, и соответствует заявленным требованиям Росприроднадзора. Единственным, казалось бы, ограничением использования данной технологии может стать влияние низких температур на свойства воды, так как при минусовых температурах меняется ее агрегатное состояние. Более того, поскольку образование отходов в промышленном производстве избежать нельзя, создание такого рода эмульсий в местах их образования независимо от региона обеспечивает комплексное ис-

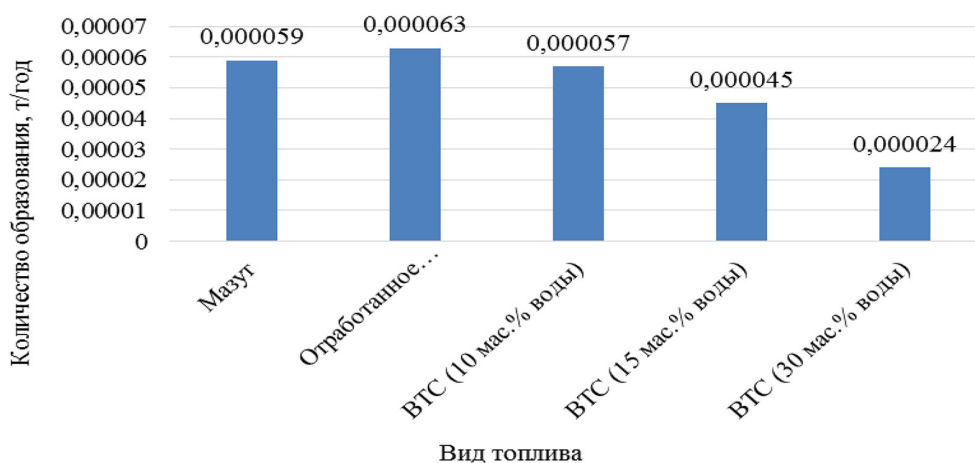


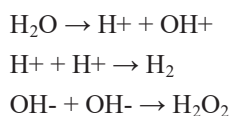
Рис. 2. Образование бензапирена в зависимости от сжигаемого вида топлива

Fig. 2. Formation of benzopyrene, depending on the type of fuel burned

пользование сырья и энергии, когда побочные продукты и отходы одного процесса являются сырьем или реагентами другого.

В представленной работе была выполнена серия экспериментов, направленная на исследование влияния степени кавитационного воздействия на свойства воды и оценки возможности структурных изменений при ее замораживании, хранении и последующей разморозки. Одним из перспективных направлений водоподготовки является кавитационная обработка воды [6]. Потенциал воды используется во всех сферах человеческой деятельности с самым разнообразным назначением: теплоноситель и рабочее тело в теплоэнергетике, растворитель в химии, хладагент в металлургии и пр.

Кавитация, представляющая собой процесс нарушения сплошности потока жидкости в тех участках, где местное давление, понижаясь, достигает некоторого критического значения, сопровождается образованием большого количества пузырьков, наполненных преимущественно парами жидкости, а также газами, выделившимися из жидкой среды. С возникновением кавитационных пузырьков и изменением их размеров процесс развития кавитации меняет физические и акустические свойства жидкости. На примере воды реакция диссоциации выглядит следующим образом:



Вода, насыщаясь кислородом за счёт гидродинамического кавитационного термолитиза, меняет своё энергетическое состояние, получая дополнительные степени свободы [8], обработка жидкости способствует ее активации, изменяет физико-химические свойства, интенсифицирует химико-технологические процессы. Для усиления кавитационного воздействия на жидкость необходимо комплексное многофакторное воздействие на обрабатываемую среду. Для этих целей используются гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнито-

стрикционные генераторы кавитации. Гидродинамические воздействия являются предпочтительными с экономической точки зрения [5].

Для исследования влияния низких температур на обработанную воду проведен ряд экспериментальных работ. Двенадцать проб, каждая по 500 мл, подверглись кавитационному воздействию в следующем порядке: время воздействия в четыре периода 1, 3, 5 и 10 мин. Вращение ротора кавитатора в каждом периоде составило 5, 10 и 15 тыс. об. в мин. После такого воздействия проба анализировалась по величине водородного показателя рН, удельной электропроводности (УЭП), температуре, солесодержанию, жесткости и щелочности (табл. 3). Затем каждый образец был помещен в морозильную камеру на сутки, а на следующий день последовательно поочередно разморожен с фиксацией ранее заявленных параметров (табл. 4). Исследования и измерения проводились с применением следующего оборудования: термометр лабораторный ТЛ-4, рН-метр/ионометр ИТАН, кондуктометр МАРК 603, морозильная камера Бирюса, суперкавитационный миксер Silverston 5L. Для определения жесткости воды использовались МУ 08–47/234, щелочности МУ 08–47/232.

Графическую зависимость полученных числовых значений параметров активированной воды до и после разморозки можно увидеть на рис. 3 и 4. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при использовании активированной подготовленной воды для получения водотопливной эмульсии воздействие погодных условий, например низких температур, которые характерны для северных территорий РФ, не оказывает влияния на физико-химические характеристики жидкости и данный ресурс применим для получения эмульсий с улучшенными для сжигания свойствами.

Кроме того, дополнительные экспериментальные данные позволяют говорить о том, что процесс кавитации, воздействующий непосредственно на отработанные индустриальные масла, благоприятно влияет на состав отработки: визуальное расслоение масла с эффектом освет-

Таблица 3. Характеристики проб воды, подвергшейся кавитации

Table 3. Characteristics of water samples subjected to cavitation

Номер пробы кавитированной воды	Время воздействия, мин	Скорость вращения, тыс. об/мин	рН	УЭП (МАРК 603)	t , °С	Солесодержание, мг/дм ³	Жесткость, мг экв/дм ³	Щелочность, мг экв/дм ³
1а	1	5	7,55	145,4	3,3	25	1,4	1,4
2а		10	7,6	139	3,6	22,75	1,4	1,8
3а		15	7,4	128	2	23	1,2	1,5
4а	3	5	7,4	129	2,3	22,8	1,4	1,8
5а		10	7,6	131	2	22,75	1,4	1,8
6а		15	7,4	129	3	23	1,2	1,6
7а	5	5	7,6	140,6	4	27	1,3	1,5
8а		10	7,3	131,8	2	23	1,8	1,2
9а		15	7,5	140,5	4	27,2	1,3	1,4
10а	10	5	7,6	138,2	4	25	1,6	1,2
11а		10	7,4	139	2	23,1	1,3	1,4
12а		15	7,4	140,1	2	23,8	1,4	1,4

Таблица 4. Характеристики проб воды, подвергшейся кавитации и размороженной после суток заморозки при $t = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ Table 4. Characteristics of water samples subjected to cavitation and defrosted after a day of freezing at $t = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$

Номер пробы кавитированной, размороженной воды	Время воздействия, мин	Скорость вращения, тыс.об/мин	pH	УЭП (МАРК 603)	$t, ^{\circ}\text{C}$	Солесодержание, мг/дм ³	Жесткость, мг экв/дм ³	Щелочность, мг экв/дм ³
1a'	1	5	8,75	132	14	70,3	1,9	2,1
2a'		10	8,1	112,5	10	51,3	1,7	2,2
3a'		15	8	110,1	12	54,1	1,5	1,9
4a'	3	5	8	110,5	12	52,5	1,7	2,1
5a'		10	8,1	108,7	13	53,1	1,7	2
6a'		15	8	112,1	13	52,5	1,6	1,9
7a'	5	5	8,8	131	11	59,8	1,8	2,1
8a'		10	8,5	124,8	12	58,1	2,4	1,9
9a'		15	8,7	130,8	10	60,1	1,8	1,9
10a'	10	5	8,7	127	10	58,1	2,1	2
11a'		10	8,8	128	11	59,2	2,2	2,1
12a'		15	8,7	128,8	10	58,2	2,3	2

ления и полученные результаты повышения вязкости продукта с оптимальной величиной pH. Объем восстановленного масла составляет до 75–80 % от исходного, оно пригодно для использования по прямому назначению, оставшееся количество, 20–25 %, может сжигаться в виде водотопливной смеси на предприятиях, оборудованных котлами на жидком топливе.

Арктический макрорегион играет исключительную роль в сохранении биоразнообразия и экологического равновесия всей планеты, хрупкость арктических экосистем повышает вероятность превращения региональных экологических проблем в глобальные, а значит, исследования окружающей среды Арктики и вопросов ее охраны приобретают на современном этапе особую важность. Однако в условиях Крайнего Севера эффективность исполнения зависит от ряда факторов, требующих дифференцированного подхода к проблеме с учётом особенностей климата и доступности арктических территорий. Рассматриваемые в работе предложения и полученные результаты могут реализовываться в местах непосредственного образования опасных отходов.

Кондиционирование стоков

При непрерывном увеличении водопотребления и загрязнении водоемов промышленными и бытовыми отходами острее ставится проблема интенсификации очистки вод и сохранения гидросферы. Это связано с тем, что возрастание объёмов сточных вод влечет за собой необходимость увеличения площадей, занимаемых очистными сооружениями, что не всегда возможно в условиях урбанизированных территорий. Поэтому перед предприятиями и городскими службами стоит задача использования инновационного оборудования, с применением современных материалов и технологий [16].

Скорость вращения ротора суперкавитационного миксера

Rotor speed of super cavitation mixer

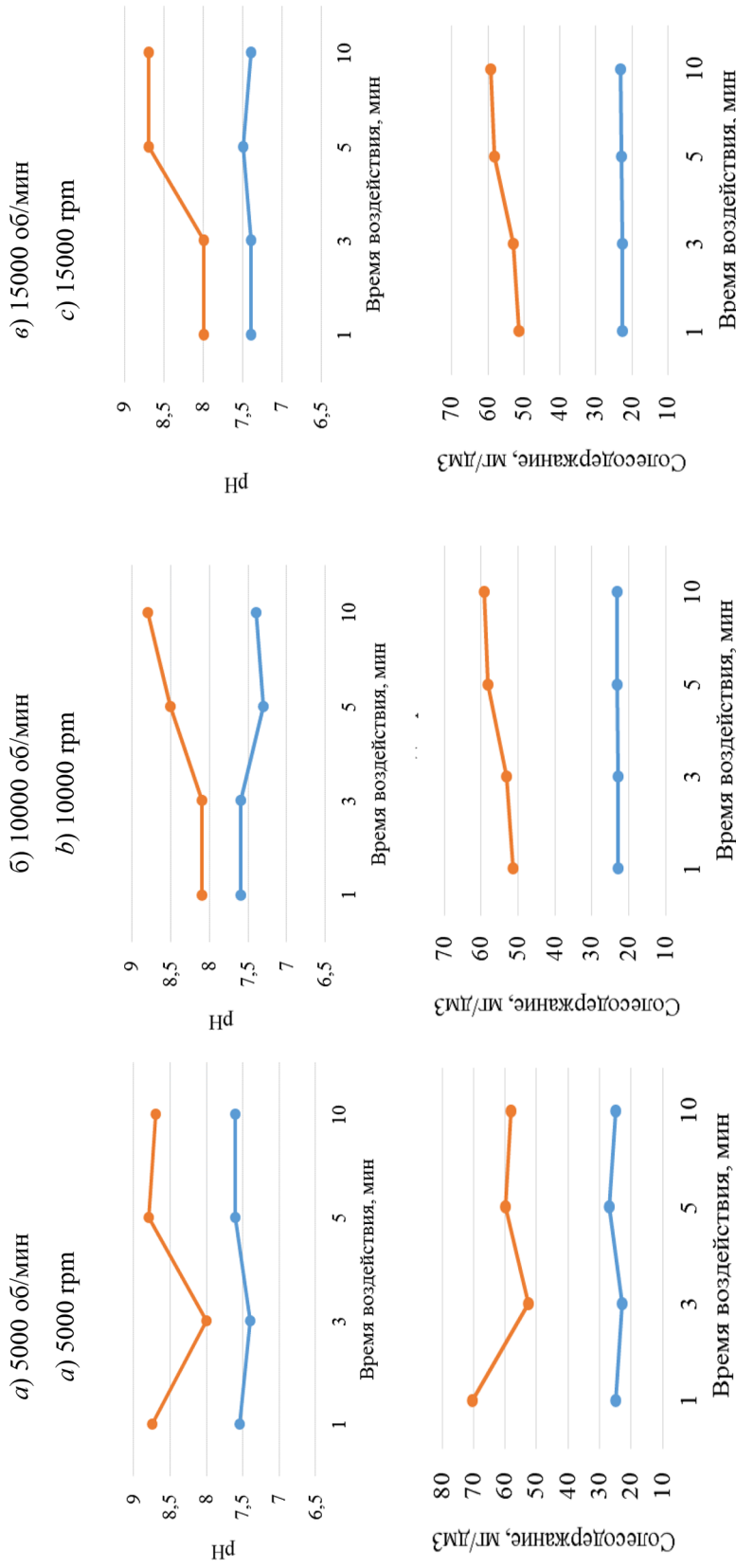


Рис. 3. Зависимости физико-химических параметров воды – pH и солевого содержания от времени кавитационной обработки: — кавитированная вода до заморозки, — кавитированная вода после разморозки

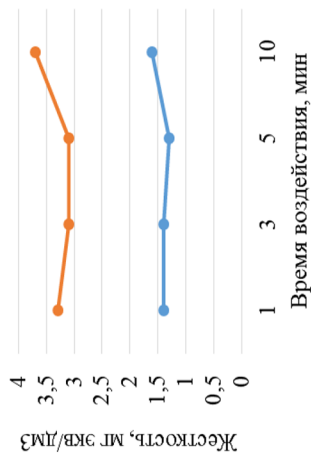
Fig. 3. Dependences of physical and chemical parameters of water – pH and salt content – on the time of cavitation treatment: — cavitated water before freezing; — cavitated water after defrost

Скорость вращения ротора суперкавитационного миксера

Rotor speed of super cavitation mixer

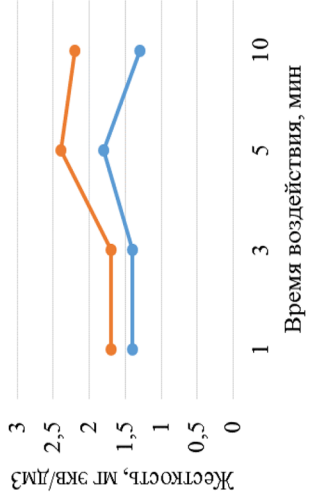
а) 5000 об/мин

а) 5000 грм



б) 10000 об/мин

б) 10000 грм



в) 15000 об/мин

в) 15000 грм

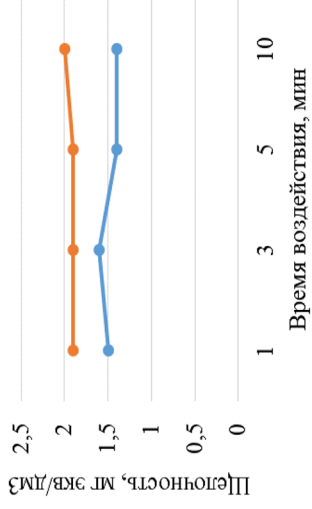
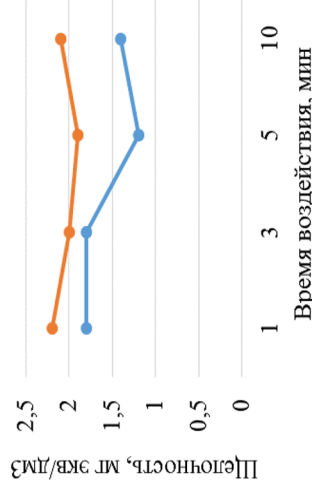
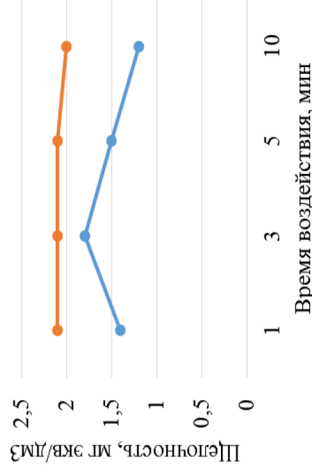
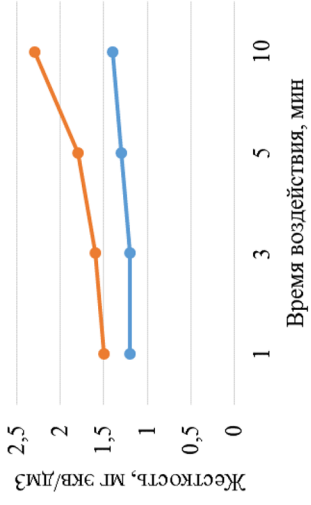


Рис. 4. Зависимости физико-химических параметров воды – жесткости и щелочности – от времени кавитационной обработки: —•— кавитированная вода до заморозки, —•— кавитированная вода после разморозки

Fig. 4. Dependences of the physical and chemical parameters of water – hardness and alkalinity, on the time of cavitation treatment: —•— cavitated water before freezing; —•— cavitated water after defrost

Доказано, что в условиях гидротермодинамической кавитации протекают сложные физико-химические процессы, классифицируемые следующим образом:

- окислительно-восстановительные реакции с участием присутствующих в водной среде органических и неорганических веществ за счет образования в растворе H_2O_2 и $OH\cdot$;
- цепные реакции в растворе, инициируемые продуктами расщепления присутствующих в растворе примесей;
- деструкция макромолекул и инициирование деполимеризации полимерных соединений;
- реакции между растворенными газами внутри кавитационных пузырьков.

Для полученных математических моделей кавитации была разработана математическая модель, связывающая параметры кавитационных эффектов с преобразованием примесей сточной воды и, как следствие, с ее очисткой. Для исследуемых режимов кавитации при газосодержании $\delta < 0,003$ получена регрессионная модель, связывающая длину каверн L_k , скорость вращения кавитационной крыльчатки W , давление P_∞ , время кавитационного воздействия t и снижение концентрации примесей Δ , %. Чтобы увеличить при неизменной длине каверн все три параметра W , P_∞ , Δ , необходимо увеличить и загромождение потока – отношение площади сечения кавитатора к площади сечения потока, равное $F_k/F_{пу}$. Анализ экспериментальных данных представлен в табл. 5, а регрессионная модель кавитационного воздействия – на рис. 5 [17].

Известно, что в условиях гидродинамической кавитации можно условно выделить три зоны, где происходят химические реакции окисления:

- механотермодеструкция летучих соединений и образование радикалов $\bullet OH$ на границе раздела «жидкость – газ»;
- механотермодеструкция летучих соединений и образование радикалов $\bullet OH$ в газовой среде образовавшегося пузырька;
- зона в объеме жидкости, куда диффундирует небольшое количество радикалов $\bullet OH$, температура при этом на несколько порядков ниже температуры внутри пузырька.

Таблица 5. Эффективность очистки сточной воды (модельный сток) при различных режимах кавитации
Table 5. Efficiency of wastewater treatment (model flow) under various cavitation modes

Показатель	Исходная концентрация, мг/дм ³	Концентрация примесей после кавитационной обработки при частоте вращения ротора кавитатора, об/мин								
		3 000			7 000			10 000		
		Время кавитационной обработки, с								
		30	60	90	30	60	90	30	60	90
pH	8,7	8,2	8,2	7,9	7,8	7,2	8,1	8,8	8,8	8,8
Cu	3,94	3,55	2,95	2,55	2,68	1,73	2,45	2,75	2,75	2,75
Zn	1,25	0,87	0,87	0,87	0,8	0,8	0,9	0,83	0,83	0,83
Pb	0,22	0,14	0,14	0,14	0,127	0,068	0,149	0,19	0,19	0,19
Fe	3,7	2,66	2,40	2,06	1,92	0,4	0,6	2,66	2,66	2,66
Ni	2,52	1,58	1,58	1,58	1,53	0,63	1,43	1,86	1,86	1,86
Mn	0,03	0,02	0,02	0,02	0,015	0,003	0,005	0,02	0,02	0,02
Cr ⁶⁺	0,012	0,01	0,01	0,01	0,004	0,004	0,004	0,01	0,01	0,01

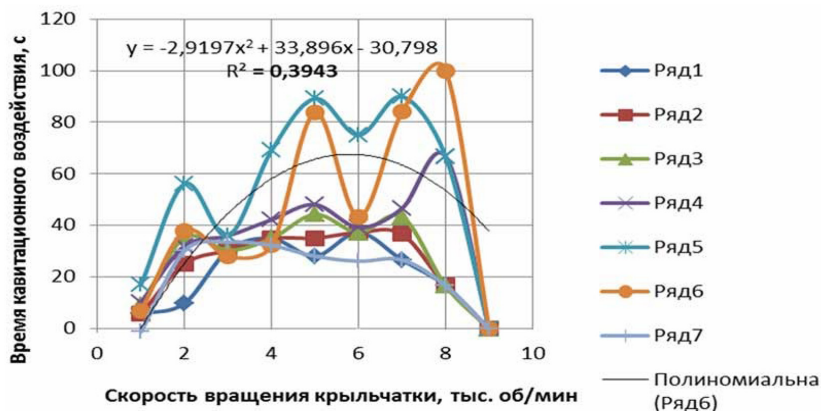


Рис. 5. Корреляционная зависимость эффектов очистки промышленного стока от режимов кавитации

Fig. 5. Correlation dependence of the effects of industrial wastewater treatment on cavitation regimes

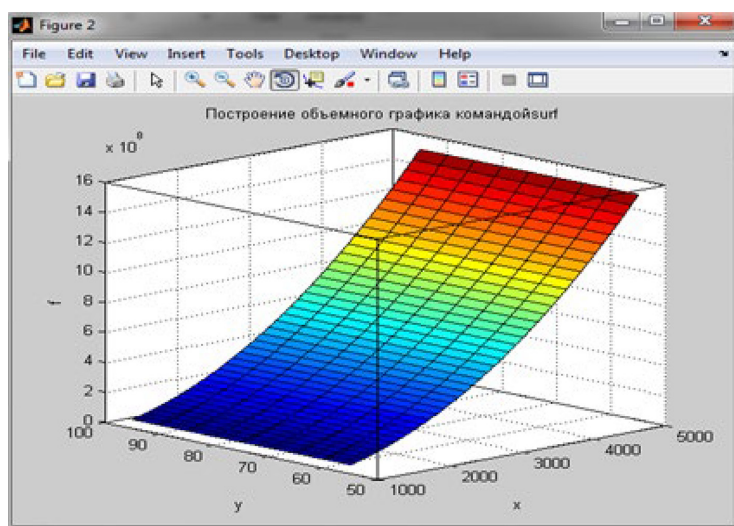


Рис. 6. Численное решение модели оптимального подбора режима кавитационной обработки сточной воды с максимально возможным эффектом очистки

Fig. 6. Numerical solution of the model for optimal selection of the mode of cavitation treatment of wastewater with the maximum possible cleaning effect

С использованием современных программных продуктов для математического моделирования процессов в экспериментальном исследовании получена модель оптимального подбора режима кавитационной обработки стока с максимально возможным эффектом очистки по множеству нормируемых показателей, таких как рН, катионы тяжелых металлов, содержание микроорганизмов, общее солесодержание и ионы Fe. Численное решение математической модели представлено на рис. 6. Поле оптимальности ограничено числом вращения ротора кавитатора ($n_{\min} = 3000\text{--}5000$ об/мин) и временем кавитационного воздействия на сток $t_{\text{обр}} = 60$ с.

Выводы

Основные итоги выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Впервые выявлена возможность стабилизации физико-химических свойств воды за счет перевода ее в твердую фазу (заморозка). Перевод кавитационно-обработанной воды в твердое агрегатное состояние путем ее заморозки не приводит к изменению ее физико-химических свойств после возврата в жидкое состояние. Это обстоятельство делает целесообразным ее доставку в зимний период на удаленные расстояния, либо ее замораживание в районах с низкими температурами не будет носить фатальный характер, а может использоваться в создании водотопливных эмульсий для предприятий, работающих на жидком топливе.

2. Впервые реализована попытка использования эффектов гидродинамической кавитации утилизации отработанных нефтепродуктов на примере промышленных масел, при которой завершается жизненный цикл отработанной продукции с целью получения новых продуктов:

- 70 % восстановленного до первоначального состояния масла;
- 30 % водотопливной эмульсии для сжигания в топках малого объема.

В качестве рекомендаций по применению результатов работы предлагается использовать: новые оценки пространственно-временной изменчивости характеристик используемых нефтепродуктов при проведении дальнейших технологических и климатических исследований регионов Крайнего Севера; математическое моделирование природных и техногенных процессов в циркумполярных территориях; контроль качества поступающих первичных данных в информационные системы; учет влияния окружающей среды на хозяйственную деятельность и практическое применение техники и технологии при обращении с отходами нефтепродуктов в суровых северных условиях.

3. В результате выполненных работ была построена комплексная математическая модель, связывающая процессы схлопывания кавитационных полостей, сопровождающаяся выбросом энергии, позволяющей преобразовать молекулы воды и модифицировать примеси стока. Инициация радикально-цепных реакций окисления субстратов (химических загрязнителей органического происхождения) возможна при добавлении небольшого количества окислителя в зону кавитации, однако активация и кавитационное разложение молекул воды сопровождаются образованием сильных окислителей, таких как перекись водорода и озон, а следовательно, искусственное введение окислителей может быть целесообразным лишь с точки зрения сокращения времени кавитационной обработки стока.

Список литературы / References

[1] Kulagina Tatiana, Kulagin Vladimir and Tereshkov Valerii. Development of the circumpolar territories of the Russian Federation. *E 3S Web of Conferences WFSDI 2021* 295, 03007 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129503007>.

[2] *Управление промышленными и особоопасными отходами*: Монография. Т. А. Кулагина, А. И. Матюшенко, С. В. Комонов, Е. Н. Писарева. Москва-Смоленск: «Маджента», 2010. 567. ISBN 978–5–98156–085–9 [Management of industrial and highly hazardous waste: Monograph. T. A. Kulagina, A. I. Matyushenko, S. V. Komonov, E. N. Pisareva. Moscow-Smolensk: Magenta, 2010. 567. ISBN 978–5–98156–085–9 (in Rus.)].

[3] Кулагина Т. А., Хаглеев П. Е., Зайцева Е. Н. *Обращение с промышленными и особо опасными отходами*: Монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. 512. ISBN 978–5–7638–4310–1; [Kulagina T. A., Khagleev P. E., Zaitseva E. N. *Treatment of industrial and especially hazardous waste*: Monograph. Krasnoyarsk: Sib. federal univ., 2021. 512. ISBN 978–5–7638–4310–1 (in Rus.)].

[4] Кулагина Т. А., Козин О. А., Матюшенко А. И. *Экологическая безопасность техносферных объектов*. Красноярск: Изд-во «Гротеск», 2015. 323. [Kulagina T. A., Kozin O. A., Matyushenko A. I. *Environmental safety of technosphere objects*. Krasnoyarsk: Publishing house “Grotesk”, 2015. 323. (in Rus.)].

[5] Ивченко В. М., Кулагин В. А., Немчин А. Ф. *Кавитационная технология*; ред. акад. Г. В. Логвинович. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200. [Ivchenko V. M., Kulagin V. A., Nemchin A. F. *Cavitation technology*; ed. Acad. G. V. Logvinovich. Krasnoyarsk: KSU Publishing House, 1990. 200. (in Rus.)].

[6] Кулагин В. А. *Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14, 01.02.05. Красноярск: КГТУ, 2004. 47. [Kulagin V. A. *Methods and means of technological processing of multicomponent media using cavitation effects*: author. dis. ... Dr. tech. Sciences: 01.04.14, 01.02.05. Krasnoyarsk: KSTU, 2004. 47. (in Rus.)].

[7] Демиденко Н. Д., Кулагин В. А., Шокин Ю. И., Ли Ф.-Ч. *Тепломассообмен и суперкавитация*. Новосибирск: Наука, 2015. 436. [Demidenko N. D., Kulagin V. A., Shokin Yu. I., Lee F.-Ch. *Heat and mass transfer and supercavitation*. Novosibirsk: Nauka, 2015. 436. (in Rus.)].

[8] Аверина Ю. М., Моисеева Н. А., Шувалов Д. А. и др. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки. *Успехи в химии и химической технологии*. 2018. XXXII. 14. 18–19 [Averina Yu. M., Moiseeva N. A., Shuvalov D. A. and others. Cavitation water treatment. Properties of water and treatment efficiency. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018. XXXII. 14. 18–19 (in Rus.)].

[9] Kulagin V. A., Kulagina L. V., Kulagina T. A. Nanotechnology cavitation effects in the heat-and-power engineering and other branches of production, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2008. 1(1). 76–85.

[10] Кулагин В. А., Кулагина Л. В. *Основы кавитационной обработки многокомпонентных сред*. М.: Русайнс, 2017. 230. ISBN 978–5–4365–1858–9. [Kulagin V. A., Kulagina L. V. *Fundamentals of cavitation treatment of multicomponent media*. Moscow. Rusajns, 2017. 230 ISBN 978–5–4365–1858–9 (in Rus.)].

[11] Дубровская О. Г. *Технология гидротермодинамической обработки природных и сточных вод с использованием эффектов кавитации [D]*. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2007. 134. [Dubrovskaya O. G. *Technology of hydrothermodynamic treatment of natural and waste waters using cavitation effects [D]*. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2007. 134 (in Rus.)].

[12] Кулагина Т. А. *Эффективность подготовительных процессов сжигания водотопливных смесей в топках малого объема*. Дисс. ... докт. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2009. 340. [Kulagina T. A. *The efficiency of preparatory processes for the combustion of water-fuel mixtures in small-volume furnaces*. Diss. ... doc. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2009. 340 (in Rus.)].

[13] Kulagin Vladimir A., Sapoghnikova Ekaterina S., Stebeleva Olesya P. Features of Influence of Cavitation Effects on the Physicochemical Properties of Water and Wastewater, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2014. 7(5). 605–614

[14] Смиренникова Е. В., Уханова А. В., Воронина Л. В. Оценка состояния окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в российской Арктике. *Управленческое консультирование*. 2018. 9. 59–78 [Smirennikova E. V., Ukhanova A. V., Voronina L. V. Assessment of the state of the environment and ensuring environmental safety in the Russian Arctic. *Management consulting*. 2018. 9. 59–78 (in Rus.)].

[15] Бобылёв Н. Г., Гадаль С., Коновалова М. О. и др. Ранжирование регионов Арктической зоны Российской Федерации по индексу экологической безопасности. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2020. 3(69). 17–40 [Bobylev N. G., Gadal S., Konovalova M. O. et al. Ranking of regions of the Arctic zone of the Russian Federation according to the environmental safety index. *The North and the market: the formation of an economic order*. 2020. 3(69). 17–40 (in Rus.)].

[16] Дубровская, О. Г. Евстигнеев, В. В., Кулагин В. А. Кондиционирование сточных вод энергетических систем и комплексов. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2011. 6(4). 665–675 [Dubrovskaya, O. G. Evstigneev, V. V., Kulagin V. A. Conditioning of wastewater from energy systems and complexes, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2011. 6(4). 665–675 (in Rus.)].

[17] O. G. Dubrovskaya etc. Mathematical Modeling of Cavitation Processes in Conditioning Industrial Wastewater, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2015. 8(3) 369–376