

## СНИЖЕНИЕ НАКОПЛЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

Е. Н. Зайцева, Т. А. Кулагина, О. А. Тюрикова

*ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,  
Красноярск, Россия; ФГАОУ ВО «Дальневосточный  
федеральный университет», Владивосток, Россия*

**Ключевые слова:** биологические и токсикологические методы контроля; водомасляная эмульсия; общий класс экологической безопасности; отработанные масла.

**Аннотация:** Утилизация отработанных масел может оправданно осуществляться в местах их использования, а не только на территории предприятий-утилизаторов. В первую очередь это относится к производствам, удаленным от центральной части России, где присутствуют экономические и климатические особенности. Сжигать в чистом виде отработанные масла запрещено действующим законодательством. Возможность получения из отработанного масла восстановленного и водомасляной эмульсии с применением эффектов гидродинамической кавитации дает альтернативу утилизации отработанных масел, как уже накопленных за долгие годы на северных территориях, так и образующихся на удаленных действующих предприятиях.

### Введение

В труднодоступных районах Российской Федерации находятся кладовые энергетических, минеральных и других ресурсов, составляющих стратегическое достояние страны. Активная добыча полезных ископаемых на этих территориях осуществляется с прошлого века, когда главной задачей производственного процесса было получение товарного продукта, мало обращали внимания на сопутствующие процессы и экологическое законодательство было несовершенным. В отсутствие железнодорожного и затрудненного автомобильного сообщения в короткий летний период баржами по рекам на север необходимо было доставить продукты питания для людей, оборудование и материалы для производственных процессов. А обратно на Большую землю успеть вывезти добытое и произведенное. Поэтому в ситуации жесткого климатического ограничения считалось обязательным вывозить отходы. Территории замусоривались стеклянкой,

---

Зайцева Елена Николаевна – старший преподаватель кафедры техносферной и экологической безопасности, e-mail: lenap1978@mail.ru; Кулагина Татьяна Анатольевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной и экологической безопасности, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия; Тюрикова Ольга Алексеевна – ассистент, ведущий специалист департамента природно-технических систем и техносферной безопасности, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

металлической и другой тарой, на несанкционированных площадках хранения скапливались сотни, тысячи емкостей с отработанными материалами. В результате вокруг производственных объектов и поселений образовывались мусорные поля, на которых были и энергоемкие отходы и те, которые можно превратить во вторичные ресурсы.

К подобной категории относятся отработанные индустриальные и прочие масла, которые сливались в емкости без учета и паспортизации. Даже сейчас вывозить их в пункты переработки практически невозможно, так как баки проржавели, в них появились дыры, процесс транспортировки может сопровождаться большими рисками и осложнениями и будет не оправдан ни с экономической, ни с экологической точки зрения. Накопившиеся отработанные масла оптимально утилизировать в местах образования.

### Материалы и методы

Чтобы разработать приемлемую технологию переработки накопленных отходов, необходимо установить их характеристики. Для этого в испытательной лаборатории Сибирского федерального университета исследованы пробы неопознанных отработанных масел с помощью биологических и токсикологических методов контроля с использованием следующих приборов: культиватора КВМ-05, центрифуги лабораторной, климатостата (бокса для культивирования дафний) Р2, суперкавитационного миксера Silverson L5, дериватографа Q-1500D, калориметра АБК-1В.

Определение кратности разведения водной вытяжки из исследуемого материала, при которой вредное воздействие на гидробионты отсутствует, осуществлялось по аттестованным методикам [1, 2] с применением двух тест-объектов из разных систематических групп (дафнии и хлорелла).

Биологический подход оценки токсичности сред использует методы биоиндикации и биотестирования. В первом случае оценивается состояние организмов-индикаторов (биоиндикаторов), естественным образом обитающих в исследуемой среде, а во втором – в тестируемую среду вносят лабораторные биологические тест-объекты, выращенные в искусственно поддерживаемых стандартных условиях. В обоих случаях исследуются видимые или незаметные повреждения у биоиндикаторов и тест-объектов, либо отклонения от нормы, являющиеся признаками стрессового воздействия (табл. 1).

### Результаты и обсуждения

На первом этапе проведено биотестирование водного раствора отработанного немаркированного индустриального масла по величине оптической плотности тест-культуры водоросли *Chlorella pyrenoidosa*, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контрольная проба – дистиллированная вода, среднее значение оптической плотности в контрольной пробе  $D_k = 0,1488$  Б), и тестируемых пробах, в которых эти вещества присутствуют (рис. 1, табл. 2). Приготовление пробы осуществлялось следующим образом: водоросль фильтровали, а затем разводили специальной культивационной средой Тамия (50 %) до определенной оптической плотности, равной  $(0,156 \pm 0,020)$ .

Таблица 1

## Тест-объекты, используемые в тестировании

| Тест-объект   | Измеряемые параметры (тест-реакции)  |
|---|--|
| Водоросли: <i>Chlorella pyrenoidosa</i> , <i>Dunaliella salina</i> , <i>Nitella flexilis</i> , <i>Scenedesmus quadricauda</i> , <i>Selenastrum capricornutu</i> | Численность клеток, флуоресценция клеток <i>in vivo</i> , сырой и сухой вес, морфологические изменения клеток, содержание хлорофилла А и АТФ, подвижность клеток, скорость прорастания зооспор |
| Простейшие: <i>Daphnia</i> , <i>Paramecium caudatum</i> , <i>Spirostomum ambiguum</i> var. <i>Major Ehrbg.</i> , <i>Tetrahymena pyriformis</i>                  | Смертность, скорость прироста, двигательная активность, дыхательная активность, хемотаксическая реакция  |

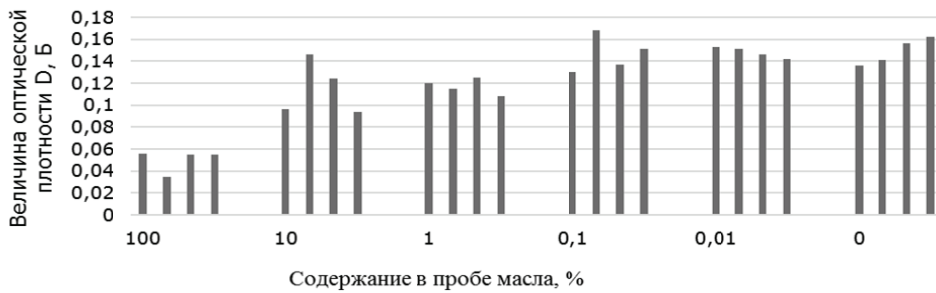
Рис. 1. Зависимость плотности среды с *Chlorella pyrenoidosa* от количества содержания масла в анализируемой пробе

Таблица 2

Результаты биотестирования на тест-культуре *Chlorella pyrenoidosa*

| Концентрация масла, % | Величина относительной разницы средних значений $I$ , %<br>$I = \frac{D_k - D_0}{D_k} 100\%$ | Среднее значение оптической плотности в тестируемой пробе $D_0$ , Б |
|-----------------------|--|---|
| 0,01                  | 0,54   | 0,1480  |
| 0,1                   | 1,55   | 0,1465  |
| 1                     | 21,37  | 0,1170  |
| 10                    | 22,72  | 0,1150  |
| 100                   | 66,20  | 0,0503  |

Далее выполняли анализ раствора (вода + отработанное немаркированное индустриальное масло) на определение смертности и изменение размножения дафний [3]. Были изучены серии из шести вариантов проб, каждая из которых состояла из 100 мл раствора: исходная водная вытяжка образца отработанного масла; экстракт-вытяжки, разбавленные в 10 раз

(10 %), 100 раз (1%), 1000 раз (0,1 %), 10 000 раз (0,01 %) и контрольная вода (отстоянная водопроводная).

Образцы заливались в пробирки объемом 50 мл с присутствием в них по 10 дафний, с временем жизни от 6 до 24 ч. Пробы воды и тест-объекты помещались во вращающуюся кассету устройства для экспонирования рачков дафнии УЭР-03. Затем кассета с пробами помещалась в климатостат, где поддерживалась постоянная температура ( $20 \pm 1$ ) °С. Через 24 и 48 ч проводился подсчет количества погибших особей дафний в опытных и контрольных пробах (рис. 2, табл. 3).

Обе серии экспериментов показали, что ближайшие 50%-е скачки, как в смертности биокультуры *Daphnia*, так и в снижении величины оптической плотности водоросли *Chlorella pyrenoidosa*, наблюдались между пробами 1 и 2.



Рис. 2. Фиксация гибели *Daphnia* в опытных и контрольном образцах

Таблица 3

Результаты биотестирования на тест-культуре *Daphnia*

| Номер пробы (% масла) | Число выживших дафний в образце (среднее значение из параллельных определений) |                   | Процент погибших в пробе дафний A, %, $A = \frac{X_k - X_T}{X_k} 100\%$ |
|-----------------------|--|-------------------|---|
|                       | тестируемом $X_T$  | контрольном $X_K$ |   |
| 1 (100 %)             | 0  | 10                | 100   |
| 2 (10 %)              | 5  | 10                | 50  |
| 3 (1 %)               | 6  | 10                | 40  |
| 4 (0,1 %)             | 7  | 10                | 30  |
| 5 (0,01 %)            | 8  | 10                | 20  |

Соответственно, дальнейшие исследования продолжились на водных вытяжках проб с 10%-м содержанием матричного, отработанного и отработанного кавитированного масла на тех же тест-объектах.

Уровень токсичности тестируемых образцов для водорослей оценивался путем сравнения оптической плотности тест-культуры в контрольной и опытной группах после 22 ч выращивания в культиваторе КВМ-05. Таким образом, для каждого эксперимента по результатам четырех одно-временных измерений было вычислено среднее значение оптической плотности

$$D_{\text{ср}} = \frac{\sum D_i}{n},$$

где  $D_i$  – значения оптической плотности в  $i$ -м параллельном определении;  $n$  – число параллельных определений.

Каждая проба повторно разводилась и проходила тестирование, если значение  $D_{\text{ср}}$  отличалось от 100 % более чем на 20 %. На основе количества повторных тестов делался вывод о токсичности пробы.

Полученные результаты серийного биотестирования водного раствора промышленных масел (исходного, отработанного и кавитационно восстановленного) позволяют говорить о том, что проба 1 классифицируется как токсичная, проба 2 – сильнотоксичная, проба 3 – среднетоксичная (табл. 4).

Процент погибших в тестируемом водном растворе масел *Daphnia* ( $A$ , %), по сравнению с контролем, определялся по формуле из табл. 3 и представлен в табл. 5.

Так как только для пробы 3 –  $A \leq 10$  %, то можно говорить о том, что исследуемые кавитационно обработанные водно-масляные образцы не оказывают острого токсического действия (безвредная кратность разбавления (БКР<sub>10-96</sub>) – 3). При этом общий класс экологической безопасности, даже по сравнению с матричным маслом понижается со II до III.

Следующим этапом исследования было воздействие на произвольно взятый масляный отход лопастями миксера установки Silverson L5 (рис. 3) с использованием эффекта гидродинамической кавитации [4 – 6].

Таблица 4

**Результаты биотестирования степени токсического воздействия на *Chlorella pyrenoidosa***

| Номер и тип пробы   | $D_{\text{ср}}$ | Число разведений* |
|---|-----------------|-------------------|
| Проба 1. Матричное масло, 10 %  | 89,36 ± 12,19   | 9                 |
| Проба 2. Отработанное масло, 10 %                                     | 89,26 ± 5,58    | 27                |
| Проба 3. Отработанное масло, обработанное кавитационным методом, 10 % | 85,19 ± 7,11    | 3                 |

\* Слаботоксичная – 1 разведение; среднетоксичная – 3 разведения; токсичная – 9 разведений; сильнотоксичная – 27 разведений; гипертотоксичная – 81 и более разведений.

**Результаты биотестирования степени токсического воздействия  
на *Daphnia***

| Номер и тип пробы   | $X_T$ , шт. | $X_K$ , шт. | $A$ , % | Число разведений |
|---|-------------|-------------|---------|------------------|
| Проба 1. Матричное масло, 10 %  | 7           | 10          | 30      | 9                |
| Проба 2. Отработанное масло, 10 %                                     | 5           | 10          | 50      | 27               |
| Проба 3. Отработанное масло, обработанное кавитационным методом, 10 % | 9           | 10          | 10      | 3                |

В результате, и это хорошо видно визуально (рис. 4), масло разделилось на два объема: светлый, который может быть использован по назначению, и темный, из которого в лаборатории была получена водомасляная эмульсия (ВМЭ).

Полученная эмульсия исследовалась на фазовые и структурные изменения с помощью термографического анализа (рис. 5). Наблюдающийся эндоэффект в образцах при температурах 85...87 °С связан с началом испарения содержащейся влаги. Дальнейшее нагревание от 105 до 400 °С приводит к изменению массы образцов с одновременным экзотермическим эффектом, что свидетельствует о сгорании легкокипящих фракций эмульсии. При продолжающемся повышении температуры до 648 °С происходит выгорание тяжелых углеводородов, общая потеря массы образцов достигает 77,3 – 87,5 %, из которой вода – 14 – 20 %, углеводородная составляющая – 63 – 67,5 % и механический осадок, который обусловлен процессом эксплуатации масел и появления в нем продуктов износа оборудования [7].

Сжигание ВМЭ уменьшает сажеобразование, вызванное, как правило, дефицитом кислорода в зоне реакции [8]. Очевидно, что водяные пары, имеющиеся в достатке в ВМЭ, гарантируют сгорание углерода с образованием СО и затем доокисляются до СО<sub>2</sub>, то есть более высокая эффек-



**Рис. 3. Суперкавитационный миксер  
Silverson L5**



**Рис. 4. Кавитационно обработанное  
масло**

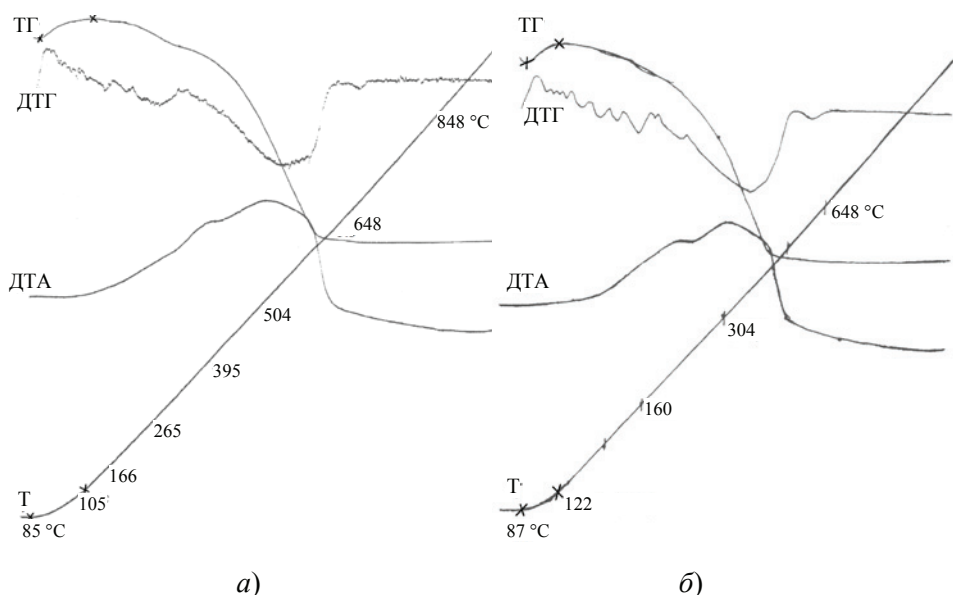


Рис. 5. Термограммы ВМЭ с содержанием воды 10 (а) и 15 % (б)

Таблица 6

**Увеличение калорийности ВМЭ [8]**

| Скорость вращения лопастей, тыс. об/мин | 3         | 5         | 10        |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Калорийность ВМЭ, ккал/кг               | 9520      | 9588      | 10164     |
| Прирост калорийности, ккал/кг (%)       | 100 (1,1) | 168 (1,8) | 744 (7,9) |

тивность горения объясняется тем, что в пламени создаются оптимальные концентрации радикалов ОН и Н, ускоряющие процесс цепной реакции горения СО и продуктов разложения топлива благодаря более легким условиям их образования.

Получены многократные результаты определения калорийности ВМЭ30% (содержание нефтепродуктов – 30 %) в калориметрической бомбе (табл. 6). Исходная калорийность топлива – 9420 ккал/кг.

Для подтверждения возможности безопасного сжигания ВМЭ ее использовали вместо мазута в производственной установке УЗГ-1М на территории базовой кафедры СФУ. Процесс розжига начинается с подачи в горелку жидкого топлива. Были проведены замеры концентраций выбросов NO<sub>2</sub>, СО, SO<sub>2</sub>, углерода (сажи) и бен(а)пирена при горении следующих видов жидких углеводородных топлив: мазута, ВМЭ10%, ВМЭ15% и ВМЭ30%. По результатам исследований выполнен расчет и смоделировано рассеивание загрязняющих веществ в открытой атмосфере с помощью программного комплекса Интеграл (УПРЗА Эколог 4.70).

Зона с концентрациями 1 ПДК и более по диоксиду азота (соответствует 250 м от источника) заметно снижается при переходе с основного вида топлива на водомасляные эмульсии и достигает значения 0,9 ПДК при сжигании ВМЭ30% (70...100 м от источника).

По диоксиду серы зона с концентрацией 3 ПДК при сжигании мазута (соответствует 70...100 м от источника) существенно меняется на 0,9 ПДК и менее при переходе на водомасляные эмульсии (70...100 м) и достигает минимума 0,7 ПДК при сжигании ВМЭ30%.

### Заключение

При использовании подобных жидкотопливных установок на территориях промышленных предприятий севера или в целом на малозаселенных территориях осуществляется возможность минимального воздействия на атмосферный воздух в местах их эксплуатации при отсутствии фоновых концентраций указанных загрязняющих веществ (из-за удаленности от крупных населенных пунктов и промышленных предприятий). Кроме того, замена в установке основного топлива (мазута или дизеля) на ВМЭ позволяет не только утилизировать накопленные за долгие годы освоения северных территорий и до сих пор там хранящихся углеводородных отходов, но и выполнять задачи ресурсосбережения [9 – 11].

### Список литературы

1. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04, Т 16.1:2:2.3:3.7-04. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов производства и потребления по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*chlorella vulgaris beijer*). – М.: ФБУ ФЦАО, 2012. – 36 с.
2. Об обеспечении единства измерений : федер. закон от 26.06.2008 года № 102-ФЗ. – URL : <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=490078> (дата обращения: 20.03.2025).
3. ФР.1.39.2007.03222. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод отходов по смертности и изменению плодovitости дафний. – М., 2007. – 51 с.
4. Ивченко, В. М. Кавитационная технология / В. М. Ивченко, В. А. Кулагин, А. Ф. Немчин. – Красноярск : Изд-во КГУ, 1990. – 200 с.
5. Кулагин, В. А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси твердые границы потоков / В. А. Кулагин // Вестник КГТУ. Вып. 8. Проблемы развития теплоэнергетики и пути их решения : тр. науч.-практ. конф. КГТУ. – Красноярск, 1997. – С. 26 – 43.
6. Теплообмен и суперкавитация / Н. Д. Демиденко, В. А. Кулагин, Ю. И. Шокин, Ф. Ч. Ли. – Новосибирск : Новосибирский филиал ФГУП «Академический научно-издательский и книгораспространительский центр «Наука», 2015. – 436 с.
7. Обращение с отходами нефтепродуктов : монография / Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, В. А. Кулагин, Л. В. Кулагина, О. Г. Дубровская, Э. Э. Кобилев. – М.: РУСАЙНС, 2024. – 242 с.
8. Кулагина, Т. А. Разработка режимов сжигания обводненных топочных мазутов и водотопливных эмульсий : дис. ... канд. техн. наук / Кулагина Татьяна Анатольевна. – Красноярск, 2000. – 174 с.
9. Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов / Т. А. Кулагина, О. Г. Дубровская, Е. Н. Зайцева, Р. Н. Крылышкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 6. – С. 46 – 54. doi: 10.18799/24131830/2024/6/4607

10. Крылышкин, Р. Н. Энергоэффективность термической утилизации нефтяных остатков / Р. Н. Крылышкин, Р. В. Гурина // Енисейская теплофизика : тезисы докл. I Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Красноярск, 28 – 31 марта 2023 г. – Красноярск, 2023. – С. 372 – 373.

11. Гурина, Р. В. Утилизация накопленных и образующихся отходов нефтяной промышленности / Р. В. Гурина // Экология и безопасность жизнедеятельности : сб. ст. XVIII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 20–21 декабря 2018 г. – Пенза, 2018. – С. 127 – 131.

### References

1. HDPE F T 14.1:2:3:4.10-04, T 16.1:2:2.3:3.7-04. [A method for determining the toxicity of drinking water, natural and wastewater, water extracts from soils, sewage sludge and waste products from production and use by changing the optical density of chlorella (*chlorella vulgaris* beijer) cultures], Moscow: FBU FCAO, 2012, 36 p. (In Russ.)

2. available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=490078> (accessed 20 March 2025).

3. FR.1.39.2007.03222. [Methodology for determining the toxicity of water and water effluents from soils, sewage sludge, waste by mortality and changes in fertility of daphnia], Moscow, 2007, 51 p. (In Russ.)

4. Ivchenko V.M., Kulagin V.A., Nemchin A.F. *Kavitatsionnaya tekhnologiya* [Cavitation technology]. Krasnoarsk: Izdatel'stvo KSU, 1990, 200 p. (In Russ.)

5. Kulagin V.A. [Hydrodynamic phenomena on liquid, ash, mixture of solid stream boundaries], *Vestnik KGTU. Issue 8. Problemy razvitiya teploenergetiki i puti ikh resheniya: tr. nauch.-prakt. konf. KGTU* [KSTU Bulletin. Issue 8. Problems of Heat Power Engineering Development and Ways to Solve Them: Proceedings of the Scientific and Practical Conf. KSTU], Krasnoyarsk, 1997, pp. 26-43. (In Russ.)

6. Demidenko N.D., Kulagin V.A., Shokin Yu.I., Li F.C. *Teplomassoobmen i superkavitatsiya* [Heat and mass transfer and supercavitation], Novosibirsk: Novosibirsk Branch of the Academic Scientific Publishing and Book Distribution Center Nauka, 2015. 436 p. (In Russ.)

7. Kulagina T.A., Zaitseva E.N., Kulagin V.A., Kulagina L.V., Dubrovskaya O.G., Kobilov E.E. *Obrashcheniye s otkhodami nefteproduktov: monografiya* [Waste management of petroleum products: monograph], Moscow: RUSAINS, 2024, 242 p. (In Russ.)

8. Kulagina T.A. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Krasnoyarsk, 2000, 174 p. (In Russ.)

9. Kulagina T.A., Dubrovskaya O.G., Zaitseva E.N., Krylyshkin R.N. [Improvement of technologies for waste disposal of petroleum products], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2024, vVol. 335, no. 6, pp. 46-54. doi: 10.18799/24131830/2024/6/4607 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Krylyshkin R.N., Gurina R.V. [Energy efficiency of thermal utilization of oil residues], *Yeniseyskaya teplofizika: tezisy dokl. I Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [Yenisei thermophysics: Abstracts of the I All-Russian Scientific Conference with international participation], Krasnoyarsk, March 28-31, 2023, Krasnoyarsk, 2023. pp. 372-373. (In Russ.)

11. Gurina R.V. [Utilization of accumulated and generated waste from the oil industry], *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: sb. st. XVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, [Ecology and life safety: collection of articles of the XVIII International Scientific and Practical Conference], Penza, December 20-21, 2018, Penza, 2018. pp. 127-131. (In Russ.)

## **Reducing the Accumulated Environmental Damage in the Northern Territories of Russia**

**E. N. Zaitseva, T. A. Kulagina, O. A. Tyurikova**

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;  
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Keywords:** biological and toxicological control methods; water-oil emulsion; general class of environmental safety; waste oils.

**Abstract:** Waste oils can be justifiably disposed of at the places of their use, and not only at the disposal sites. This primarily applies to production facilities located far from the central part of Russia, where there are economic and climatic features. Burning waste oils in their pure form is prohibited by current legislation. The possibility of obtaining recovered and W/O emulsion from waste oil, using the effects of hydrodynamic cavitation, provides an alternative to the disposal of waste oils, both those already accumulated over many years in northern territories and those generated at remote operating enterprises.

---

© Е. Н. Зайцева, Т. А. Кулагина, О. А. Тюрикова, 2025