

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-187-192

## RESEARCH OF INTERACTION OF SEDIMENTATION AND CENTRIFUGAL SEPARATION

**I. A. Ivanov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Preparation of fuel on a ship the method of sedimentation is considered in the article, after by the method of centrifugal separation. It is educed from a literary review, that in the questions of the use of sediment cisterns there is not single opinion in the system preparation of fuel. One authors consider sedimentation uneffective, other -efficiency third simply eliminate sediment cisterns from the systems of preparation of fuel offered by them. In hired it is suggested to examine sedimentation and centrifugal separation not separately, and cooperating of these two methods of treatment of fuel with an aim to set influence of the preliminary sedimentation on efficiency of subsequent separation. It is suggested to examine a fuel as dispersible system, in that a fuel is a dispersible environment, and being there are admixtures in him - by a dispersible phase. Such approach gave an opportunity to set functional connection between mass of particles and their sizes and to get the function of distribution, being fundamental at the calculation of efficiency, analysis and design of methods of preparation of fuels. Using the function of distribution were got expression for the estimation of efficiency of defending and centrifugal separation. These formulas allowed to do the analysis of joint co-operation of sedimentation and separation.*

*Drawn conclusion, that efficiency of separation depends on efficiency of sedimentation and with growth of efficiency of the first stage of cleaning (sedimentation ) increases efficiency separations. At considerable initial concentrations this effect can be considerable. The first stage of cleaning does a separator more effective, that positively can affect on the fuel apparatus of engine, to a separator at sharing with sedimentation will delete more contaminations from a fuel, than if he worked one. Efficiency of the use of sedimentation is well-proven as the first stage of treatment of fuel in the system of ship the system preparation of fuel.*

*Keywords: Preparation of fuel, sedimentation, centrifugal separation, fuel as a dispersible system, function of distribution of contaminations in a fuel, formulas for efficiency of cooperation of sedimentation and separation.*

**For citation:**

Ivanov, Igor A. "Research of interaction of sedimentation and centrifugal separation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 187–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-187-192.

**УДК 621.431.74.62**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТСТАИВАНИЯ И ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СЕПАРАЦИИ

**И. А. Иванов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

*В статье рассмотрена подготовка топлива на судне методом отстаивания, затем методом центробежного сепарирования. Из литературного обзора выявлено, что в вопросах использования отстойных цистерн в системе топливоподготовки нет единого мнения. Одни авторы считают отстаивание неэффективным, другие — эффективным, третьи — просто исключают отстойные цистерны из предлагаемых ими систем топливоподготовки. В данной работе предложено рассматривать не отдельно отстаивание и центробежную сепарацию, а взаимодействие этих двух методов обработки топлива с целью установить влияние предварительного отстаивания на эффективность последующей сепарации. Предложено рассматривать топливо как дисперсную систему, в которой топливо является дисперсионной средой, а находящиеся в нем примеси — дисперсной фазой. Такой подход дал возможность установить функциональную связь между массой частиц и их размерами и получить функцию распределения, являющуюся*

основополагающей при расчете эффективности, анализе и моделировании методов подготовки топлив. Получены выражения для оценки эффективности отстаивания и центробежной сепарации. Эти формулы позволили сделать анализ взаимодействия отстаивания и сепарации.

Сделан вывод, что эффективность сепарации зависит от эффективности отстаивания, и с возрастанием эффективности первой ступени очистки (отстаивание) возрастает и эффективность сепарации. При значительных начальных концентрациях этот эффект может быть значительным. Первая ступень очистки делает сепаратор более эффективным, что положительно может сказаться на топливной аппаратуре двигателя, так как сепаратор при совместном использовании с отстаиванием удалит из топлива больше загрязнений, чем если бы он работал один. Доказана эффективность использования отстаивания в качестве первой ступени обработки топлива в системе судовой топливоподготовки.

Ключевые слова: подготовка топлива, отстаивание, центробежная сепарация, топливо как дисперсная система, функция распределения загрязнений в топливе, формулы для эффективности взаимодействия отстаивания и сепарации.

**Для цитирования:**

Иванов И. А. Исследование взаимодействия отстаивания и центробежной сепарации / И. А. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 187–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-187-192.

---

## Введение

Данная работа посвящена вопросам математического моделирования отстаивания и центробежной сепарации тяжелых топлив в системе топливоподготовки. Целью работы является нахождение математических выражений, устанавливающих взаимосвязь между свойствами топлива как дисперсной системы и технологическими показателями агрегатов обработки топлива (относительной концентрацией и крупностью разделения) при комплексном использовании отстаивания с последующей центробежной сепарацией. Анализ этих зависимостей даст возможность ответить на вопрос о целесообразности использования отстойных цистерн в системе топливоподготовки.

## Анализ состояния проблемы

Рациональное применение топлив в технике, являющееся одной из основных задач химмотологии, в применении к судовым двигателям связано прежде всего с использованием на судах средне- и высоковязких нефтяных моторных топлив. Решение этой задачи требует обеспечения минимальных эксплуатационных затрат при надежной и долговечной работе двигателей на топливах повышенной вязкости. Особую роль в этой проблеме играет система подготовки топлива, которая в сравнении с аналогичной системой дизельного топлива значительно усложняется. Подготовка средне- и высоковязких топлив, обеспечивающая восстановление их качества, определяет надежную длительную эксплуатацию двигателя. Структура системы подготовки топлива, особенности работы средств подготовки, технологические режимы эксплуатации, взаимодействие различных агрегатов в системе — это неполный перечень факторов, которые оказывают влияние на обеспечение безотказной работы двигателя. Значительного снижения эксплуатационных затрат удалось достичь за счет перевода средне- и высокооборотных дизелей на тяжелые сорта топлив, которые значительно дешевле легких [1].

В судовых дизелях наиболее широко применяется жидкое органическое топливо, представляющее собой продукт переработки нефти. Топливо разделяют на четыре группы: дизельное (легкое), моторное, флотские мазуты и котельные мазуты (тяжелые сорта). Однако на данный момент все судовые дизели (как главные, так и вспомогательные) работают на тяжелом топливе [2]. В технологических схемах подготовки топлива (ТСПТ) способы обработки можно разделить на три группы: гидродинамические (отстаивание, сепарация, фильтрация), физико-механические (смешение, гомогенизация) и физико-химические (присадки) [9]. Заданная последовательность обработки топлива этими методами зависит от логики технологического процесса подготовки и определяется диапазоном марок топлива, на которых может работать данный двигатель. Выде-

лим в технологической схеме ТСПТ комплекс обработки топлива, характерный для данной схемы и отличающий ее от остальных. Например, если в ТСПТ происходит последовательная обработка топлива сначала методом отстаивания (ОТ), а затем топливо окончательно очищается от воды и механических примесей в центробежном сепараторе (ЦС), то мы принимаем, что такая технологическая схема содержит комплекс обработки ОТ + ЦС. Рассматриваемый комплекс является наиболее распространенным на судах, использующих тяжелое топливо (моторное, флотские мазуты и др.). Функция отстойных цистерн, по мнению дизелестроительных фирм, состоит, кроме очистки топлива от значительного количества воды, в обеспечении постоянной температуры топлива порядка 70 °С.

Однако в вопросах использования отстойных цистерн в системе топливоподготовки нет единого мнения. Так, в [3] предлагается система топливоподготовки для смеси тяжелого топлива с дизельным. Но очистка тяжелого топлива осуществляется только центробежным сепаратором без отстойных цистерн, что будет создавать определенные сложности с подготовкой тяжелого топлива. Следует отметить, что появляются новые аппараты для очистки нефтепродуктов [4]. Авторы пишут, что предлагаемый ими технологический процесс сепарации относится к категории универсальных. Предлагаемый очиститель предназначен для сепарации любых суспензий с высоким качеством. Полирующий эффект позволяет удалять при сепарировании предельно мелкие частицы, исключив из процесса операцию фильтрации. Авторы [5] считают, что в системе топливоподготовки в ближайшее время будут оставаться такие основные процессы как отстой, фильтрация, сепарация, нагрев, распыливание топлива, дозирование подачи и синхронизация с движением поршня. В [6] автор рассматривает процесс подготовки топлива: гравитационное отстаивание, обработка топлива присадками, сепарация, фильтрация. Вопрос о целесообразности отстойных цистерн остается открытым. В [7] приводятся схемы систем топливоподготовки как с отстойными цистернами, так и без них.

### Решение проблемы

Исследование процессов отстаивания и центробежной сепарации необходимо проводить только на основании представления топлива как полидисперсной системы. Оценку эффективности комплекса ОТ + ЦС будем осуществлять с помощью относительной концентрации  $\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}}$ , равной концентрации дисперсной фазы после сепаратора  $C_c$  к исходной концентрации до отстаивания  $C_0$ :

$$\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}} = C_c / C_0.$$

Чем меньше  $\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}}$ , тем эффективнее происходит процесс. Для определения  $\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}}$  необходимо знать, как изменяется фракционный состав дисперсной фазы перед сепарацией после предварительного отстаивания. Как было показано в работе [8], эффективность отстаивания  $\sigma$  в общем виде может быть выражена зависимостью

$$\sigma = 1 - \int_0^{\delta_{\text{кр.от}}} \left( 1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.от}}^2} \right) f(\delta) d\delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  — текущее значение диаметра частиц загрязнения;  $\delta_{\text{кр.от}}$  — минимальный размер частиц, оставшихся в очищенном топливе после отстаивания; называемый *крупностью разделения при отстаивании*;  $f(\delta)$  — функция распределения массы частиц по размерам.

Примем допущение, что к сепаратору после нескольких часов отстаивания подходят частицы механических примесей, равномерно распределенные по объему топлива. Такое допущение предполагает, что к моменту поступления топлива к сепаратору была произведена циркуляция.

Если максимальный размер частиц, оставшихся в топливе после отстаивания  $\delta_{\text{кр.от}}$ , то выражение в формуле (1) под знаком интеграла можно рассматривать как дифференциальную функцию распределения массы частиц дисперсной фазы в топливе после  $t$  часов отстаивания:

$$\left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.от}}^2}\right) f(\delta) = \tilde{f}(\delta). \quad (2)$$

Обозначим ее  $\tilde{f}(\delta)$ . Функция  $\tilde{f}(\delta)$  является характеристикой дисперсности твердой фазы, поступившей в сепаратор после отстаивания, и может быть использована для определения относительной концентрации дисперсной фазы  $\varepsilon_{\text{от+цс}}$  по формуле

$$\varepsilon_{\text{от+цс}} = \int_0^{\delta_{\text{кр.с}}} \left[1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.с}}^2}\right] \tilde{f}(\delta) d\delta, \quad (3)$$

где  $\delta_{\text{кр.с}}$  — максимальный размер частиц, оставшихся в топливе после сепарации.

Как было показано в [9], первоначальное распределение в топливе массы частиц загрязнений по размерам можно выразить функцией

$$f(\delta) = 8\delta_0^4 \delta / (\delta_0^2 + \delta^2)^3. \quad (4)$$

Подставив в (2) дифференциальную функцию плотности распределения (4) получим вид дисперсной фазы, подошедшей к сепаратору после отстаивания:

$$\tilde{f}(\delta) = \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.от}}^2}\right) \cdot 8\delta_0^4 \frac{\delta}{(\delta_0^2 + \delta^2)^3}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим

$$\varepsilon_{\text{от+цс}} = 8\delta_0^4 \int_0^{\delta_{\text{кр.с}}} \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.от}}^2}\right) \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.с}}^2}\right) \frac{\delta}{(\delta_0^2 + \delta^2)^3} d\delta.$$

В случае, если относительная концентрация такова, что  $\delta_{\text{кр.от}}$  и  $\delta_{\text{кр.с}}$  лежат в зоне размеров частиц, которые меньше моды в исходной функции распределения  $f(\delta)$ , можно воспользоваться более простым уравнением Годен–Андреева

$$f(\delta) = n\delta^{n-1} / \Delta^n, \quad (6)$$

где  $n$  и  $\Delta$  — параметры распределения.

Как было показано в работе [10], уравнение Годена–Андреева можно использовать на участке от 0 до 20 мкм. Подставляя в (2) значение  $f(\delta)$  из (6) и затем полученную функцию распределения  $f(\delta)$  подставив в (3), получим

$$\varepsilon_{\text{от+цс}} = \frac{n}{\Delta^n} \int_0^{\delta_{\text{кр.с}}} \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.от}}^2}\right) \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.с}}^2}\right) \delta^{n-1} d\delta.$$

После интегрирования этого выражения имеем

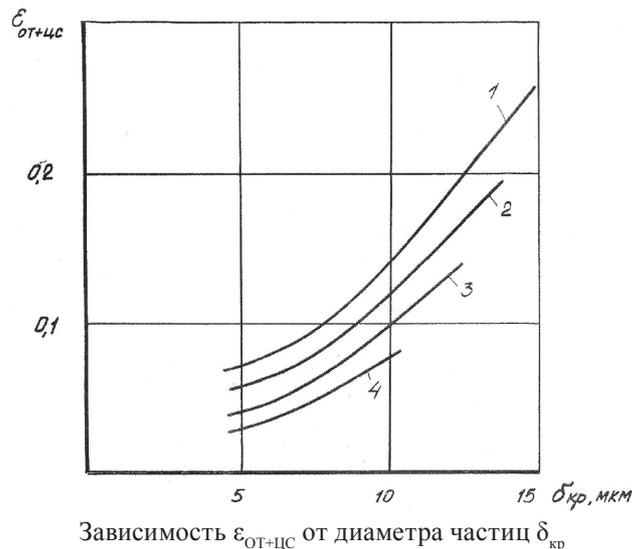
$$\varepsilon_{\text{от+цс}} = \left(\frac{\delta_{\text{кр.с}}}{\Delta}\right)^n \left[1 - \frac{n}{n+2} - \left(\frac{n}{n+2} - \frac{n}{n+4}\right) \left(\frac{\delta_{\text{кр.с}}}{\delta_{\text{кр.от}}}\right)^2\right]. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что относительная концентрация  $\varepsilon_{\text{от+цс}}$  зависит от крупности распределения и при отстаивании, и при сепарации.

Анализ зависимости относительной концентрации  $\varepsilon_{\text{от+цс}}$  комплекса ОТ + ЦС показывает, что с возрастанием эффективности первой ступени очистки (отстаивания) возрастает и общая эффективность всего комплекса. Это иллюстрируется графиком на рисунке, где изображена зависимость  $\varepsilon_{\text{от+цс}} = f(\delta_{\text{кр.с}})$ , рассчитанная по формуле (7) при различных значениях  $\delta_{\text{кр.от}}$  ( $\delta_{\text{кр.от}} = 15$  мкм —

кривая 2,  $\delta_{кр.от} = 12$  мкм — кривая 3,  $\delta_{кр.от} = 10$  мкм — кривая 4). Там же показана зависимость  $\varepsilon_{от+цс} = f(\delta_{кр})$  без предварительного отстаивания (кривая 1).

На рисунке видно, что относительная концентрация при комплексе ОТ + ЦС несколько меньше, чем без предварительного отстаивания. Причем с уменьшением размера удаляемых частиц при отстаивании уменьшается и  $\varepsilon_{от+цс}$ . В частности, снижение  $\delta_{кр}$  с 15 мкм до 12 мкм ведет к снижению  $\varepsilon_{от+цс}$  с 0,25 до 0,20. При значительных начальных концентрациях это снижение может быть значительным.



### Выводы

1. С возрастанием эффективности первой ступени очистки (отстаивания) возрастает и общая эффективность всего комплекса ОТ+ЦС.
2. При значительных начальных концентрациях снижение относительной концентрации может быть значительным.
3. Первая ступень очистки делает сепаратор более эффективным, что положительно может сказаться на топливной аппаратуре двигателя, так как сепаратор при совместном использовании с отстаиванием (как показал наш анализ) удалит из топлива больше загрязнений, чем если бы он работал один.
4. Проведенное исследование показало несомненную эффективность использования отстаивания в качестве первой ступени обработки топлива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов Е. В. Комплексная утилизация отходов сепарации топлива в судовых энергетических установках / Е. В. Белоусов, М. С. Агеев, Н. Н. Кобяков // Вестник двигателестроения. — 2011. — № 2. — С. 111–114.
2. Сагин С. В. Использование топливных присадок в судовых дизелях / С. В. Сагин, Ю. В. Заблочный // Судовые энергетические установки. — 2012. — № 30. — С. 180–186.
3. Митягин В. Г. Проблемы эксплуатации судовых дизелей на различных видах топлива / В. Г. Митягин, В. Н. Окунев, В. В. Мартыанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3. — С. 49а–53.
4. Назаров В. В. Очистка и сепарация нефтепродуктов реоцентрифугированием / В. В. Назаров, В. М. Кушнарченко // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2011. — № 10 (129). — С. 205–210.
5. Добровольский В. В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных двигателей / В. В. Добровольский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки. — 2010. — № 26. — С. 46–54.

6. Корнилов Э. В. Технология топливopодготовки на судне / Э. В. Корнилов. — СПб.: Негоциант, 2008. — 248 с.
7. Средства очистки жидкостей на судах: справочник / под общ. ред. И. А. Иванова. — Л.: Судостроение, 1984. — 272 с.
8. Иванов И. А. Анализ систем топливopодготовки при совместном использовании отстаивания и фильтрования / И. А. Иванов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Водный транспорт России: Инновационный путь развития». — СПб.: СПГУВК, 2011. — Т. 2. — С. 286–290.
9. Иванов И. А. Научные основы моделирования счета и выбора методов и технологических схем подготовки топлив для судовых дизелей: дис. ... д-ра техн. наук / И. А. Иванов. — СПб., 1993. — 351 с.
10. Иванов И. А. Исследование эффективности методов и технологических схем очистки тяжелых топлив для судовых дизелей: дис. ... канд. техн. наук / И. А. Иванов. — СПб., 1974. — 161 с.

## REFERENCES

1. Belousov, E., M. Ageev, and N. Kobayakov. “Complex utilization of the waste of separation of fuel in the ship power installations.” *Vestnik dvigatelestroeniya* 2 (2011): 111–114.
2. Sagin, S. V., and Yu. V. Zablotskii. “Ispol’zovanie toplivnykh prisadok v sudovykh dizelyakh.” *Ship power plants* 30 (2012): 180–186.
3. Mityagin, V. G., V. N. Okunev, and V. V. Mart’yanov. “Problems of ship diesel engines operation with different kinds of fuel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2011): 49a–53.
4. Nazarov, V. V., and V. M. Kushnarenko. “Purification and separation of oil by reocentrifuging.” *Vestnik of the Orenburg State University* 10(129) (2011): 205–210.
5. Dobrovolskii, V. V., and S. A. Khanmamedov. “Podgotovka vyazkikh topliv sudovykh malooborotnykh dvigatelei.” *Ship power plants* 26 (2010): 46–54.
6. Kornilov, E. V. *Tekhnologiya toplivopodgotovki na sudne*. Izd-vo Negotsiant, 2008.
7. Ivanov, I. A., ed. *Sredstva ochistki zhidkosti na sudakh: spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1984.
8. Ivanov, I. A. “Analiz sistem toplivopodgotovki pri sovmestnom ispol’zovanii otstaivaniya i fil’trovaniya.” *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vodnyi transport Rossii: Innovatsionnyi put’ razvitiya»*. SPb: SPGUVK, 2011. Vol. 2. 286–290.
9. Ivanov, I. A. Nauchnye osnovy modelirovaniya scheta i vybora metodov i tekhnologicheskikh skhem podgotovki topliv dlya sudovykh dizelei. Dr. diss. (Tech.). SPb., 1993: 351.
10. Ivanov, I. A. Issledovanie effektivnosti metodov i tekhnologicheskikh skhem ochistki tyazhelykh topliv dlya sudovykh dizelei. PhD diss. (Tech.). SPb., 1974:161.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Иванов Игорь Александрович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская 5/7  
e-mail: [ivzap@mail.ru](mailto:ivzap@mail.ru), [kaf\\_sdvs@gumrf.ru](mailto:kaf_sdvs@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Ivanov, Igor A.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [ivzap@mail.ru](mailto:ivzap@mail.ru), [kaf\\_sdvs@gumrf.ru](mailto:kaf_sdvs@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2016 г.  
Received: December 17, 2016.