Судовые энергетические установки

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-8>
УДК 621.43.013: 629.3

Ю.Я. Фершалов, М.В. Грибиниченко, В.Н. Коршунов, Л.П. Цыганкова

ФЕРШАЛОВ ЮРИЙ ЯКОВЛЕВИЧ – д.т.н., профессор, AuthorID: 461065, SPIN: 6629-2240, ORCID: 0000-0002-6138-3231, ResercherID: E-8596-2014, ScopusID: 31267557200, e-mail: fershalovjuriy@mail.ru
ГРИБНИЧЕНКО МАТВЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, Author ID: 639456, SPIN: 8038-4960, e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru
КОРШУНОВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., доцент, AuthorID: 352615, e-mail: vickor43@yandex.ru
ЦЫГАНКОВА ЛЮДМИЛА ПЕТРОВНА – доцент, AuthorID: 597204, SPIN: 1034-0114, e-mail: liusivl@mail.ru
Политехнический институт (Школа)
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Использование эффекта Ранка–Хилша для восстановления эксплуатационных свойств отработанных моторных масел

Аннотация: Предпринят анализ возможности создания устройства по удалению жидких фракций (воды и топлива) из отработанного моторного масла для восстановления его эксплуатационных свойств с целью повторного использования в судовых дизелях.

Показано, что необходимость повторного использования отработанных моторных масел обусловлена требованиями защиты окружающей среды. Проанализированы особенности вихревого движения жидкости как твёрдого тела или как «потенциального вихря» (вихри Ренкина). Однако эти особенности не объясняют эффект Ранка–Хилша. Теоретическое объяснение эффекта Ранка–Хилша: в вихревых трубах происходит энергетическое разделение газа за счёт центробежного эффекта турбулентных элементов по величине тангенциальной скорости. В результате разделения заторможенных элементов под действием центробежной силы и их адиабатного расширения происходит снижение температуры центрального потока. На основе использования эффекта Ранка–Хилша, мы полагаем, можно создать установку по отделению от масла топлива и воды. Идея заключается в том, что вращательным движением тонкой плёнки масла, содержащей водотопливные фракции, как и любым другим вращательным движением, создаётся центробежная сила. Дисперсная фаза воды, как обладающая большей плотностью, отжимается к периферии, а дизельное топливо с меньшей плотностью находится ближе к центру вращения. Моторное масло, имеющее промежуточное значение плотности, будет находиться между этими слоями воды и топлива. Согласно эффекту Ранка–Хилша, температура на периферии будет выше, она постепенно понизится от слоя воды к слою топлива. Основная задача при разработке устройства удаления жидких загрязнителей – создать такие давление и температуру, чтобы на наружном слое происходило выпаривание влаги, а с внутреннего слоя испарялось топливо, при этом защищённое этими двумя слоями масло, имеющее температуру кипения выше, чем у дизельного топлива и ниже, чем у воды, не испарялось.

Ключевые слова: регенерация, моторное масло, эффект Ранка–Хилша, удаление воды, удаление топлива, устройство для удаления воды и топлива из масла.

Введение

Известно, что отработанные моторные масла при их утилизации сжиганием представляют определённую угрозу по загрязнению окружающей среды. Эта угроза может быть даже большей, учитывая значительное содержание в маслах присадок, образующих канцерогенные продукты при их сжигании. Но мелкие потребители моторных масел ограничиваются захоронением отработанных моторных масел на свалках, сливом их в канализацию, в неразрешённые места или сжигают в бочках. Таким образом, кроме экономических потерь, такая утилизация создает угрозу окружающей среде. Экологически опасными компонентами моторных масел являются полигалогендефили (в основном серосодержащие) и хлорсодержащие присадки, некоторые биоциды, органические соединения металлов (свинца, бария, сурьмы, цинка), нитриты [3, 4].

Перспективное направление экономии на смазочных материалах – соответствующая их переработка и повторное использование, т.е. утилизационные мероприятия – сбор и повторное использование отработанных моторных масел после соответствующей обработки [5].

Подготовка ранее отработавших моторных масел осуществляется очисткой и регенерацией. Вода и механические примеси удаляются обычной очисткой в сепараторах. Но поскольку вода в масле может находиться в двух фазах – мелкодисперсной и эмульгированной, то не всю её можно удалить таким образом. Очисткой в сепараторах удаляется только мелкодисперсная фаза воды, при таком методе также образуются отходы, более опасные для окружающей среды, чем отработанные моторные масла. А для удаления эмульгированной воды нужен другой метод.

Регенерация отработанных моторных масел (ОММ) представляется наиболее перспективным методом их утилизации: нейтрализуются экологически опасные компоненты, и эти масла можно многократно использовать: они не изымаются из эксплуатации и не попадают в окружающую среду.

Таким образом, ОММ, прошедшие регенерацию, могут применяться по своему прямому назначению и рассматриваться не как отходы, подлежащие утилизации, а как сырьё для производства товарного моторного масла.

Цель работы – обосновать возможность создания (и его перспективность) устройства для восстановления эксплуатационных свойств отработанных моторных масел на основе использования эффекта Ранка–Хилша.

Постановка задачи: эффект Ранка–Хилша

В 1931 г. Ж. Ранк открыл вихревой эффект, показывающий изменение температуры газа по радиусу в промышленном циклонном пылеуловителе. А в 1947 г. Хилш, изучая влияние давления на входе и геометрии на эффективность охлаждения, сумел улучшить мощность охлаждения. Ввиду значительного вклада Хилша в изобретение Ранка, этот вихревой эффект назван эффектом Ранка–Хилша. Его особенность – вихревой поток газа охлаждается при приближении к центру вращения [1, 2].

Вихревое движение жидкости можно рассматривать как вращение твёрдого тела вокруг оси с какой-то угловой скоростью ω :

$$\omega = \frac{v}{r} = \text{const}, \quad (1)$$

где: v – линейная скорость вращения, r – радиус от оси вращения.

Такое вращение называется «кваситвёрдым» [7]. В этом случае «циркуляция скорости» Γ зависит от выбранного контура интегрирования вокруг некоторой оси с постоянной угловой скоростью ω :

$$\Gamma = \oint v \cdot dl. \quad (2)$$

В данном случае имеет место адиабатическое сжатие внешних и адиабатическое расширение внутренних слоёв, что приводит к изменению температуры жидкости по радиусу и тем самым делает процесс похожим на эффект Ранка–Хилша. Но поскольку в вихревых трубах процесс непрерывен, то это объяснение эффекта Ранка–Хилша неправильно.

В другом случае вихревое движение жидкости можно рассматривать как «потенциальный», или «свободный», вихрь. Формула для определения циркуляции скорости имеет вид

$$\Gamma = v \cdot r = \text{const.} \quad (3)$$

Причина возникновения свободных вихрей – закон сохранения момента импульса и механической энергии, поэтому для свободных вихрей характерно распределение жидкости, возникающее в связи с достаточно быстрым изменением молекулами жидкости радиуса своего вращения. При радиусе, уменьшающемся до нуля, скорость вращения частиц жидкости должна неограниченно увеличиться. Это свойственно случаю, когда в центре вращения жидкость отсутствует [7].

Были попытки исследовать сущность эффекта Ранка–Хилша с помощью вихрей Ренкина – плоских течений, представляющих собой вихри, промежуточные между вынужденными и свободными. В вихрях Ренкина распределение скоростей имеет следующий вид:

$$v = \frac{C}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \right], \quad (4)$$

где C – константа, определяющая интенсивность вихря, r_0 – константа, определяющая радиальную координату, условно разделяющую свободный и вынужденные вихри.

Выше были представлены основные модели, которые пытались применить для математического описания движения жидкости в трубах с вихревыми течением, но они не подходят для описания эффекта Ранка–Хилша.

Для анализа течения жидкости или газа в трубке Ранка–Хилша проанализируем процесс закручивания трёхмерного течения в канале, имеющем форму длинной цилиндрической трубы, на закрытом конце устройства создается завихрение.

Для создания вихревого течения в трубах применяются тангенциальные и улиточные образователи вихрей. При этом образуется центральная зона обратного течения вокруг образователя вихрей [7].

Гипотеза эффекта Ранка–Хилша

Гипотеза эффекта Ранка–Хилша заключается в следующем. Элементы потока имеют разную тангенциальную скорость. Эти элементы разделяются в поле центробежных сил. При этом ближе к оси оказываются элементы с малым запасом кинетической энергии. Получается, что на одном и том же радиусе во вращающемся потоке образуются два микрообъёма. Окружная скорость у одного пульсирует положительно, а у другого – отрицательно. При разных тангенциальных скоростях и одном и том же центростремительном ускорении элементы разделяются на более быстрые, которые удаляются от оси потока, и на более медленные, сдвигающиеся к оси.

Эта гипотеза объясняет эффект Ранка–Хилша, для которого характерно энергетическое разделение турбулентных элементов с разной тангенциальной скоростью в вихревой трубе из-за разделения турбулентных элементов под действием центробежных сил [6].

Приведённая здесь гипотеза объясняет опубликованные экспериментальные данные о работе вихревых труб (см., например, [6]).

Таким образом, исходя из этой гипотезы можно заключить следующее [7].

1. Снижение температуры потока, текущего ближе к оси вращения, происходит в результате адиабатного расширения в процессе разделения заторможенных элементов под действием центробежных сил.

2. Турбулентность и вынужденный вихрь порождаются входящим потоком, который неоднороден и имеет тангенциальное вращение.

Принцип использования эффекта Ранка–Хилша для регенерации моторного масла

Мы полагаем, что на основе эффекта Ранка–Хилша возможно создание установки по отделению от масла топлива и воды. Принцип действия заключается в том, что вращательным движением тонкой плёнки масла, содержащей водотопливные фракции (ВТФ), как и любом другом вращательном движении, создаётся центробежная сила. Дисперсная фаза воды, как имеющая большую плотность ($\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$), отжимается к периферии, а дизельное топливо, у которого плотность меньше ($\rho = 0,84 \div 0,86 \text{ г/см}^3$), находится ближе к центру вращения. Моторное масло, имеющее промежуточное значение плотности ($\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$), будет находиться между этими слоями воды и топлива. Согласно эффекту Ранка–Хилша, температура на периферии будет выше, она постепенно понижается от слоя воды к слою топлива. Основная задача при разработке устройства удаления жидких загрязнителей – создать такие давление и температуру, чтобы на наружном слое происходило выпаривание влаги, а с внутреннего слоя испарялось топливо. И при этом защищённое такими двумя слоями масло с температурой кипения выше, чем у дизельного топлива и ниже, чем у воды, не испарялось.

Принцип практической реализации эффекта Ранка–Хилша

Для подтверждения гипотезы об улучшении очистки отработанного масла с использованием принципа эффекта Ранка–Хилша мы планируем изготовить установку на основе разработанной в [3, 8] принципиальной схемы (см. рисунок), согласно которой будет реализован сам циклонный испаритель.

При организации процесса тонкоплёночного испарения, как наиболее эффективного для удаления из ОММ дизельного топлива и воды, авторами работы [3, 8] для упрощения формирования тонкоплёночного испарения конструкция предлагается без движущихся частей. Представленная схема установки на рисунке отображает использование циклонного испарителя (ЦИ) в устройстве удаления ВТФ из ОММ. Предварительно очищенное сепараторами судовых штатных систем энергетической установки судна от механических примесей, но ещё загрязнённое ВТФ отработанное машинное масло подогревается и подаётся под давлением в ЦИ.

Благодаря специальной форме испарителя и тангенциальной подаче масла, на его внутренней поверхности формируется тонкоплёночное течение. В объёме колбы ЦИ создаётся некоторый вакуум, что в совокупности с предварительным подогревом масла активирует удаление дизельного топлива и воды [5, 9–11].

Процесс подачи масла осуществляется в виде тонкой плёнки по внутренней поверхности ЦИ с как можно большей линейной и угловой скоростью по спирали. Для исключения разбрызгивания плёнки масла подаваемой струёй и обеспечения безотрывного течения плёнки по всей поверхности подбирается соответствующая форма и размерные характеристики колбы ЦИ.

Тонкая плёнка масла движется волнообразно в виде следующих один за другим по поверхности циклона микровихрей, тем самым обеспечивая интенсивный тепло- и массообмен. Благодаря большой угловой скорости плёнки происходит полное разделение паровой и жидкой фаз струи. Также благодаря большой угловой скорости плёнка обладает хорошей устойчивостью в поле центробежных сил при различных динамических воздействиях и наклонах установки при качке судна.

Натекание конусной струи в капельном виде на внутреннюю поверхность испарителя формирует закрученное течение потока ОММ. В результате этого формируется наружный вихрь, состоящий из двух слоёв: первый – тонкий слой плёнки моторного масла, второй – внешний слой, представляющий собой парогазовый вихрь испарений из масла топлива и воды.

За счёт эффекта Ранка–Хилша температура наружного слоя больше температуры внутреннего слоя. Это обстоятельство значительно интенсифицирует пленочное испарение [9].

Схема образования вихрей и тонкопленочного течения ОММ в циклонном испарителе [3, 8].

Заключение

Итак, анализ возможности создания установки для отделения от моторного масла жидких загрязнителей на основе эффекта Ранка–Хилша позволяет сделать вывод о ее достаточной эффективности, чтобы быть востребованной для судов морского флота. Температура вспышки масла восстанавливается до 200 °С, т.е. до первоначального значения, а вязкость – с 8,97 до 11,22 мм/с². К достоинствам установки на основе эффекта Ранка–Хилша относится её нечувствительность к качке, крену и дифференту судна, что является важным в судовых условиях.

В дальнейшем, чтобы подтвердить результаты нашего теоретического исследования, мы спроектируем испытательный стенд с установкой предлагаемого типа и проведем соответствующие эксперименты.

Вклад авторов в статью: Ю.Я. Фершалов – проблематика, постановка задачи, разработка концепции, участие в сборе и обработке материала; М.В. Грибиниченко – определение структуры исследования, участие в анализе, сборе и обработке материала, интерпретация результатов обзора технической литературы; В.Н. Коршунов – участие в сборе и обработке материала; Л.П. Цыганкова – сбор и обработка материала, написание и редактирование текста, утверждение окончательного варианта, ответственность за целостность всех частей статьи. Все авторы – редактирование текста и утверждение окончательного варианта статьи.

Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору А.Н. Минаеву за консультации в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
3. Кича Г.П., Тарасов В.В., Глушков С.В. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1, № 3(33). С. 132–138.
4. Кича Г.П., Кича П.П., Семенюк Л.А. Возможность увеличения срока службы моторного масла в судовых дизелях типа ЧН18/22 // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 1–2. С. 112–116.
5. Кича Г.П., Тарасов В.В., Деревцов Е.М. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 1–2. С. 83–91.
6. Кузнецов В.И. Теория и расчет эффекта Ранка. Омск: Омский гос. тех. ун-т, 1995. 217 с.
7. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Самара: Оптима, 1997. 355 с.
8. Тарасов В.В. Экспериментальное исследование работы циклонного испарителя регенерационной установки по удалению топливных фракций из отработанного моторного масла // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 139–143.
9. Тарасов В.В., Соболенко А.Н. Влияние эксплуатационных свойств регенерированного моторного масла на изнашивание судового дизеля при его работе на разных сортах топлива // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 71–81.
10. Тарасов В.В., Соболенко А.Н. Исследование эффективности регенерации отработанных моторных масел судовых дизелей в циклонном испарителе РУМС-1 на основе регрессионных моделей // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2019. № 3(40). С. 111–122. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-12>
11. Тарасов В.В., Соболенко А.Н. Рекомендации по глубине очистки от механических примесей регенерированных моторных масел разных эксплуатационных групп // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 5, № 4(42). С. 110–113.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 3/44

Marine Engines and Auxiliary Machinery

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-8>

Fershalov Yu., Gribinichenko M., Korshunov V., Tsigankova L.

YURIY FERSHALOV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-6138-3231, ResercherID: E-8596-2014, ScopusID: 31267557200, e-mail: fershalovjuriy@mail.ru

MATVEI GRIBINICHENKO, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

VIKTOR KORSHUNOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: vickor43@yandex.ru

LYUDMILA TSIGANKOVA, Associate Professor, e-mail: liusivl@mail.ru

Politechnical Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Using the Ranque–Hilsch effect for restoration of operational properties of waste engine oils

Abstract: An analysis is made for the possibility of creating a device for removing liquid fractions (water and fuel) from used engine oil to restore its operational properties for subsequent reuse in marine diesels.

It is shown that the need for reuse of used motor oils is based on environmental protection requirements. The features of the vortex motion of liquid as a solid body or as a “potential vortex” (Rankine vortex) are analyzed. However, these features do not explain the Ranque–Hilsch effect. A theoretical explanation of the

Ranque–Hilsch effect is that in the vortex tubes energy separation of the gas occurs due to the centrifugal effect of the turbulent elements in terms of the tangential velocity. As a result of the separation of inhibited elements under the action of centrifugal force and their adiabatic expansion, the temperature of the central stream decreases. Based on the use of the Ranque–Hilsch effect, we believe it is possible to create a facility for separating fuel and water from oil. The idea is that the rotational motion of a thin film of oil containing water-fuel fractions, like any other rotational motion, creates a centrifugal force. The dispersed phase of water, as the one of higher density, is squeezed to the periphery, and diesel fuel as the one of lower density gets closer to the center of rotation. Engine oil of intermediate density will then be positioned between these layers of water and fuel. According to the Ranque–Hilsch effect, the temperature at the periphery will be higher; it will gradually decrease from the water layer to the fuel layer. The main task in developing a device for removing liquid pollutants is to create such pressure and temperature that moisture evaporates on the outer layer, and fuel evaporates from the inner layer. At the same time, engine oil protected by these two layers, the boiling point of which is higher than that of diesel fuel and lower than that of water, would not evaporate.

Keywords: regeneration, motor oil, Ranque–Hilsch effect, water removal, fuel removal, device for removing water and fuel from oil.

REFERENCES

1. Abramovich G.N. Theory of turbulent jets. M., Science, 1984, 716 p.
2. Gupta A., Lilly D., Cyred N. Swirling flows. M., World, 1987, 590 p.
3. Kicha G.P., Tarasov V.V., Glushkov S.V. Regeneration of used motor oils and restoration of their operational properties on ships. *Marine intelligent technology*. 2016;1(33):132–138.
4. Kicha G.P., Kicha P.P., Semenyuk L.A. Possibility to increase engine oil service life in marine diesel engines of type ChN18/22. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2017(1–2):112–116.
5. Kicha G.P., Tarasov V.V., Derevtsov E.M. Efficiency of application in ship diesels of regenerated reconditioned used motor oils. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2016(1–2):83–91.
6. Kuznetsov V.I. Theory and calculation of the Rank effect. Omsk, Omsk State Technical University, 1995, 217 p.
7. Merkulov A.P. Vortex effect and its application in technology. Samara, Optima, 1997, 355 p.
8. Tarasov V.V. An experimental study of the operation of a cyclone evaporator of a regeneration unit to remove fuel fractions from used engine oil. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2015;3:139–143.
9. Tarasov V.V., Sobolenko A.N. The influence of the operational properties of regenerated engine oil on the wear of a marine diesel engine during its operation on different grades of fuel. *Bulletin of ASTU. Series Marine Engineering and Technology*. 2019(4):71–81.
10. Tarasov V., Sobolenko A. The study of the effectiveness of regeneration of waste engine oils of marine diesel engines in a RUMS-1 cyclone evaporator. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2019(40):111–122. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-12>
11. Tarasov V.V., Sobolenko A.N. Recommendations on the depth of purification from mechanical impurities of regenerated motor oils of various operational groups. *Marine Intelligent Technology*. 2018;5(42):110–113.