

научной конференции «ТТС-17». Кубанский государственный технологический университет, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова.– 2017. –С. 27-31.

11. Кондратьев, С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук С.И. Кондратьев.– Новороссийск: Новороссийская государственная морская академия, 2004.
12. Боран-Кешишьян А.Л., Загорёнов М.В., Флоря П.Н., Ярошенко А.А., Кондратьев С.И. Функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики// Морские интеллектуальные технологии.– 2021.– Т. 1. № 4 (54).– С. 258-264.
13. Энгватова В.В., Дмитренко Е.В., Шкода В.В., Солонникова Н.В., Модина М.А. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда работников промышленных предприятий: учебное пособие. Часть 2.– Краснодар, 2020.

References

1. Hudyakov S.A., Ignatenko A.V. Sovremennye sudovye malooborotnye dizel'nye dvigateli: sostoyanie, perspektivy i problemy. Eksplyuatsiya morskogo transporta. 2020. №1 (94). SPb, 2020.
2. Maritime forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2020. [Elektronnyj resurs] <https://eto.dnv.com/2020>
3. Goreva T.I., Pomyagin N.N., Pyukke G.A. Nejrosetevye modeli diagnostiki tekhnicheskikh sistem. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki. Petropavlovsk-Kamchatskij, №1/2012.
4. Epihin A.I. Diagnosticheskie moduli sistemy podderzhki prinyatiya reshenij dlya tankerovgazovozov. «Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta». Seriya «Morskaya tekhnika i tekhnologiya». Vypusk №2. Astrahan', 2017.
5. Epihin A.I., Hekert E.V., Modina M.A. Principy nejro-upravleniya i varianty arhitektury nejronnyh

setej, primenitel'no k slozhnoj dinamicheskoj sisteme SEU-sudno. «Morskie intellektual'nye tekhnologii» №4 (50) t.4. SPb, 2020.

6. Pat. RF № RU 2737457 C1. Epihin A.I. Avtomaticheskaya sistema s nejro-nechetkoj set'yu dlya kompleksnoj tekhnicheskoy diagnostiki i upravleniya sudovoj energeticheskoj ustanovkoj; opubl. 30.11.2020, Byul. № 4, «Izobreteniya. Poleznye modeli».
7. Hecht-Nielsen, R. (1990), Neurocomputing, Reading, MA: Addison-Wesley, ISBN 0-201-09355-3.
8. Won, Hoyun Neural-Network Vector Controller for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives // IEEE transactions on cybernetics. 2020. Volume 50: Number 7; pp 3218-3230
9. Studenikin D.E., Bovan S.D., Hekert E.V., Modina M.A. Ispol'zovanie nejronnyh setej dlya organizacii vizual'nogo nablyudeniya//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-3 (46). S. 91-95.
10. Modina M.A., SHkoda V.V. Tekhnologii izgotovleniya magnitoprovodov aksial'nyh generatorov i transformatorov dlya morskikh i vozdušnyh sudov//Tekhnicheskie i tekhnologicheskie sistemy. Materialy devyatoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «TTS-17». Kubanskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, Krasnodarskoe vysshee voennoe aviacionnoe uchilishche letchikov imeni A.K. Serova; pod obshchej redakciej B.H. Gajtova. 2017. S. 27-31.
11. Kondrat'ev, S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnyimi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya [Tekst] / S.I. Kondrat'ev avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossijskaya gosudarstvennaya morskaya akademiya. Novorossijsk, 2004.
12. Boran-Keshish'yan A.L., Zamoryonov M.V., Florya P.N., YAroshenko A.A., Kondrat'ev S.I. Funkcionirovanie tekhnicheskoy sistemy s mgnovenno popolnyaemym rezervom vremeni s uchetom profilaktiki//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. T. 1. № 4 (54). S. 258-264.
13. Engvatova V.V., Dmitренко E.V., SHkoda V.V., Solonnikova N.V., Modina M.A. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i ohrana truda rabotnikov promyshlennyh predpriyatij. CHast' 2. Uchebnoe posobie / Krasnodar, 2020.

УДК 621

DOI: 10.34046/aumsuomt102/27

АММИАК КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ТИП ТОПЛИВА

А.И. Золотых, курсант,

Д.Н. Гусев, курсант,

А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент

М.Р. Нейжмак, курсант

Целью данной статьи является рассмотрение аммиака в качестве альтернативы современным топливам. Рассмотрено сравнение его с ними, а также представлена теоретическая компоновка двигателя, работающего на Аммиаке. В статье также рассматриваются следующие вопросы, такие как сравнение

Аммиака с другими альтернативными топливами, сравнение цен Аммиака с дизельным и тяжёлым топливом, выбросы вредных веществ, производства, перевозка и хранение его на судне.

Новизна данной статьи в том, что рассматриваемый тип топлива зачастую не рассматривается как альтернативный вариант, конкурируя с водородом и природным газом. Однако он имеет ряд преимуществ как экологических, так и технико-экономических. Также в статье рассмотрены 3 метода перевода судовых двигателей на аммиак, 2 из которых применимы к судам, уже находящимся в эксплуатации. Произведено сравнение цен на аммиак с другими топливами.

Выводами статьи являются более низкие показатели выбросов вредных веществ в атмосферу, дешевизна, методы перехода на него и повышение КПД двигателя. Выбросы CO₂ и SO_x отсутствуют, а NO_x сильно снижены. Аммиак дешевле HFO и DO, а также H₂ и LNG. Перевод судового двигателя на Аммиак возможен при повышении степени сжатия, использовании принудительного розжига, а также использование его совместно с перечисленными в статье присадками.

Ключевые слова: CO₂, SO_x, NO_x, КПД, производство, перевозка и хранение, коррозия, горение, схема двигателя

AMMONIA AS ALTERNATIVE FUEL

A.I. Zolotykh, D.N. Gusev, A.I. Epikhin, M.R. Neizhmak

The purpose of this article is to consider ammonia as an alternative to modern fuels. A comparison with them is considered, and a theoretical layout of the engine running on ammonia is also presented. The article also covers the following issues such as comparison of Ammonia with other alternative fuels, comparison of prices of Ammonia with diesel and heavy fuels, emissions of harmful substances, production, transportation and storage of it on a ship.

The novelty of this article is that the type of fuel under consideration is often not considered as an alternative, competing with hydrogen and natural gas. However, it has a number of advantages, both environmental and technical and economic. The article also discusses 3 methods for converting ship engines to ammonia, 2 of which are applicable to ships already in operation. Comparison of prices for ammonia with other fuels has been made.

The conclusions of the article are lower rates of emissions of harmful substances into the atmosphere, low cost, methods for switching to it and increasing engine efficiency. There are no CO₂ and SO_x emissions and NO_x is greatly reduced. Ammonia is cheaper than HFO and DO, as well as H₂ and LNG. The conversion of a marine engine to Ammonia is possible by increasing the compression ratio, using forced ignition, as well as using it in conjunction with the additives listed in the article.

Keywords: CO₂, SO_x, NO_x, efficiency, production, transportation and storage, corrosion, combustion, engine layout.

Как снизить выбросы CO₂ судовыми ДВС

Сегодня решение вопроса экологии занимает одно из важнейших мест наряду с вопросами безопасности и экономичности. Судовая промышленность ежегодно выбрасывает огром-

ное количество CO₂, сжигая огромное количество топлива. Компания SCF предъявляет к своим судам следующие дневные требования по расходу топлива в сутки, в зависимости от скорости [1]:

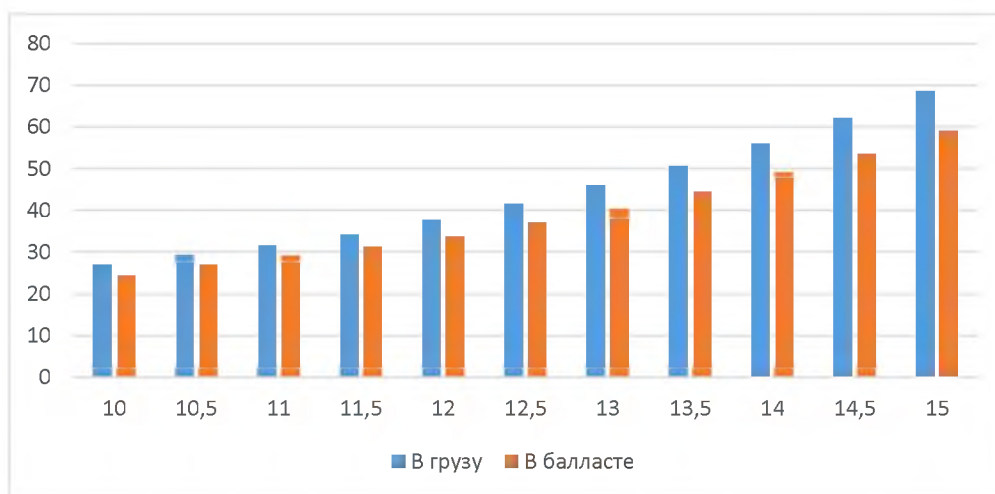


График 1 – Зависимость расхода топлива(МТ) от скорости (узел) для HFO

На основании «Парижского соглашения» принятого в 2015-ом году можно сделать вывод, что в ближайшем будущем всемирное сообщество будет стремиться к снижению выбросов до

минимального уровня [2]. Как не трудно догадаться, это приведёт к изменениям конструкции современных дизелей.

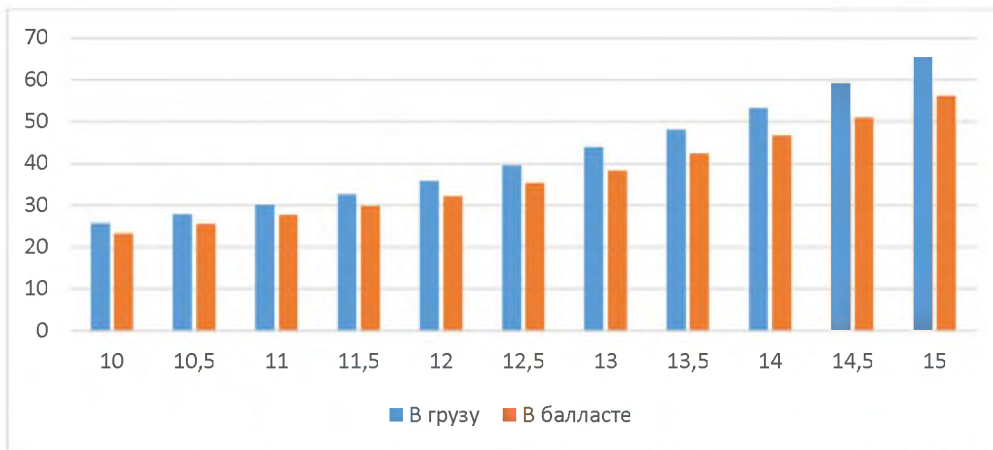


График 2 – Зависимость расхода топлива(МТ) от скорости (узел) для MDO

Предложение: Использовать аммиак как топливо

Нашим предложением по поводу решения данной проблемы является использование аммиака как альтернативного типа топлива. Это решение одновременно экономично и экологично, а следовательно – имеет большие перспективы.

Почему именно аммиак:

1) не имеет CO2 в составе продуктов своего сгорания

В сравнении с другими типами топлива аммиак имеет ряд преимуществ. Так, к примеру, в ходе сгорания NH3 не может получиться CO2.

2) Не требует серьёзных изменений в конструкции современных судов

Процесс горения аммиака в двухтактных двигателях с высокой степенью сжатия схож с горением современных типов топлив. Это говорит о том, что при производстве двигателей на аммиаке серьёзных изменений в конструкции не будет.

3) Удобен для перевозки в сравнении с альтернативными заменителями

Если сравнивать с водородом и природным газом, аммиак сжижается при менее низких давлениях и температурах. Это облегчает его хранение и транспортировку.

Таблица 1 – Давления и температура сжижения разных сортов топлива

Тип топлива	Давление (бар)	Температура (°C)
LNG	250	-160
Водород	700	-253
Аммиак	8,5	-36

4) уже имеет промышленное производство

Аммиак уже производится в промышленных масштабах в сфере удобрений. Из этого следует, что в большинстве портов проблем с бункеровкой не будет. Кроме того, человечество уже

разработало цистерны, которые могут хранить данный газ в сжиженном виде.

Исследование вопроса:

Перспектива использования аммиака как одного из альтернативных видов топлива обусловлена: доступностью, экономичностью и обширной сырьевой базой.

Доступность обуславливается простотой изготовления. В наши дни аммиак производится в широких масштабах химической промышленностью из водорода и азота. Водород берут из воды, азот из воздуха.

Это топливо экономично как минимум потому, что его цена на момент 2021 года ниже, чем у других распространённых видов морских топлив [3]. Эти данные приведены в таблице 2.

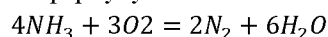
Таблица 2 – Цена разных сортов топлива

Тип топлива	Стоимость за mt
VLSFO	535 \$
ULSFO	600 \$
MDO	648 \$
LNG	518 \$
NH3	450 \$

Обширная сырьевая база характеризуется тем, что в теории она безгранична. Материалы, из которых производится аммиак являются продуктами его горения. Таким образом, аммиак является неисчерпаемым видом топлива.

Выбросы: NOx SOx CO2

Рассмотрим продукты горения аммиака. Запишем формулу:



Как видно, в реакции полностью отсутствует CO2, что уже удовлетворяет «Парижское соглашение». Сера тоже отсутствует, а значит, образование SOx имеет нулевое значение. Единственными вредными веществами являются оксиды азота NOx. Однако, температура горения

аммиака гораздо ниже чем у HFO и MDO. Рассмотрим график зависимости образования оксидов азота от температуры пламени (график 3).

Область «Дизели» соответствует объемам,

справедливым для современных СДВС [4]. Температура же пламени Аммиака приблизительно 1650 °С. Из этого следует, что выбросы NOx значительно ниже, чем у современных типов топлив.

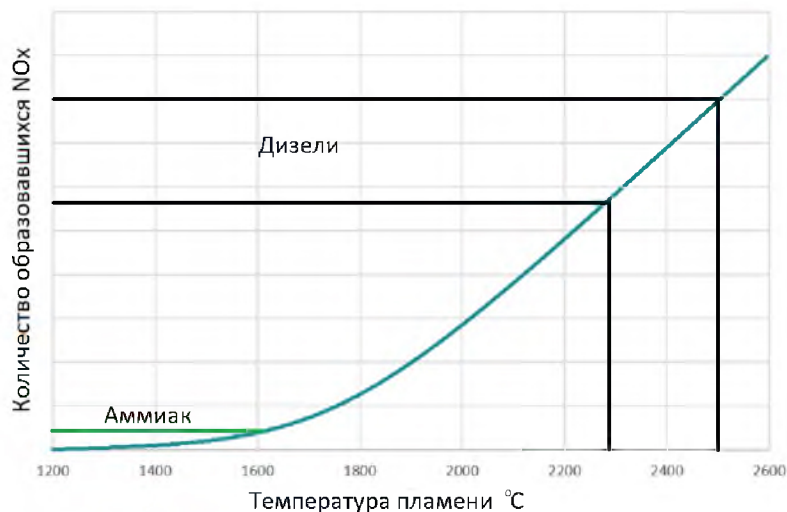


График 3 – Количество образовавшихся NOx от температуры пламени

Производство

Как уже было отмечено выше, для производства аммиака необходимо объединить водород, который получается методом гидролиза воды, и азот, содержащийся в воздухе. Такой способ называется химическим [8,13,14,15].

Но существует ещё один способ. Аммиак используют в сельскохозяйственной промышленности, для изготовления заменителей естественных удобрений. Естественные удобрения, в свою очередь, также содержат в себе аммиак. Поэтому можно извлекать данное топливо напрямую из них.

Второй метод очень выгоден для судов, перевозящих скот. По очевидным причинам проблем с естественными удобрениями у них нет.

Перевозка хранения

Наиболее оптимальное хранение аммиака возможно в цистернах, расположенных на главной палубе судна, что уже было хорошо реализовано компанией SCF в новой линейке «зеленых» танкеров. Это решение является наилучшим, так как его реализация не требует больших капиталовложений и серьезных изменений в конструкции танкера.



Рисунок 1 – Способ размещения LNG

Принципиальная схема и оборудование для работы судовой энергетической установки на аммиачном топливе [5].

- 1) Подготовка топливного газа для сжигания производится в газовой линейке (рис. 2).

2) Затем топливный газ поступает в смеситель (рис. 3), где он смешивается в нужных пропорциях с воздухом, при этом его давление равно атмосферному

3) При помощи дроссельной заслонки (рис. 4) с электроприводом происходит дозировка газозвушной смеси, поступающей в двигатель.

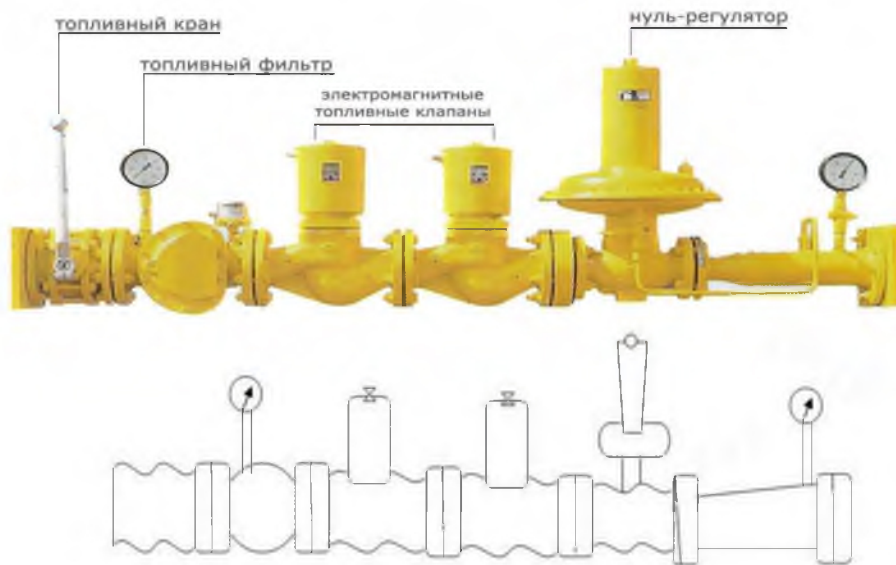


Рисунок 2 – Газовая линейка

Контроль за частотой вращения и искрообразованием выполняется системой управления газовым двигателем. Эта система выполняет функции аварийно-предупредительной сигнализации двигателя, производит открытие и закрытие в нужный момент электромагнитного топливного клапана при запуске и остановке двигателя.

Как бороться с коррозией: в хранении, в перекачке, в двигателе

Аммиак в отличие от современных видов топлива, обладает щелочными свойствами. По этой причине многие цветные металлы страдают от сильной коррозии. Однако сталь, чугун и алюминий менее восприимчивы к данному типу износа. Но это не является проблемой для судовых двигателей, так как они сделаны из этих материалов.



Рисунок 4 – Дроссельная заслонка

Кроме того, из-за отсутствия в аммиаке серы, сернистой коррозии в цилиндропоршневой группе быть не может. Соответственно необходимость в дорогих цилиндрических маслах отсутствует. Так в двухтактных двигателях можно использовать обычное масло из циркуляционной системы смазки.

Процесс горения

Аммиак в сжиженном состоянии отличается умеренными показателями энергоёмкости. Теплота его сгорания 17,13 МДж/кг или $11.64 \cdot 10^3 \text{ МДж/м}^3$. Это делает его менее энергоёмким, чем бензин метанол и водород в 2,5, 1,1 и 7 раз соответственно. Однако его плотность



Рисунок 3 – Смеситель

выше, чем у водорода, что облегчает его транспортировку. К тому же, он обладает высоким октановым числом, в отличие от водорода, потому он более устойчив к детонации. Его октановое число примерно равно 111 единицам. Это позволяет нам использовать более высокие степени сжатия, значительно повышая общий КПД двигателя, не боясь пагубного воздействия детонации [9, 10, 11, 12].

Первый способ – повышение степени сжатия

Несмотря на ряд преимуществ, аммиак в современном судовом двигателе гореть не будет. Температура самовоспламенения аммиака 650°C. Это гораздо выше, чем у HFO, MDO и LNG. Соответственно нам нужно решить вопрос подвода дополнительной энергии активации к рабочему телу в момент воспламенения.

Итак, для применения Аммиака на судовом дизеле мы предлагаем 3 способа. Первый – повышение степени сжатия.

Данный способ будет обеспечивать устойчивое горение аммиака при степенях сжатия до 35 единиц. Это увеличит термический КПД двигателя.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$

Однако данный способ не выгоден по отношению к современным судам, при их модернизации.

Их степень сжатия уже определена конструкцией, изменение которой довольно затратно.

Второй способ – использование принудительного розжига. Изменение степени сжатия не требуется, однако необходимо добавление свечи в конструкцию двигателя. Эта свеча должна создавать искру с высокой температурой. Этот метод уже более выгоден в плане модернизации, так как установка свечей проще и реализуемей, чем изменение степени сжатия.

Третий способ – добавление присадок к аммиаку. Если совместно с аммиаком будет впрыскиваться также водород или ацетилен. Это позволит аммиаку самовоспламенятся при нынешних показателях степени сжатия. Однако, кроме аммиака нужно будет перевозить также и эти дополнительные компоненты, хоть и в меньших количествах, т.к. для стабильного горения аммиака необходимо лишь 6-10% водорода и 15-20% ацетилена [6, 7, 8]. Также данный способ можно реализовать при использовании дизельного топлива. При этом вопрос с бункеровкой будет полностью решён, однако полностью избавиться от выбросов CO2 не удастся, но мы их значительно понизим.

Третий способ используется на двухтопливных двигателях, работающих на LNG с использованием MDO как присадочное топливо.

Схема двигателя, работающего на аммиаке.

Фирма MAN B&W предлагает следующее устройство топливной системы [7]:

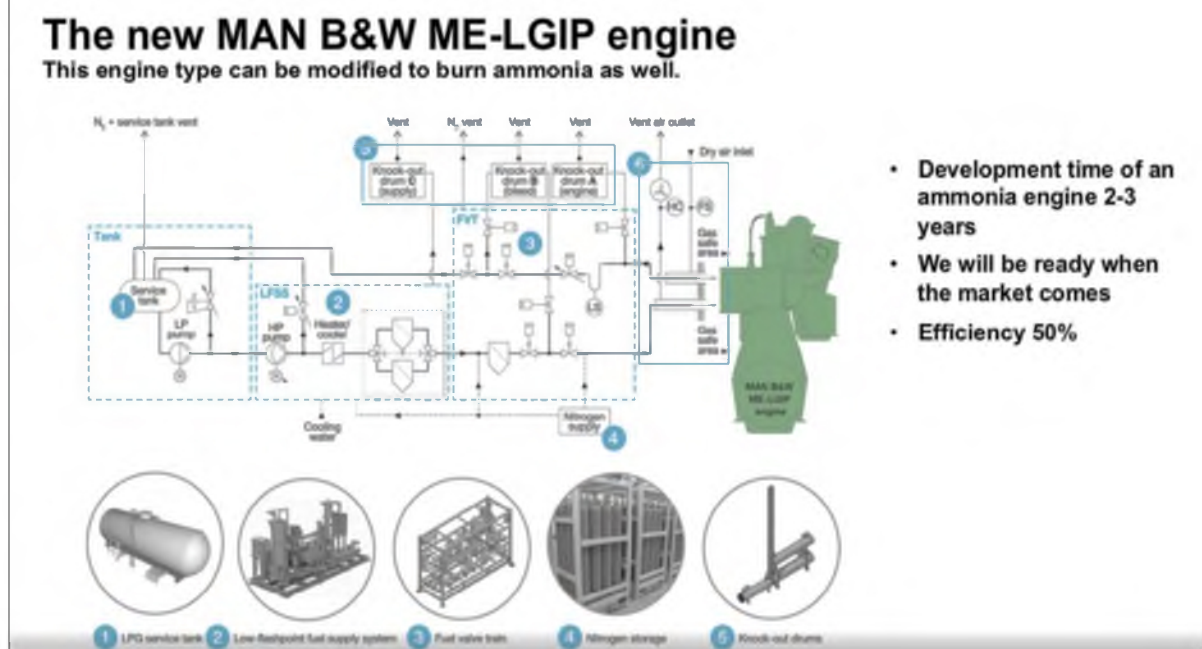


Рисунок 5 – Схема топливной системы B&W

Система инертных газов

Использование Аммиака снижает выбросы CO₂. Это означает, что углекислый газ не будет производиться в достаточном количестве для заполнения грузовых танков. Но при этом мы можем использовать азот, который является продуктом горения NO₃, но его необходимо будет отделить от воды, при помощи осушителя [13, 14, 15, 16].

Вывод: что для этого можно сделать

Выводы:

Аммиак весьма перспективен, как альтернативный вид топлива. К его плюсам можно отнести экологичность из-за снижения выбросов NO_x и полного отсутствия выбросов SO_x и CO₂.

Переход на него возможен при помощи трёх вышеописанных методов, 2 из которых можно применить на старых судах, модернизировав их энергетические установки. Это позволит далее их использовать, не списывая их из-за грядущих ужесточений требований по выбросам CO₂.

Аммиак повышает КПД двигателя из-за возможности увеличения степени сжатия, из-за низкого октанового числа.

Аммиак дешевле в сравнении с современными топливами, применимыми используемыми на судах в настоящее время.

Литература

1. Документ SCF "Speed/consumption norms"
2. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015
3. Мировой индекс цен судового топлива 2021
4. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые ДВС. Том 1, 2-е издание. – М.: Моркнига, 2010. – 260 с.
5. Отчет о НИР по теме VI/810. М., МГАВТ, 1997. Переоборудование энергоустановки речных теплоходов городских линий Московского региона (на примере теплохода проекта Р-51 "Москва") для работы на сжатом природном газе.
6. Информационный портал «Студизба» Курс лекций "Автомобильные двигатели".
7. Trevor Braun 2019 – «MAN Energy Solutions: an ammonia engine for the maritime sector» .
8. Modina, M. A., Kheker, E. v., Voskanian, A. A., Pismenskaia, Y. v., Epikhin, A. I., & Shkoda, V. v. (2021). Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 867(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012072>
9. Modina, M. A., Kheker, E. v., Epikhin, A. I., Voskanyan, A. A., Shkoda, V. v., & Pismenskaya, Y. v. (2021). Ways to reduce harmful emissions

- from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 867(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012104>
10. Modern requirements in the field of air pollution with sulfur oxides from ships / M. A. Modina, E. V. Heckert, A. I. Epikhin [et al.] // Operation of marine transport. – 2021. – № 3(100). – Pp. 88-91 – DOI 10.34046/aumsuomt100/12.
 11. Modern requirements in the field of air pollution with sulfur oxides from ships / M. A. Modina, E. V. Heckert, A. I. Epikhin [et al.] // Operation of marine transport. – 2021. – № 3(100). – Pp. 88-91 – DOI 10.34046/aumsuomt100/12.
 12. Энговатова В.В., Дмитренко Е.В., Шкода В.В., Солонникова Н.В., Модина М.А. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда работников промышленных предприятий. Часть 2. Учебное пособие / Краснодар, 2020.
 13. Студеникин Д.Е., Бован С.Д., Хекерт Е.В., Модина М.А. Использование нейронных сетей для организации визуального наблюдения// Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-3 (46).
 14. Современные требования в области загрязнения воздушной среды оксидами серы с судов / М. А. Модина, Е. В. Хекерт, А. И. Епихин [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 88-91. – DOI 10.34046/aumsuomt100/12.
 15. Оценка взрывоопасности зерновой пыли при проведении перегрузочных работ методами лазерного зондирования / И. А. Сарычев, Е. В. Хекерт, П. В. Чартий, В. Г. Шеманин // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте - 2020: труды XXVIII Международной конференции, Новороссийск, 07–12 сентября 2020 года. – Новороссийск: Пензенский государственный университет, 2020. – С. 266-270.
 16. Оценка взрывоопасности зерновой пыли при проведении перегрузочных работ методами лазерного зондирования / И. А. Сарычев, Е. В. Хекерт, П. В. Чартий, В. Г. Шеманин // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте - ный университет, 2020. – С. 266-270.
 17. Новороссийская бора и аварийные ситуации с судами во время ее действия / Л. Б. Астреина, С. И. Кондратьев, Н. А. Штырхунова, М. М. Мурасин // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 60-67. – DOI 10.34046/aumsuomt100/7.

References

1. Dokument SCF "Speed/consumption norms"
2. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015
3. Mirovoj indeks cen sudovogo topliva 2021
4. Voznickij I.V., Punda A.S. Sudovye DVS. Tom 1, 2-e izdanie. – М.: Morkniga, 2010. – 260 s.

5. Otchet o NIR po teme VI/810. M., MGAVT, 1997. Pereoborudovanie energoustanovki rechnyh teplohodov gorodskih linij Moskovskogo regiona (na primere teplohoda proekta R-51 "Moskva") dlya raboty na szhatom prirodnom gaze.
6. Informacionnyj portal «Studizba» Kurs lekcij "Avtomobil'nye dvigateli".
7. Trevor Braun 2019 – «MAN Energy Solutions: an ammonia engine for the maritime sector» .
8. Modina, M. A., Khekert, E. v., Voskanyan, A. A., Pismenskaia, Y. v., Epikhin, A. I., & Shkoda, V. v. (2021). Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 867(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012072>
9. Modina, M. A., Khekert, E. v., Epikhin, A. I., Voskanyan, A. A., Shkoda, V. v., & Pismenskaya, Y. v. (2021). Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 867(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012104>
10. Modern requirements in the field of air pollution with sulfur oxides from ships / M. A. Modina, E. V. Heckert, A. I. Epikhin [et al.] // Operation of marine transport. – 2021. – № 3(100). – Pp. 88-91 – DOI 10.34046/aumsuomt100/12.
11. Engovatova V.V., Dmitrenko E.V., SHkoda V.V., Solomnikova N.V., Modina M.A. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i ohrana truda rabotnikov promyshlennykh predpriyatij. CHast' 2. Uchebnoe posobie / Krasnodar, 2020.
12. Studenikin D.E., Bovan S.D., Hekert E.V., Modina M.A. Ispol'zovanie nejronnykh setej dlya organizacii vizual'nogo nablyudeniya// Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-3 (46).
13. Sovremennye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной sredy oksidami sery s sudov / M. A. Modina, E. V. Hekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91. – DOI 10.34046/aumsuomt100/12.
14. Ocenka vzryvoopasnosti zernovoj pyli pri provedenii peregruzochnyh rabot metodami lazernogo zondirovaniya / I. A. Sarychev, E. V. Hekert, P. V. CHartij, V. G. SHemanin // Lazerno-informacionnye tekhnologii v medicine, biologii, geokologii i na transporte - 2020 : trudy XXVIII Mezhdunarodnoj konferencii, Novorossijsk, 07–12 sentyabrya 2020 goda. – Novorossijsk: Penzenskij gosudarstvennyj universitet, 2020. – S. 266-270.
15. Ocenka vzryvoopasnosti zernovoj pyli pri provedenii peregruzochnyh rabot metodami lazernogo zondirovaniya / I. A. Sarychev, E. V. Hekert, P. V. CHartij, V. G. SHemanin // Lazerno-informacionnye tekhnologii v medicine, biologii, geokologii i na transporte - 2020 : trudy XXVIII Mezhdunarodnoj konferencii, Novorossijsk, 07–12 sentyabrya 2020 goda. – Novorossijsk: Penzenskij gosudarstvennyj universitet, 2020. – S. 266-270.
16. Novorossijskaya bora i avarijnye situacii s sudami vo vremya ee dejstviya / L. B. Astreina, S. I. Kondrat'ev, N. A. SHtyrhunova, M. M. Murasin // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 60-67. – DOI 10.34046/aumsuomt100/7.

УДК: 534.611.

DOI: 10.34046/aumsuomt102/28

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОМОЧНОГО ШУМА ВИНТОВ

М.Е. Бондаренко, PhD, руководитель группы (Великобритания)

И.П. Бойчук, кандидат технических наук

В статье представлено численное моделирование кромочного шума, вызываемого воздействием турбулентности пограничного слоя на лопатке винта с ее задней кромкой. Предсказание шума выполняется при помощи полуаналитической модели широкополосного шума, основанной на модели Амита. Спектр поверхностного давления вычисляется при помощи полуэмпирических моделей. Представленная модель хорошо отражает тенденцию кривой звукового давления на высоких и низких частотах, а также положение максимума давления. Модель чувствительна к выбору модели частотного спектра поверхностного давления.

Ключевые слова: спектр турбулентного давления, кромочный шум.

NUMERICAL SIMULATION OF THE ROTOR TRAILING EDGE NOISE

M. Bondarenko, I. Boychuk

The paper presents numerical simulation of trailing edge noise. This noise is due to the interaction of turbulence boundary layer on rotor blade with its trailing edge. Noise prediction is performed using a semi-analytical broadband noise model based on the Amiet model. Modeling of surface pressure caused by a turbulent boundary layer is performed using various semi-empirical models. The developed model well reflects the