

ВОДОРОД — ПЕРСПЕКТИВНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (материалы конгресса CIMAC-2019)

Исследовательский проект HyMethShip (Hydrogen-Methanol Ship Propulsion Using On-board Pre-combustion Carbon Capture), финансируемый из фонда программы инноваций Евросоюза Horizon 2020 реализуется для снижения уровня выбросов судовых двигателей с одновременным повышением их КПД. При этом должно быть обеспечено снижение выбросов CO₂ не менее чем на 97 %, практически исключены выбросы SO_x и PM, выбросы NO_x снижены как минимум на 80 % по сравнению с нормой по IMO Tier III. Энергетический КПД системы должен быть, как минимум, на 45 % выше, чем у лучшей из существующих на сегодняшний день технологий. Инновационная технология HyMethShip включает мембранный реактор, систему улавливания CO₂, емкости для хранения CO₂ и двигатель внутреннего сгорания, работающий на метаноле или на водороде, получаемом из метанола. В реализации ходе настоящего проекта планируется усовершенствовать данную систему, объединив ее с соответствующими системами судна. Система будет создана и испытана в составе демонстрационной установки в диапазоне мощностей от 1 до 2 МВт. Работы по проекту, стартовавшему в 2018 г., планируется завершить в течение 3 лет. Весь проект разбит на 11 рабочих пакетов, охватывающих собственно двигатель, систему улавливания CO₂ (CCS), а также всестороннюю оценку технологии — с точки зрения безопасности, энергоэффективности, экологии и системной интеграции. В консорциум разработчиков вошли 13 участников, в числе которых судоходная компания, обслуживающая международные линии, одна из крупнейших в мире верфей, классификационное общество, а также ряд исследовательских организаций, университетов и производителей оборудования. В настоящем докладе описана структура проекта и приведены предварительные результаты работы.

Предметом второго доклада этого обзора являются преимущества водородного топлива, связанные с ним проблемы и опыт, накопленный в данной области фирмой «Jenbacher». Одним из преимуществ газовых двигателей является возможность использования самых различных видов топлив, включая природный газ, разнообразные синтетические газообразные топлива, производимые из низкокалорийных газов, а также газы с высоким содержанием водорода. К последней группе относятся газы, образующиеся при различных металлургических и химических процессах. Газовые двигатели «Jenbacher», используемые для привода генераторов средней мощности, давно доказали способность надежно работать на топливах с высоким содержанием водорода. Объемное содержание водорода в коксовых газах, как и газах, являющихся побочными продуктами химических процессов, может достигать 70 %. Они используются в качестве топлива газовых двигателей самого различного назначения, суммарная наработка которых превышает миллион моточасов. До 50 % (об.) возобновляемого водорода может содержаться в отходящих газах установок газификации древесины. Продуктом электролиза воды, является 100 %-ый очищенный водород, который считается безуглеродным или «зеленым» водородом. Одной из главных целей производства «зеленого» водорода является добавление его в систему распределения природного газа, поскольку эта система представляет собой огромное хранилище энергии, необходимое для компенсации сезонных колебаний производительности других источников возобновляемой энергии, а именно, ветрогенераторов и солнечных батарей. При смешивании водорода с природным газом его содержание может колебаться в очень широких пределах, что не является препятствием для работы газового двигателя

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

ПРОЕКТ HYMETHSHIP: ИННОВАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ФЛОТА

*Jan Zelenka, Nicole Wermuth, Marcel Lackner, LEC GmbH
Andreas Wimmer, LEC GmbH / Graz University of Technology
Karin Andersson, Chalmers University of Technology
Heiner Veelken, Colibri bv
Paul Moeyaert, Exmar Marine NV
Benjamin Jager, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies
and Systems IKTS
Michael Url, INNIO
Michael Lang, Graz University of Technology
Matthias Huschenbett, Hoerbiger Wien GmbH
Reddy Devalapalli, Lloyd's Register EMEA IPS
Daniel Sahnén, Meyer Werft GmbH & Co. KG
Jorg Grutzner, MUW Screentec GmbH
Christian Mair, SE.S - Ship Emission Solutions
Joanne Ellis, SSPA Sweden AB*

Введение

Для трансокеанских перевозок характерна максимальная удельная энергоэффективность (выброс CO₂ в расчете на тонно-километр), поэтому в грузообороте международной торговли они занимают главное место. Большинство

морских путей проходит в прибрежных зонах, вблизи густонаселенных территорий. Выбросы окислов серы (SO_x), окислов азота (NO_x) и частиц (PM) от морских судов являются существенным фактором, негативно влияющим на здоровье людей и экологическую обстановку. Для наземного транспорта существуют нормативы предельно допустимых выбросов. Что касается морского транспорта, то подобные нормативы законодательно установлены значительно позже, к тому же они являются менее жесткими.

Для зон контролируемых выбросов серы (SE-CA) Северного и Балтийского морей, а также Северной Америки и Карибского бассейна, величина предельно допустимого содержания серы в морских топливах составляет 0,1 % (по сравнению с 0,001 % для сухопутного транспорта) [1]. Нормативы выбросов окислов азота (NO_x) для вновь строящихся судов ужесточаются поэтапно (три уровня), в зависимости от характеристик двигателя. В настоящее время в зонах контроля выбросов действуют нормы IMO Tier III. Согласно

решению ИМО (ноябрь 2016 г.), к числу зон контролируемых выбросов NO_x (NECA) с 2021 г. будут отнесены Северное и Балтийское моря.

ИМО как организация, ответственная за регулирование в области воздействия выбросов от судов на климат, разработала программу контроля индекса энергетической эффективности (EEDI — Energy Efficiency Design Index), вступившую в силу в 2016 г. По мнению ЕС, программа EEDI (согласно отчету ИМО [2]) должна быть адаптирована к уже построенным судам.

Согласно правилам ЕС MRV (Monitoring, Reporting, Verification) с 2018 г. судовладельцы обязаны вести мониторинг выбросов от своих судов и сообщать ИМО о результатах измерений при каждом заходе судна в любой из портов Европы, а также представлять ИМО ежегодный отчет. Также ИМО утвердила процедуру международной отчетности.

Минеральные топлива, используемые на судах, вносят весьма заметный вклад в глобальное загрязнение окружающей среды. Между тем, существуют альтернативные топлива, которые могут прийти им на смену.

➤ Все шире используется сжиженный природный газ (LNG), при сгорании которого выбросы NO_x и PM значительно меньше, а выбросы SO₂ практически отсутствуют. В то же время роль LNG в снижении выбросов парниковых газов (GHG) незначительна. Согласно данным источников [3–6], потенциальное снижение выбросов GHG при использовании LNG по сравнению с существующими минеральными топливами не превышает 30 %.

➤ На судовых двигателях проводились испытания биотоплив, в том числе биодизеля и растительных масел. Испытания подтвердили, что их использование может значительно снизить выбросы GHG. Однако этот вид топлив связан с определенными проблемами, а именно, с ограниченным объемом поставок и конкуренцией с производителями продуктов питания.

➤ Еще одним видом топлива, способным снизить вредные выбросы судовых двигателей (SO₂, NO_x, PM), является метанол, получаемый из природного газа. Он может существенно снизить суммарные выбросы GHG в течение срока службы двигателя. Можно также получать метанол из биомассы или из смеси водорода с углекислым газом, используя для этого электроэнергию ветрогенераторов или солнечных батарей [8].

➤ Метанол, получаемый из возобновляемых продуктов — водорода и углекислого газа, — именуемый далее e-метанолом, может стать реальной альтернативой традиционным топливам, поскольку имеет высокий потенциал снижения выбросов GHG, не нанося при этом

ущерба поставщикам продуктов питания и кормов.

➤ Водород, производимый с помощью источников возобновляемой энергии, является топливом, реально обеспечивающим нулевые выбросы GHG. Однако на пути более широкого использования водорода в качестве топлива для судовых двигателей имеется серьезное препятствие — особые требования к условиям безопасности и хранения топлива.

«Белая книга ЕС по транспортным средствам», изданная в 2011 г., устанавливает в качестве одного из целевых показателей на 2050 г. снижение выбросов CO₂ от морских судов по сравнению с 2005 г. на 40 % (если возможно — на 50 %) [9]. В апреле 2018 г. было принято решение ИМО о снижении к 2050 г. выбросов GHG не менее чем на 50 % по сравнению с 2008 г. [10]. Поскольку на морской транспорт приходится значительная доля грузоперевозок в глобальном масштабе, увеличение этой доли может привести к снижению общего объема вредных выбросов при условии, что экологические требования к морским перевозкам будут ужесточены. Снижение вредных выбросов от судов (SO_x, NO_x, частицы, сажа/ черный углерод, углеводороды и т. п.) частично обеспечивается действующими нормативами, однако для реального внедрения последних не обойтись без использования новых топлив и инновационных технологий. В документе Еврокомиссии 2013 г. «Стратегия использования альтернативных топлив» говорится о том, что «альтернативные топлива, обеспечивающие низкий выброс CO₂, являются необходимой частью стратегии декарбонизации транспорта» [11]. Директивой от 2014 г., определяющей необходимую для альтернативных топлив инфраструктуру, ставятся также цели сокращения зависимости от минерального топлива и организации инфраструктуры для бункеровки соответствующих транспортных средств [12].

2. Задачи и цели

Проект HyMethShip (Hydrogen-Methanol Ship Propulsion System Using On-board Precombustion Carbon Capture), что расшифровывается как «пропульсивная система судна, работающая на полученном из метанола водороде, с функцией улавливания частиц углерода», ставит своей целью радикальное снижение вредных выбросов с одновременным повышением энергоэффективности морского транспорта. Система будет создана и испытана в составе стационарной демонстрационной установки с двигателем мощностью порядка 2 МВт.

Система должна обеспечить снижение выбросов CO₂ более чем на 97 % и практически свести к нулю выбросы SO_x и PM. Выбросы

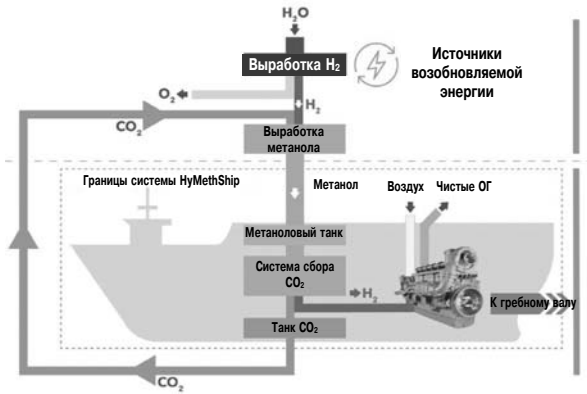


Рис. 1. Концепция HyMethShip

NO_x будут снижены по сравнению с нормами IMO Tier III не менее чем на 80 %. Энергетический КПД системы должен быть, как минимум, на 45 % выше, чем у лучшей из существующих на сегодняшний день технологий (возобновляемый метанол + традиционная система очистки ОГ от частиц углерода).

Инновационная система HyMethShip включает мембранный реактор, систему улавливания CO₂, систему хранения CO₂ и работающий на метаноле или водороде двигатель внутреннего сгорания (рис. 1). Предлагаемое решение состоит в преобразовании метанола в водород, используемый в качестве топлива обычного двигателя внутреннего сгорания, который адаптирован к работе на разных видах топлива, в том числе оптимизирован именно под водород.

Система HyMethShip обеспечивает существенное снижение вредных выбросов. Тем самым устраняется необходимость в сложных устройствах очистки ОГ, без которых при использовании традиционных топлив заданная величина снижения выбросов SO_x, NO_x и PM была бы недостижима. Радикальное снижение выбросов CO₂ достигается за счет использования в качестве энергоносителя возобновляемого метанола, а также за счет улавливания и хранения на судне CO₂, не попадающего в цилиндры двигателя. Бункеровка возобновляемым метанолом, получаемым из собранного CO₂ на судне, является идеальным решением, поскольку при этом образуется замкнутый контур обращения CO₂ (см. рис. 1).

Проект HyMethShip включает раздел «оценка рисков и безопасности», цель которого состоит в том, чтобы убедиться, что по этому показателю система, как минимум, не уступает традиционным пропульсивным системам на дизельном топливе. При этом будут учитываться существующие и разрабатываемые правила и нормативы для топлив с низкой температурой вспышки. Авторы рассчитывают, что этот проект будет способствовать дальнейшему развитию нормативной базы в данной области.

Будет также выполнена оценка экономической эффективности системы для различных типов судов и эксплуатационных условий. Таким образом, предполагается, что для судов дальнего плавания концепция HyMethShip представляется оптимальным и экономически обоснованным решением, позволяющим достичь заданного уровня сокращения выбросов CO₂.

Эффективность HyMethShip в сравнении с другими методами снижения выбросов GHG представлена на рис. 2. Ее преимущество обеспечивается следующими факторами:

- Использование LNG в качестве основного топлива дает сокращение выбросов GHG порядка 15 %, с учетом имеющей место утечки метана.
- Использование LNG из возобновляемых источников (синтетический природный газ), в состав которых входят обычные системы улавливания CO₂ (CCS), дает сокращение выбросов GHG порядка 30 %.
- Лучшая из известных на сегодняшний день технологий, основанная на использовании метанола в качестве основного топлива в сочетании с обычными системами очистки ОГ, может дать сокращение выбросов GHG до 50 %.
- Система HyMethShip, работающая на метаноле из возобновляемых источников, в сочетании с системами улавливания CO₂ до начала сгорания, обеспечивает радикальное сокращение выбросов GHG — до 97 %.
- Загруженный на судно метанол преобразуется в водород с использованием энергии тепловых потерь двигателя.

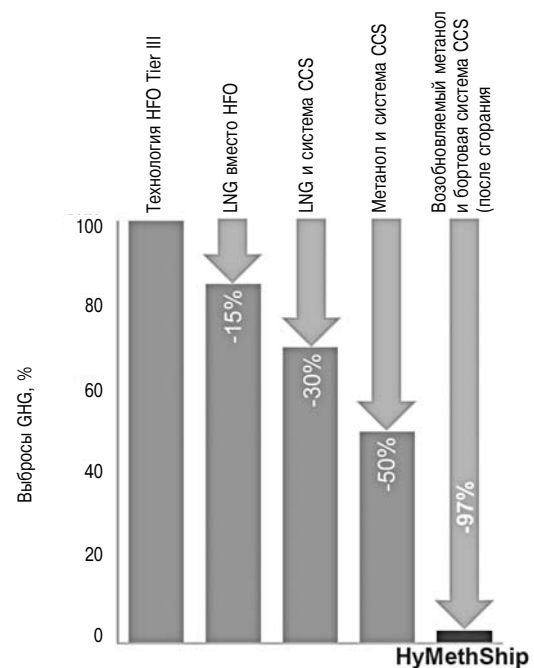


Рис. 2. Эффективность снижения выбросов GHG в системе HyMethShip

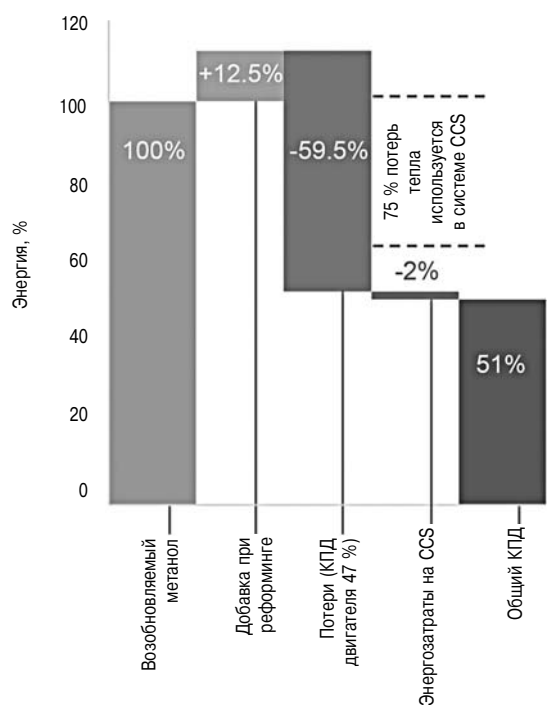


Рис. 3. КПД системы HyMethShip

➤ Водород образуется также в процессе реформинга, что дает дополнительное приращение энергии примерно на 12 %. Эта энергия образуется за счет термической диссоциации воды при высоких температурах внутри мембранного реформера.

➤ В двигателе внутреннего сгорания с КПД, равным 47 %, тепловые потери достигают 60 % от энергии сгорания водорода. Порядка 75 % энергии тепловых потерь идет на повышение температуры процесса до уровня, необходимого для работы системы улавливания CO₂.

➤ Два процента механической энергии двигателя идут на привод генератора, обеспечивающего работу насосов и вспомогательных устройств системы улавливания CO₂.

Общий КПД системы HyMethShip может достигать 51 %. Более подробно распределение энергии показано на рис. 3.

В ходе реализации проекта HyMethShip — принципиально новая технология будет разработана на инженерном уровне, ее эффективность подтверждена результатами испытаний рабочего макета (демонстрационной установки) мощностью до 2 МВт, что станет доказательством ее технической осуществимости. Срок выполнения проекта составляет 36 месяцев, что недостаточно для монтажа системы на судне и ее полной интеграции, однако при проектировании компонентов системы будут учтены все необходимые требования, связанные со спецификой судовой силовой установки. По результатам испытания макета будет дана экономическая и экологическая оценка

концепция HyMethShip, на основании которой будут приниматься решения о ее пригодности к использованию на морских судах в ближайшем будущем.

3. Организация проекта

В Консорциум HyMethShip входят 13 организаций из 6 стран — членов ЕС (рис. 4). Внутри консорциума партнеры представляют две основные группы, образующие стоимостную цепочку данной отрасли, т. е. судостроение и судоходство. Они охватывают все виды работ по проектированию и производству всех компонентов пропульсивной системы HyMethShip, включая также консультирование партнеров по вопросам регламентации, особенно в части соответствия требованиям классификационных обществ.

Все работы по управлению проектом собраны в рабочем пакете WP1. Данный рабочий пакет (WP) включает все аспекты организации работ, как внутренних, так и внешних.

В ходе проекта должны быть разработаны три компонента новой технологии, соответственно в составе рабочих пакетов WP2, WP3 и WP4, а именно: улавливание и сбор CO₂, мембранный реформер для метанола и процесс сгорания H₂. Руководство этими рабочими пакетами осуществляется соответствующими специалистами при участии исполнителей. Рабочий пакет WP5 включает в себя проектирование судовых емкостей для хранения CO₂. Рабочий пакет WP5 (конструкция судна) определяет общие и специфические требования, связанные с использованием системы в судовых условиях, и описывает проектные решения для судов различного назначения, например, грузовых и пассажирских. Для обоих типов судов будут выполнены два целевых исследования.

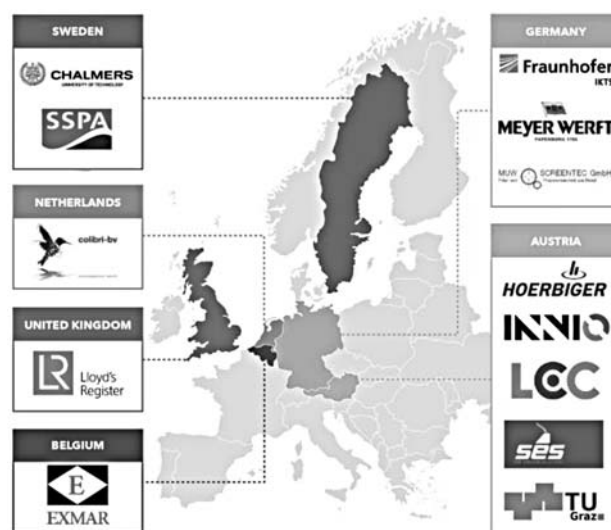


Рис. 4. Страны, где работают участники консорциума

Рабочие пакеты WP6, 7 и 8 включают соответственно анализ безопасности, экономической и экологической эффективности. Специалисты по безопасности, экономике и экологии будут участвовать в технических рабочих пакетах с тем, чтобы были учтены все аспекты технологии проекта.

WP10 — действующий макет (демонстрационный образец) системы в комплекте с полномасштабной пропульсивной установкой.

Все мероприятия по распространению опыта и знаний, полученных в ходе выполнения проекта, отнесены к рабочему пакету WP11. Эти мероприятия имеют целью представление результатов проекта как целевой аудитории, так и широкой общественности для целей маркетинга революционной пропульсивной системы практически с нулевыми выбросами.

Кроме того, два университета привлечены к работе над отдельными инженерными проблемами и вопросами устойчивого развития. Каждому из партнеров отведено определенное место в проекте, при этом все они обладают компетенциями, необходимыми для успешного завершения проекта.

4. Структура работы

Все работы по проекту HyMethShip разделены на одиннадцать рабочих пакетов (WP), каждый из которых делится на определенные задачи, включающие ОК и НИР, управление проектом и мероприятия по распространению его результатов. Структура рабочих пакетов проекта HyMethShip показана на рис. 5.

5. Описание работы

5.1. WP2: Система улавливания диоксида углерода

Основой пропульсивной системы HyMethShip является бортовая система улавливания газообразного CO₂ до камеры сгорания (CCS) (рис. 6).



Рис. 5. Структура проекта HyMethShip и связи между рабочими пакетами

Процесс улавливания газообразного CO₂ заключается в том, что из системы бортовых баков берется жидкий метанол, а на его место закачивается сжиженная двуокись углерода CO₂. При этом выделяется газообразный водород высокого давления, который поступает в двигатель внутреннего сгорания в качестве топлива. Одновременно тепло, выделяемое в процесс сгорания, возвращается в систему. Система CCS включает следующие компоненты:

➤ Водяные tanks. Вода из них поступает в смесительную камеру и участвует в реакции. Если образуется избыток воды, она возвращается в смесительную камеру. Избыток воды может возникнуть, если вода, участвующая в реакции, пройдет через мембрану.

➤ Системы подпитки, испарения и перегрева потока жидкости в мембранном реформере. По описанной ниже обратной магистрали конденсат и остаточный газ возвращаются в реформер, поэтому смесь перед мембраной состоит из метанола, воды и водорода, соотношение которых зависит от характеристик процесса сепарации в мембранном реформере. Поскольку процесс сепарации сильно зависит от парциальных давлений и химического состава компонентов реакции, можно ожидать значительного взаимовлияния процессов в мембранном реформере и состава компонентов потока перед мембраной, регулируемого системой подпитки. К тому же последнее обстоятельство существенно влияет на испаряемость реагентов.

➤ Система охлаждения и сепарации потока после мембраны. Этот поток состоит в основном из водорода и некоторого (меняющегося) количества воды.

➤ Несколько систем регенерации тепла и конденсации потока ретентата, выходящего из мембранного реформера. Для извлечения CO₂ из потока ретентата из мембранного реформера

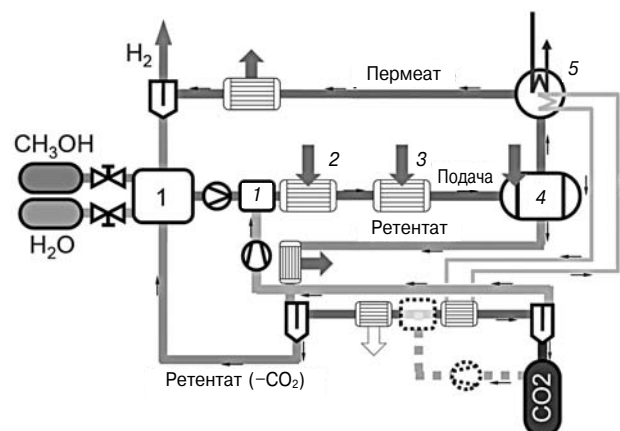


Рис. 6. Предварительная схема CCS для HyMethShip: 1 — смеситель; 2 — экономайзер; 3 — испаритель/перегреватель; 4 — мембранный реактор; 5 — холодильник

сначала конденсируется поток воды, содержащий метанол, затем конденсат возвращается обратно в реактор. Далее остаточный реакторный газ охлаждается до температуры $-45...-55$ °С, при этом частично конденсируется содержащаяся в нем CO_2 . Затем остаточный реакторный газ возвращается в состав реагентов.

➤ Системы передачи тепла. Эти системы служат для передачи тепла отработавших газов двигателя в системы испарения и перегрева, а также в абсорбционный холодильник.

➤ Система передачи холода. Эта система служит для передачи холода из абсорбционного холодильника в систему конденсации потока после мембраны.

➤ При разработке системы улавливания газообразного CO_2 , о которой идет речь, предстоит решить две ключевые проблемы, а именно, добиться требуемой теплопередачи в мембранный реформер и обеспечить управление физико-химическими параметрами потоков реагентов, в частности, их химическим составом и соответствующими уровнями парциального давления.

5.2. WP3: Реформинг метанола

В мембранном реформере параллельно идут две фазы процесса: каталитический реформинг метанола и сепарация водорода с помощью мембраны. По мере смешивания метанола с подаваемым в реактор водяным паром, метанол в присутствии катализатора каталитического реформинга разлагается на водород и CO_2 . Одновременно происходит отбор водорода из камеры с помощью селективной угольной мембраны, устойчивой к агрессивной среде и экстремальным гидротермическим воздействиям, существующим в реакторе. В двигатель под высоким давлением поступает газ с большим содержанием водорода. Одновременно система CCS улавливает выделяющийся газообразный CO_2 и направляет его в сборный танк, откуда впоследствии CO_2 будет извлечен, сохранен на борту и на берегу реконвертирован обратно в метанол.

Тепло отработавших газов двигателя эффективно используется для испарения и нагрева реагентов — метанола и воды. Тем самым оно вовлекается в процесс реформинга, при этом управление теплопередачей позволяет регулировать температуру в реакторе. Так тепло отработавших газов двигателя превращается в полезную химическую энергию. В ходе каталитического реформинга с подогревом из одного моля метанола получают три моля водорода. Следовательно, энергетический выход согласно формуле суммирования CH_3OH (CH_4O) получается выше, чем в процессе прямого сжигания водорода, в котором участвуют только два моля «внутреннего» водорода (уравнения 1 и 2).



$$\Delta H_r = 49,2 \text{ кДж/моль} \quad (2)$$

Хотя технология производства мембран для каталитического реформинга метанола в достаточной мере отработана, следует отметить, что слабым местом данной концепции является необходимость использования палладия или его сплавов. Помимо высокой стоимости палладия, как и других драгметаллов, недостатком такого решения является высокий риск отравления катализатора мембраны воздействием CO или остаточной серы. К тому же палладиевая мембрана, по сравнению с угольными мембранами, предусмотренными настоящим проектом, обладает низкими показателями термической и механической прочности. В большинстве известных применений палладиевые мембраны выдерживают давление не более 2 МПа.

В предлагаемом решении драгметаллы не используются, а величина предельно допустимого давления составляет 5 МПа, поскольку керамическая подложка мембраны обеспечивает более высокую пропускную способность, а каталитическая вставка легче устанавливается благодаря меньшим размерам. К тому же водород подается в двигатель под давлением на 1–2 МПа и выше. Таким образом, рассматриваемая угольная мембрана по всем показателям будет превосходить лучшие мировые образцы.

На первом этапе, на основании целевых характеристик рабочего процесса и массового расхода водорода, будет разработана общая концепция с учетом заданной мощности и КПД двигателя. Чтобы избежать необходимости в дополнительном водородном компрессоре, давление перед мембраной должно поддерживаться на уровне 1–2 МПа. Перепад парциального давления на мембране должен быть таким, чтобы давление в потоке перед мембраной было в пределах 4–5 МПа. На данном этапе также будет разработана схема использования тепла отработавших газов. Поскольку существует принципиальная возможность подогрева потока реагента или пермеата перед поступлением в реформер, то предварительная оценка стехиометрии смеси, энтальпии реакции и необходимой минимальной температуры на выходе из реформера приводит к выводу о целесообразности использования схемы с теплообменником, встроенным в реформер. В качестве источника необходимого количества тепла могут быть использованы отработавшие газы двигателя или другой (дополнительный) теплоноситель.

Главная особенность угольной мембраны на керамической подложке — ее способность отделять водород от двуокиси углерода. Селективность

мембраны будет оцениваться по результатам измерения ее проницаемости и подбираться таким образом, чтобы обеспечить чистоту водорода на выходе не менее 90 %. Эффективность системы будет оцениваться по селективности мембраны и измеренным характеристикам катализатора, при этом будут рассчитаны количество мембран и масса катализатора, необходимые для конверсии как минимум 90 % метанола.

Предварительные испытания реформера проводятся на уменьшенной физической модели, состоящей из картриджей с мембраной и катализатором (рис. 7). На керамические подложки нанесено наружное мембранное покрытие, так что их дополнительная очистка паром снаружи не понадобится. В ходе экспериментов определяются оптимальные параметры процесса и алгоритм регулирования температуры. По результатам испытаний физической модели будут окончательно определены все параметры процесса реформинга, а также необходимое количество мембран и масса катализатора, спроектированы и изготовлены в натуральную величину корпусные детали реформера.

При этом особое внимание должно быть уделено уплотнению мембраны и удобству ее установки. В корпусе реформера должны быть элементы, формирующие направление потока, чтобы обеспечить его равномерность. Одновременно будет разрабатываться технология производства мембран, что позволит наладить их собственный выпуск в промышленных количествах. Законченный опытный образец мембранного реформера пройдет испытания на фирме LEC

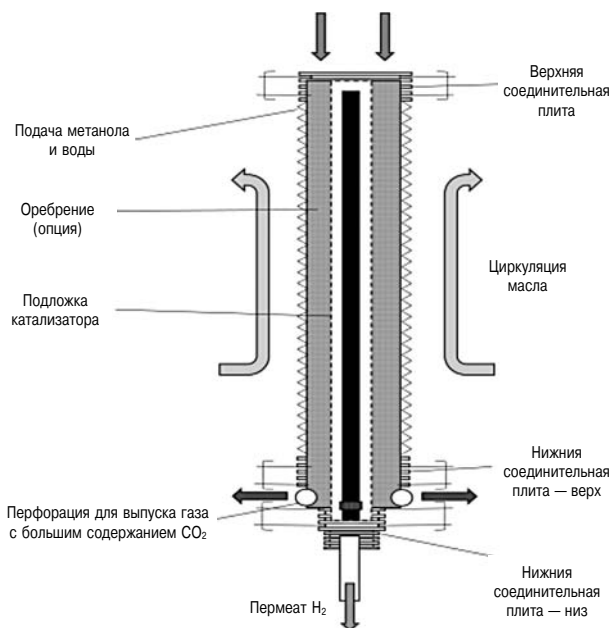


Рис. 7. Схема элемента мембранного реформера

GmbH и будет встроен в демонстрационную систему в качестве важнейшей ее части.

5.3. WP4: Двигатель H2 IC

В пропульсивной системе, построенной по принципу HyMethShip, будет использован двигатель внутреннего сгорания, который сможет работать на различных видах топлива, включая HFO, MDO, дизель и метанол. Это означает, что обычный дизельный или газовый двигатель может быть адаптирован для применения системы HyMethShip, получая при этом возможность работать на HFO, MDO, дизеле и метаноле. Основным источником энергии для двигателя будет водород из метанолового реформера, однако при этом сохранится возможность работы на обычном топливе в экстренных случаях или в режиме пуска/прогрева реформера и CCS.

Рассматриваются два возможных варианта организации подачи топлива в двигатель. В первом варианте водород непосредственно из реформера под давлением 1–2 МПа подается в камеры сгорания на такте сжатия. Прямой впрыск водорода повышает коэффициент наполнения цилиндров и снижает риск обратного удара с воспламенением газа во впускном ресивере, что характерно для двигателей с внешним смесеобразованием при впрыске газа с высоким содержанием водорода через окна в цилиндрах двигателей. Вместе с тем, широкий диапазон соотношения воздух–топливо при сгорании водорода увеличивает риск детонации водородно-воздушной смеси в горячих точках камеры сгорания. Для прямого впрыска водорода будет разработана технология топливоподачи на базе электромагнитных клапанов последнего поколения, используемых для впрыска природного газа, с учетом специальных требований к двигателю с системой HyMethShip (конфигурация и настройка электромагнитных клапанов, а также создание специальных покрытий). Согласно другому варианту подача водорода происходит через окна в цилиндрах, что может способствовать улучшению смесеобразования и расширить возможности для оптимизации параметров метанолового реформера и двигателя. В качестве прототипа может быть использована существующая система впрыска для газовых двигателей.

В современных судовых двухтопливных двигателях в качестве резервного варианта предусмотрена возможность работы в чисто дизельном режиме. Аналогичное решение может быть использовано и в HyMethShip. Воспламенение гомогенной водородно-воздушной смеси достигается за счет пилотного впрыска дизельного топлива в конце такта сжатия. В цилиндре современного двухтопливного двигателя обычно устанавливается две форсунки — для работы соответственно в

«газовом» и «дизельном» режимах. В нашем случае для экономии места в головке цилиндра предпочтительно использовать одну форсунку среднего давления с широким диапазоном дозирования. Такая форсунка должна обеспечить точное дозирование цикловой подачи дизельного топлива в диапазоне от 1 до 100 %.

Концепция NuMethShip допускает также другой вариант двухтопливного двигателя, в котором метанол играет роль запасного топлива. При этом свеча зажигания будет использоваться для воспламенения, как водорода, так и метанола. Последний вариант имеет преимущество, состоящее в снижении выбросов NO_x , SO_x и частиц. Кроме того можно будет сократить объем расходных емкостей, так как не потребуются бункеровка дизельного топлива. Недостатки этого варианта — снижение приемистости двигателя и тот факт, что перевод судового двигателя на метанол пока что рассматривается скорее как экзотика, и еще неизвестно, как отнесутся к этому судовладельцы и операторы. Выбор запасного топлива будет зависеть от мощности двигателя, типичных рабочих режимов и располагаемого места.

Помимо привода гребного вала и/или генераторов, двигатель должен обеспечить тепло для выработки водорода. Это тепло (отработавших газов или воды из системы охлаждения) будет использовано в процессе парового реформинга метанола и в абсорбционном холодильнике, что влечет за собой дополнительные требования к организации рабочего процесса. Стехиометрия смеси, степень сжатия и фазы впрыска должны быть подобраны таким образом, чтобы энтальпия отработавших газов была достаточной для работы CCS, а система турбонаддува, выпускные клапаны и выпускной тракт были защищены от перегрева.

Проектирование рабочего процесса выполняется с нульмерного моделирования сгорания и одномерного моделирования характеристик процесса с учетом имеющегося опыта работы двигателей большой мощности на водороде. Конфигурация двигателя, в том числе фазы работы клапанов, степень сжатия и геометрия камеры сгорания, должна быть оптимизирована таким образом, чтобы выполнялись проектные требования к полезной мощности, КПД и уровню вредных выбросов двигателя.

Принятая концепция рабочего процесса в сочетании с вновь разработанной технологией впрыска водорода будет испытана на одноцилиндровом отсеке двигателя. Такие параметры, как фазы впрыска, степень сжатия и фазы работы клапанов будут оптимизированы с учетом особенностей работы на водороде и выбранном запасном топливе. Высокоэффективная работа на водороде

позволит существенно снизить уровень вредных выбросов по сравнению с лучшими мировыми образцами дизелей, включая уровень утечек углеводородов (GHG). Выбросы NO_x могут быть минимизированы за счет «внутренних» мероприятий, например, обеднения смеси.

Последний этап проектирования рабочего процесса — перенос отработанной на отсеке технологии на развернутый многоцилиндровый двигатель (MCE), включая проверенную концепцию рабочего процесса и компоненты с характеристиками, соответствующими требованиям к многоцилиндровой машине, в том числе турбокомпрессор, системы топливоподачи и смесеобразования. Кроме того, система управления двигателем должна быть доработана таким образом, чтобы обеспечить работу двигателя на различных топливах и водороде.

5.4. WP5: Бортовое хранилище метанола/ CO_2

Метанол может храниться на судне в тех же танках, которые используются для хранения морского дизельного топлива. Однако, поскольку температура вспышки метанола ниже 60°C необходимо будет обеспечить соответствие требованиям документа IGF (International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels) («Кодекс безопасности для судов, использующих газы и другое топливо с низкой температурой воспламенения»). Кроме того, следует учитывать коррозионные свойства метанола. Необходимо также соблюдать следующие требования:

- обязательное наличие в танках защитного слоя из инертного газа;
- обязательное наличие перегородки между хранилищем и другими помещениями;
- обязательное наличие вентиляции в насосном отсеке;
- обязательное использование топливных магистралей с двойными стенками;
- обязательное наличие гальванической (катодной) защиты.

CO_2 может храниться в жидком виде (при температуре порядка -40°C и давлении порядка 1 МПа), как на танкерах, перевозящих CO_2 в качестве груза.

В ходе настоящего проекта будет разработана концепция системы бортовых хранилищ метанола и CO_2 с соответствующим технико-экономическим обоснованием. В состав системы войдут танки, оборудование управления и маршрутизации потоков (насосы, клапаны, трубопроводы и т. п.) мониторинга и безопасности (датчики, сигнализация и т. п.). Также будут исследованы все аспекты возможного взаимодействия/реакции между CO_2 и метанолом во всем диапазоне рабочих условий (температура -55 до 30°C и

давление от 0,1 до 1 МПа). Будут определены оптимальные условия хранения и учтены все критически важные технологические процедуры и мероприятия, в том числе:

- бункеровка метанола во время выгрузки CO₂;
- транспортировка (закачка в реформер) метанола;
- транспортировка CO₂ (для охлаждения и сжижения);
- закачка CO₂ (подпитка, охлаждение танка, заполнение);
- предотвращение гальванической коррозии.

В целях снижения затрат и экономии судового пространства будет рассмотрена возможность использования одних и тех же танков для метанола и сжиженного CO₂. Этой же цели служит модульный принцип построения системы с максимальным использованием коммерчески доступных на сегодняшний день компонентов, а также сравнение принципов совместного и раздельного (в разных отсеках) хранения реагентов.

Тесты стационарного действующего (демонстрационного) макета будут включать проверку функциональности разработанных технологий сжижения и временного хранения собранного CO₂.

5.5. WP6: Мероприятия по обеспечению безопасности на судне/на берегу

Практически любая инновационная и достаточно сложная технология влечет за собой новые угрозы и риски, которые не должны приводить к нарушению безопасности. В проект HyMethShip включены разделы, посвященные четкой идентификации опасностей, оценке и управлению рисками, с целью создания принципиально безопасных систем. Должны быть предусмотрены надежные и эффективные мероприятия по ослаблению последствий проектных аварий.

В этой области действует множество стандартов и нормативов как национальных, так и международных организаций, в том числе Американского Общества Инженеров-Механиков (ASME), Ассоциацией Фирм по Работе со Сжатыми Газами (CGA) и Международной Организации по Стандартизации (ISO). В то же время применение альтернативных энергоносителей для судовых двигателей является делом относительно новым, и специальных стандартов для них или не существует, как в случае с водородом, или требования к ним отданы на усмотрение ИМО, как в случае с метанолом. Некоторые релевантные указания можно заимствовать из кодекса IGC, который устанавливает правила морской перевозки газов, в том числе и CO₂. Требования к перевозке сжиженного водорода в грузовых танках в 2016 г. обсуждались подкомитетом ИМО, который принял промежуточную резолюцию по данному вопросу. Кроме того, некоторые сведения

можно почерпнуть из документа IGF «International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels», который пересматривается с учетом возможного использования метанолового топлива.

Согласно процедуре «идентификации опасностей» (HAZID) по ISO 31000:2009 и ISO 31010:2010 будут определены опасности, связанные с проектированием и применением технологии HyMethShip, с оценкой соответствующих рисков. Критерии оценки рисков будут основаны на «устоявшейся практике» основных промышленных отраслей, и должны быть согласованы с правительствами и другими надзорными органами, действующими в области безопасности и здравоохранения.

Для определения основных потенциальных опасностей, был проведен предварительный обзор HAZID на основе эскизного проекта системы HyMethShip. Вся система была разбита на узлы, и каждый ее компонент оценивался с точки зрения таких потенциальных опасностей, как механические повреждения, утечки, взаимное загрязнение потоков жидкостей, а также опасностей общего характера, возникающих в результате непредвиденных событий. Предложены способы снижения вероятности подобных рисков за счет изначально более безопасной конструкции. По результатам рабочего проекта будет составлен окончательный обзор HAZID.

После этого будет выполнено технико-экономическое обоснование предлагаемых технологий в части потенциальных опасностей и работоспособности (HAZOP) согласно МЭК 61882:2001. При этом будут определены опасности, связанные с работоспособностью предлагаемых систем при интеграции с существующими судовыми системами.

Кроме того необходим анализ нестыковок с существующими стандартами, действующими в области судостроения, и определен объем дальнейших работ, касающихся нормативной базы в части использования метанола, водорода и CO₂. В результате будет создана сводная библиотека стандартов по проекту и требованиям к подготовке плавсостава с учетом специфики получения водорода из метанола в судовых условиях, улавливания CO₂ и обращения с водородом.

5.6. WP7 & 8: Экономическая и экологическая оценка

Оценка жизненного цикла (LCA — life cycle assessment) и оценка затрат в течение жизненного цикла (LCC — life cycle costing) являются признанными методами оценки соответственно экобаланса и экономической эффективности проекта. Традиционно LCA рассматривает только

вопросы воздействия проекта на окружающую среду, не касаясь экономических или социальных аспектов.

Что касается проекта HyMethShip, то LCA будет дополнена анализом стоимости жизненного цикла, в соответствии с современными тенденциями оценки устойчивого развития жизненного цикла, включающей также экономические или социальные аспекты.

В зависимости от определения жизненного цикла, концепция сбора данных в течение всего жизненного цикла, касающихся всех затрат, вредных выбросов, использования энергии и сырья, может включать:

- проектирование и изготовление судна: капитальные затраты (включая оборудование, трубопроводы, системы безопасности), а также все связанные с ними данные по затратам для снижения вредных выбросов, использованию энергии и сырья;

- эксплуатация судна (за исключением использования топлива): эксплуатационные расходы, стоимость запчастей, техобслуживания, использования энергии и сырья;

- распределение и производство топлива: затраты на топливо, платежи за вредные выбросы, использование энергии и сырья;

- стоимость списания судна: расходы, связанные со списанием судна, в том числе на вывод из эксплуатации, утилизацию, вредные выбросы, использование энергии и сырья.

В определении цели и области применения LCC/LCA описывается система, о которой идет речь, и причина ее оценки. Цель может включать, например, предполагаемое назначение системы и причины ее оценки, а также географические границы применимости и горизонт прогнозирования. Могут быть определены категории вредных выбросов и воздействия на состояние окружающей среды, представляющие наибольший интерес. Предварительная область применимости HyMethShip будет определена, главным образом, исходя из жизненного цикла топлива. Для сравнения будут также выбраны альтернативные технологии, граничные условия и функциональные единицы.

5.6.1. Экономическая оценка

Задачи LCC — оценить экономический эффект от применения системы HyMethShip для выбранного типа судна, на этапе проектирования и изготовления собрать данные, необходимые для минимизации стоимости жизненного цикла, и определить, какие категории судов и области их использования наиболее предпочтительны с точки зрения экономической эффективности. LCC включает все затраты на изделие или сервис в течение всего жизненного цикла.

Капитальные затраты (куда входит оборудование, трубопроводы, системы аварийной защиты и т. п.) и все связанные с ними расходы (доставка, монтаж, страховка и т. п.) будут рассчитаны участниками проекта или получены от заинтересованных сторон, не являющихся участниками проекта.

В число эксплуатационных расходов входят, в частности, стоимость топлива, запчастей, техобслуживания и подготовки плавсостава. Будет произведен сравнительный расчет расхода топлива для системы HyMethShip других современных пропульсивных систем с учетом вероятных режимов работы выбранного для проекта HyMethShip судна.

Все собранные данные необходимы для построения модели жизненного цикла, на основании которой будет оцениваться экономическая целесообразность концепции HyMethShip. Все затраты в течение жизненного цикла для различных вариантов будут сопоставляться по чистой приведенной стоимости (NPV — net present value). Модель будет использоваться в анализах чувствительности и сценариях минимизации стоимости жизненного цикла. При оценке затрат на топливо будут сравниваться различные варианты локализации его производства с учетом стоимости электроэнергии на производство метанола. Важные переменные параметры при оценке затрат на топливо — капитальные затраты на электролизер, тип электролизера, стоимость синтеза топлива, и т. п.

5.6.2. Экологическая оценка

Задача LCA — оценить все факторы, связанные с потенциальным ущербом для окружающей среды в течение всего жизненного цикла. Подобный глобальный подход — важнейший момент LCA, который исключает возможность смещать область ответственности с одной экологической проблемы на другую, с одной фазы жизненного цикла — на другую, и с одного региона — на другой. Задачи LCA — проверить экологический эффект от применения системы HyMethShip для выбранного типа судна, собрать на этапе проектирования и изготовления данные, необходимые для минимизации экологического ущерба за весь период жизненного цикла, и определить, какие категории судов и область их применения наиболее подходят для HyMethShip с точки зрения экологии.

Оценка жизненного цикла будет проводиться в соответствии со стандартами ISO4040/44. При этом рассматриваются все фазы жизненного цикла, но основное внимание уделяется периоду эксплуатации. Оценка КПД и вредных выбросов проводится на основании результатов настоящей разработки, анализа конструктивных решений

данного проекта в сравнении с другими типами судов и результатов испытаний прототипа. Предыдущие LCA судовых топлив показали важность охвата всего жизненного цикла для оценки экологических показателей при использовании того или иного топлива. Оценивается несколько возможных вариантов маршрутизации потоков e-метанола для выбора наиболее экономичного варианта. Выбросы от оборудования, связанного с производством и доставкой топлива, оцениваются на основании информации, полученной от производителей и дистрибьюторов топлив, а также из открытых литературных и научных источников. Все собранные данные будут использованы при построении модели жизненного цикла, на основании которой оценивается экологическая эффективность концепции HyMethShip.

При оценке экологического ущерба количественные значения выбросов того или иного химического элемента будут классифицироваться в соответствии с категориями наносимого ущерба. Например, выбросы парниковых газов входят в категорию индикаторов глобального потепления. Модель будет использоваться для анализа чувствительности и в сценариях минимизации экологического ущерба от HyMethShip на протяжении всего жизненного цикла.

5.7. WP9: Конструкция судна/системная интеграция

В ходе проекта HyMethShip будет создан рабочий проект определенного судна, использующего систему HyMethShip, который станет практическим образцом интеграции и работы данной системы на реальном объекте. Результаты исследования данной технологии и проблем, связанных с ее применением на выбранном судне, могут быть использованы при разработке аналогичных проектов для других типов судов. Предусмотрен подробный анализ данных от системы автоматической идентификации (AIS — automatic identification system) в европейских зонах ECA для того, чтобы выбрать наиболее подходящие типы судов и рынки, с которых целесообразно начать практическое применение системы HyMethShip.

Ожидается, что система HyMethShip будет применима для судов различного типа, поскольку она строится на базе обычного судового двигателя внутреннего сгорания. При этом к основному оборудованию добавляется реформер и танк для хранения CO₂, которые, скорее всего, будут находиться в помещении под палубой. Они незначительно повлияют на грузоподъемность (в смысле полезного груза) и пассажироместимость, поскольку предполагается, что упомянутое оборудование займет место устройств топливпод-

готовки и очистки ОГ (которые при использовании системы HyMethShip не понадобятся). Система HyMethShip сможет найти применение на пассажирских судах, паромов, сухогрузах типа RoRo, контейнеровозах, танкерах, автомобильевозах и крупных судах обеспечения нефтяных платформ.

В числе первых потребителей данной системы окажутся суда, работающие в пределах зон регулируемых выбросов, включая внутренние водные пути, где действуют более жесткие экологические стандарты, и в тех областях, где требование снижения вредных выбросов — наиболее критично. Отдельные страны могут устанавливать более жесткие нормативы для некоторых видов транспортных средств, например, дорожных паромов, являющихся частью национальной транспортной системы. Например, правительство Норвегии разработало национальный транспортный план (Norwegian National Transport Plan 2018–2029), в соответствии с которым для новых паромов, включенных в национальную транспортную систему, вводится требование малых или нулевых выбросов. Согласно этому плану к 2030 г. указанному требованию должны отвечать не менее 40 % судов, работающих на местных линиях. Еще один пример — Швеция. Организация «Шведские Дорожные Паромы» (Swedish Road Ferries) заказала исследование возможности снижения выбросов от паромов, по сравнению с 2011 г., на 15 % — к 2020 г., и на 30 % — к 2030 г. Наибольшую выгоду от HyMethShip прежде всего получают суда, работающие в зонах действия более жестких экологических нормативов, поскольку им придется инвестировать в технологии снижения вредных выбросов.

Поскольку в состав системы HyMethShip включены емкости для приема CO₂ и для ее работы необходимо снабжение метанолом из береговых хранилищ (в идеальном случае, полученным из собранного CO₂), то, вероятнее всего, первыми потребителями данной системы станут суда снабжения, работающие на постоянных рейсах (паромы, пассажирские лайнеры) или вне порта регистрации (вспомогательные и рабочие суда). В ближайшем будущем, однако, следует ожидать, что многие порты обзаведутся собственной инфраструктурой для хранения и распределения CO₂, поскольку многие отрасли промышленности, работа которых связана с выбросами CO₂, будут вынуждены их снижать, а потребность в сборе и хранении CO₂ будет возрастать. Ввиду роста потребности в метаноле для двигателей судов, использующих систему HyMethShip, углекислота может быть использована для производства метанола.

Тип судна и характер рейсов определяют требования к установке системы HyMethShip

на судно, в том числе требования к организации топливopодачи, хранению CO₂, способа подачи воды к агрегату выработки топлива, к интеграции систем управления и обеспечения безопасности. Кроме того, должны быть определены требования к двигателю при его работе в различных режимах — крейсерском, при маневрировании, и на холостом ходу, а также требования к резервированию, надежности и переключению между разными видами топлива. Для судовой системы, в отличие от стационарной демонстрационной установки (WP10), требования будут несколько иными, учитывая такие факторы, как действующие нормативы, условия окружающей среды (температурный диапазон), а также режим движения судна.

Чтобы определить условия работы HyMethShip и эталон для сравнения, необходимо знать параметры эксплуатации судна, в том числе вид груза (грузовое, пассажирское), профиль эксплуатации, профиль нагрузки (% времени при работе на крейсерском режиме, в режиме маневрирования и на холостом ходу), а также КПД, стоимость и экологические характеристики современной системы обычного типа, принятой за эталон.

Рабочий проект судна, приспособленного для применения системы HyMethShip, должен включать спецификацию компонентов системы, расположение танков, расчеты устойчивости, вентиляции, систем датчиков, пожаротушения, трубопроводов и насосов. Применительно к судну с установкой системы HyMethShip необходима оценка влияния таких факторов, как водяной балласт, перевозка пассажиров и груза, бункеровка топлива и выгрузка CO₂, а также возможные изменения других судовых систем; рассмотрен годовой профиль эксплуатации, включающий зимние и летние условия.

5.8. WP10: Демонстрация системы

Данный рабочий пакет включает проектирование системы и создание демонстрационной установки в почти полностью собранном виде, установку компонентов и подсистем, детально разработанных в составе пакетов WP2– WP5. При проектировании демонстрационной установки и при разработке аппаратного и программного обеспечения будут использованы инструменты CAD, а также моделирование процессов и систем.

Разработчиками выполнена оценка рисков на уровне пропульсивной установки, позволяющая определить устройства и контуры безопасности, необходимые для работы демонстрационной установки, разработан план испытаний, содержащий требования к определению критериев приемки/браковки по каждому виду испытаний.

После предъявления демонстрационной установки (в том числе всех ее подсистем) будет выполнен первый функциональный тест для проверки всех основных рабочих характеристик системы, а также для настройки и — при необходимости — корректировки параметров управления. На следующем этапе демонстрационная установка будет использована для оценки качества системы в целом, в соответствии с критериями, предусмотренными планом испытаний, и для проверки взаимодействия всех ее подсистем. Предусмотрено проведение ресурсных испытаний длительностью 150 часов.

И наконец, на основании результатов испытаний будут обновлены математические модели системы. По завершении демонстрационного этапа будет проведена инспекция критически важных деталей для оценки их износа, выявления потенциальных отказов и внесения возможных изменений в конструкцию.

6. Выводы

Система HyMethShip представляет принципиально новую технологию выработки энергии для приведения судна в движение. В ней используется исключительно возобновляемая энергия, к тому же она позволяет радикально снизить выбросы CO₂ в атмосферу. Область применения HyMethShip не ограничивается каким-либо определенным типом судов, более того, система может использоваться для модернизации существующих старых судов.

Выбросы парниковых газов от любого судна, оборудованного системой HyMethShip, будут на 97 % меньше, чем от аналогичного судна с традиционной пропульсивной установкой, а уровень вредных выбросов (SO_x, NO_x, PM) практически будет равен нулю.

Судя по всему, в ближайшем будущем нормы допустимых выбросов CO₂ будут ужесточены, что еще раз подчеркивает важность поиска инновационных решений.

Консорциум HyMethShip имеет все предпосылки для того, чтобы успешно решить поставленную задачу, поскольку в число его участников входят судоходная компания, обслуживающая международные линии, одна из крупнейших в мире верфей, классификационное общество, а также ряд исследовательских организаций, университетов и производителей оборудования. Кроме того, во Внешнем Консультативном Совете будет представлен ряд других заинтересованных сторон, которые получают доступ ко всем результатам работы.

Источник финансирования

Настоящий проект финансируется из фонда программы инноваций Евросоюза Horizon 2020, Грант № 768945.

Условные обозначения и сокращения

CCS	Система улавливания CO ₂ (Carbon capture system)
CH ₃ OH	Метанол
CO	Окись углерода
CO ₂	Двуокись углерода
GHG	Парниковые газы (Green house gas)
H ₂	Водород
H ₂ O	Вода
HAZID	Идентификация опасностей (Hazard identification)
HAZOP	Изучение потенциальных опасностей и работоспособности (Hazard and operability study)
HFO	Тяжелое топливо (Heavy fuel oil)
LCA	Оценка жизненного цикла (Life cycle assessment)
LCC	Оценка затрат в течение жизненного цикла (Life cycle costing)
LNG	Сжиженный природный газ (Liquefied natural gas)
MCE	Многоцилиндровый двигатель (Multi-cylinder engine)
MDO	Судовое дизельное топливо (Marine diesel oil)
NO _x	Окислы азота
NPV	Чистая приведенная стоимость (Net present value)
PM	Частицы (Particulate matter)
SCE	Одноцилиндровый отсек (Single cylinder engine)
SO _x	Окислы азота
ΔH _r	Энтальпия реакции

Литература

1. International Maritime Organization 2008. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1971, as modified by the protocol of 1978 relating thereto (revised MARPOL Annex VI). accessible on the internet: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.176\(58\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.176(58).pdf), accessed on: 2017-11-04

2. International Maritime Organization 2016. MEPC 69/7/3 Reduction of GHG emissions from ships. 26.2.2016, available on the internet: <https://www.cleanshipping.org/download/MEPC-69-7-3-An-appropriate-IMO-response-to-the-Paris-Agreement-CSC.pdf>

3. *Brynolf S.* 2014. Environmental assessment of present and future marine fuels. Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology.

4. *Lowell, D., Wang, H. and Lutsey, N.* 2013. Assessment of the fuels cycle impacts of liquefied natural gas as used in international shipping. The International Council on Clean Transportation

5. *Thomson H., Corbett, J.J. and Winebrake, J.J.* 2015. Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy*, 87, 153–167.

6. *Bengtsson, S., Andersson, K. and Fridell, E.* 2011. A comparative life cycle assessment of marine fuels; liquefied natural gas and three other fossil fuels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 225, 97-110.

7. *Bengtsson, S., Fridell, E. and Andersson, K.* 2012. Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping. *Energy Policy*, 44, 451-463.

8. *Brynolf, S., Fridell, E. and Andersson, K.* 2014. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production*, 74, 86-95.

9. The European Commission 2011. White Paper Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system. COM/2011/144 final, Brussels 2011, accessible on the internet: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0144>

10. International Maritime Organization 2018. MEPC.304(72) Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. accessible on the internet: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/GHG-Emissions.aspx>, accessed on: 2019-02-05

11. The European Commission 2013. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy. COM/2013/017 final, Brussels 2013, accessible on the internet: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52013PC0017>

12. The European Parliament and the Council of the European Union 2014. Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure. *Official Journal of the European Union*, L 307/1.

ВОДОРОД – ТОПЛИВО ДЛЯ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ БУДУЩЕГО

Stephan Laiminger, Michael Url,
Martin Schneider, Klaus Payrhuber,
INNIO Jenbacher GmbH & Co OG

Введение

Климат Земли меняется, причем скорость этих изменений заметно растет. Содержание CO_2 в земной атмосфере уже превысило отметку 400 ppm. Это означает необходимость ограничения выбросов CO_2 во избежание роста температуры атмосферы вследствие глобального потепления. Хотя существуют разные прогнозы, описывающие накопление в атмосфере парниковых газов (GHG) и соответствующие изменения климата, целесообразно сократить использование минеральных топлив и долю углеродной энергетики. Чтобы держать под контролем глобальные изменения климата в условиях непрерывного роста потребности в энергии, необходимо обеспечить снижение выбросов GHG в процессе производства энергии, а также потерь энергии на в сфере потребления. Международное Энергетическое Агентство (IEA) разработало сценарий снижения выбросов CO_2 , необходимого для того, чтобы к 2100 г. рост температуры не превысил $+2^\circ\text{C}$ (рис. 1). Свой вклад в эту программу, включившись в движение за переход к возобновляемой энергии, новым топливам и повышению энергоэффективности, может внести и «INNIO Jenbacher». Повышение КПД газовых двигателей и одновременное сокращение выбросов GHG «Jenbacher» обеспечивает за счет когенерации, т. е. комбинированного производства тепловой и механической энергии (CHP — combined heat and power). Замена угольной электростанции современными газовыми двигателями, работающими по принципу CHP, позволит сократить выбросы CO_2 примерно на 70 %. Кроме того, двигатели INNIO способны работать на различных топливах, в том числе неминерального происхождения. В принципе, газовый двигатель может использовать любой горючий газ в качестве топлива. Если говорить о

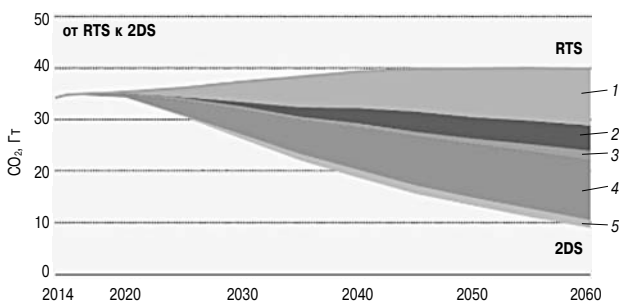


Рис. 1. Необходимые мероприятия по снижению выбросов CO_2 до 2060 г. [7]:

1 — возобновляемые 35 %; 2 — ССs 14 %; 3 — смена топлива 5 %; 4 — КПД 40 %; 5 — ядерная 6 %

возобновляемой энергии, то это прежде всего биогаз. Следует также отметить, что газовые двигатели обладают высокими динамическими характеристиками, что позволяет стабилизировать параметры сети, пользуясь при этом газом как источником возобновляемой энергии. Следует отметить, что позитивный эффект снижения вредных выбросов может быть заметно ослаблен выбросами GHG прежде всего метана, поэтому его утечки должны быть сведены к минимуму. Переход на природный газ сокращает выбросы CO_2 по сравнению с дизелем на 25 %. Замена старой угольной электростанции современной электростанцией с газовыми двигателями CHP дает сокращение выбросов CO_2 до 70 %. Газовый двигатель хорошо приспособлен для превращения энергии отходящих газов или биогаза в тепло и электричество, что в принципе позволяет сократить выбросы CO_2 на 100 %. Таким образом, перевод двигателя с дизеля на газ, утилизация энергии газообразных отходов и повышение КПД — это шаги в направлении улучшения качества природной среды.

Волатильность возобновляемой энергии поднимает вопрос о способах ее хранения. Если потенциальная электроэнергия хранится в виде H_2 , то в газовых двигателях целесообразно использовать газ с высоким содержанием H_2 . Двигатели INNIO это допускают.

Декарбонизация

Уход от использования минерального топлива, так называемая декарбонизация, становится одной из самых «горячих» тем мировой печати.

Дорожный транспорт является одним из главных источников выбросов CO_2 , поэтому столь пристальное внимание привлекает все, что связано с электромобилями.

В последнее время появился ряд исследований, посвященных возможности 100 %-ной, декарбонизации В одном из таких исследований, результаты которого опубликованы FVV [3], описаны три возможных сценария реализации этой идеи (рис. 2). Электромобиль может приводиться в движение электродвигателем, питающимся от аккумуляторной батареи либо от водородной топливной ячейки, или же обычным двигателем внутреннего сгорания, работающим на Е-топливе. Следует оговориться, что, согласно упомянутому исследованию, существующие аккумуляторные батареи пригодны только для легкового автотранспорта. Что касается грузовиков, то они могут получать питание от контактной сети, подобно троллейбусу.

Далее рассмотрим вопрос перехода на другое топливо — не только с угля или дизеля на газ, но и с природного газа на другое топливо. При этом надо помнить, что ключевым условием устойчивого снижения выбросов GHG является декарбонизация.

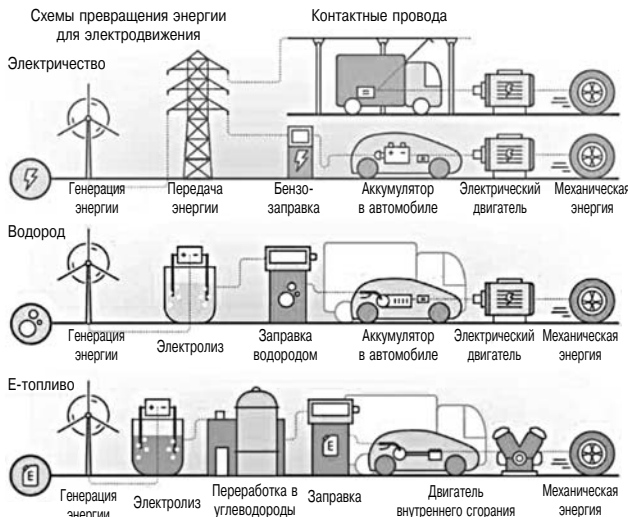


Рис. 2. Концепции применения E-топлив на транспорте [3]

Для электродвижения требуется непрерывная подача электроэнергии либо от аккумуляторов с подзарядкой, либо от контактной сети через токосъемник. Транспортное средство должно иметь хранилище водорода или синтетического топлива — на тот случай, когда источники возобновляемой энергии (вода, ветрогенератор или солнечная батарея) временно недоступны. Важнейшим условием устойчивой декарбонизации является эффективный и экономичный способ хранения электроэнергии. По мнению FVV (Fraunhofer Verbund Verkehr), для эффективной декарбонизации какой-либо одной из упомянутых выше технологий недостаточно, требуется сочетание всех трех. Для этого понадобится инфраструктура для H₂ как необходимое условие непосредственного использования E-топлив и H₂ в транспортных двигателях. Вполне возможна также подкачка H₂ в трубопроводы природного газа, что позволило бы использовать существующие емкости для хранения избытка H₂ до завершения создания отдельной инфраструктуры. Это побудило бы потребителей работать на смеси природного газа и H₂. В любом случае возобновляемая энергия, в конце концов, преобразуется в электрическую энергию, которая может использоваться для компенсации временно возникающего дефицита энергии солнца или ветра.

Хранение энергии

Ввиду волатильности источников возобновляемой энергии, таких как солнце или ветер, основной проблемой при ее использовании является технология хранения. Потребление энергии носит круглогодичный характер, что означает необходимость длительного хранения огромных запасов энергии, расходуемых в зависимости от сезона. Сравнение различных технологий показано на рис. 3. Чтобы сдвиг в сторону возобнов-

ляемой энергии носил устойчивый характер, необходимо обеспечить сезонное хранение огромных энергетических запасов. Аккумуляторные батареи могут сохранять, самое большее, однодневный запас энергии. Сезонное хранение должно быть так или иначе ориентировано на H₂, по крайней мере, в качестве промежуточного продукта. Даже при наличии хранилищ в виде высотных баков, куда вода закачивается насосами, или емкостей со сжатым воздухом, солнечная энергия не может использоваться летом и храниться всю зиму.

Во всех рассматриваемых технологиях хранения речь идет о водороде, получаемом с помощью электролиза воды. H₂ может либо храниться непосредственно в подземных хранилищах, либо подмешиваться в распределительную сеть природного газа, которая в результате будет транспортировать к потребителю смесь природного газа и H₂. В настоящее время разрешено подмешивать в природный газ до 5 % H₂, но в ближайшем будущем возможно повышение данного лимита до 10 %. Впоследствии возможно дальнейшее повышение допустимого содержания H₂ в природном газе, в противном случае необходимо будет строить отдельную систему распределения H₂. Ожидается, что, по крайней мере, в переходный период H₂ будет подаваться через существующую сеть природного газа.

Имеется также сценарий, состоящий в том, чтобы конвертировать H₂ в синтетический природный газ (SNG — synthetic natural gas) или жидкое E-топливо, что позволит сохранить все существующие инфраструктуры распределения газа и дизеля без изменений. Такой сценарий FVV, показанный на рис. 2, довольно удобный с точки зрения транспортировки. Однако он имеет серьезный недостаток (рис. 4). Помимо высокой

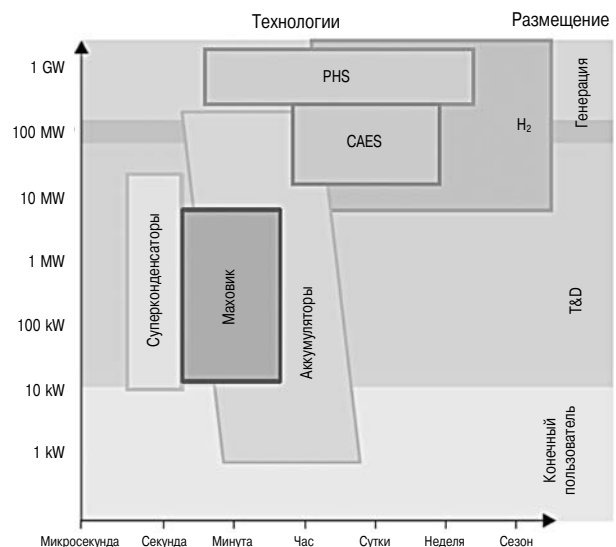


Рис. 3. Хранилища энергии — емкость в зависимости от длительности хранения [2]

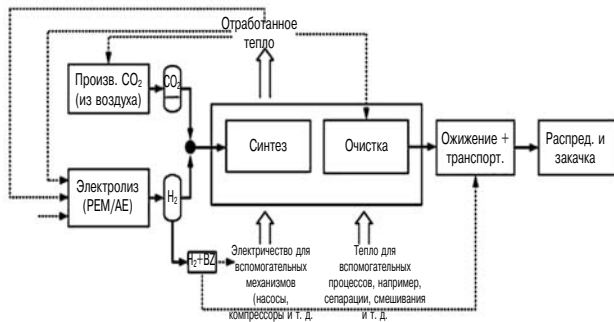


Рис. 4. Схема процесса производства E-топлива [3]

себестоимости, его реализация невозможна без CO₂. Несмотря на продолжающийся рост количества углекислого газа в атмосфере, его содержание недостаточно для достижения высокой эффективности сепарации.

Если удастся разработать экономичный способ производства E-топлива, по своим качествам равноценного дизелю, бензину или природному газу, то будет решено большинство проблем декарбонизации. Уже сейчас работают или проектируются несколько небольших демонстрационных установок для производства E-топлива. Если удастся их должным образом масштабировать, то это может стать началом массового производства и хранения E-топлива.

Водород как топливо

От наличия достаточного количества H₂ зависит решение одновременно двух проблем — декарбонизации трафика и долгосрочного хранения энергии. По мере увеличения объема транспортировки H₂ по трубам газопроводов будет возрастать потребность в многотопливных газовых двигателях, способных работать в том числе на H₂. Поскольку существующие газовые двигатели, как правило, являются многотопливными, возможность использовать в качестве топлива водород, чистый или в смеси с природный газом, представляется вполне реальной. Разумеется, такое топливо не готово к употреблению, поэтому для его подготовки потребуются определенные технологии и оптимизация, чтобы двигатель мог адаптироваться к меняющимся свойствам топлива. В 2015 г. рабочая группа CIMAC WG 17 опубликовала документ Impact of Gas Quality on Gas Engine Performance (Влияние качества газа на показатели газового двигателя). В нем отмечалось, что на качество газа сильно повлияет либерализация газового рынка. Некоторые численные показатели приведены на рис. 5–7.

Предложенные значения числа Воббе (Ws)* для разных странах неодинаковы. При этом ожидается общая либерализация качества газа. Это не означает, что каждый потребитель непременно

* Число Воббе — характеристика, определяющая взаимозаменяемость горючих газов при сжигании, кВт·ч/м³

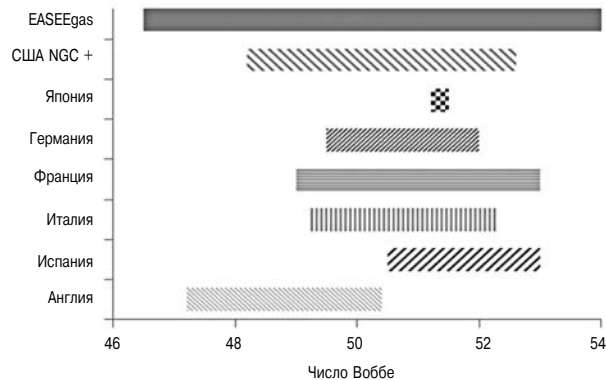


Рис. 5. Фактические значения Ws и правила, действующие в разных странах [1]

столкнется с необходимостью использовать весь диапазон разных газов, поскольку в каждом конкретном месте качество газа может быть относительно постоянным. Для газовых двигателей число Воббе — самый значимый показатель. Такие двигатели, как правило, работают по циклу Отто с искровым зажиганием, и подвержены риску детонации, поэтому более важным показателем для них является метановое число (MN). Метановое число не коррелирует с числом Воббе (см. рис. 6), например, газ с числом Воббе 54 имеет метановое число менее 65, что для большинства газовых двигателей с высоким КПД неприемлемо.

Новые двигатели должны проектироваться с таким расчетом, чтобы они могли работать на разных газах с самыми различными свойствами, хотя это, будет сопровождаться нестабильностью КПД и других показателей двигателя. Но самая большая проблема — это существующий парк двигателей. Газовые двигатели рассчитаны для работы на газе постоянного состава. Следовательно, изменения качества газового топлива вызовут необходимость разработки специальных комплектов для их модернизации, поскольку об остановке производства двигателей не может быть и речи.

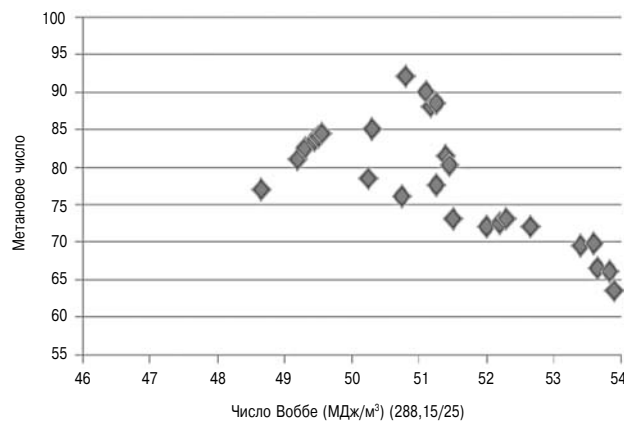


Рис. 6. Соотношение между метановым числом и числом Воббе [1]

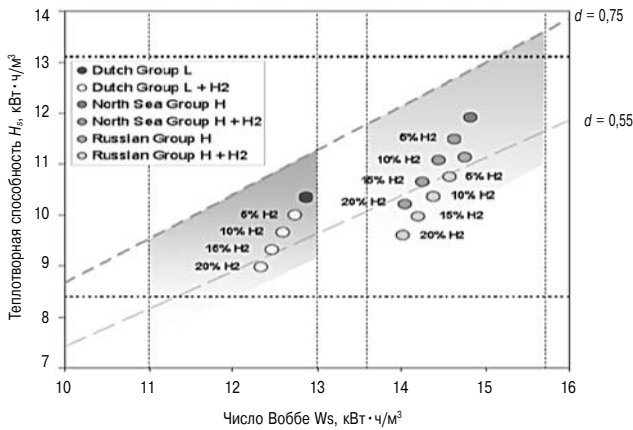


Рис. 7. Влияние водорода на теплотворную способность HV, Ws и плотность [1]

Например, более высокое содержание углеводородов (C_4 и C_4+) в природном газе (LNG) с меньшим значением MN, аналогично добавлению водорода к LNG. В настоящее время возможность увеличения допустимой доли водорода в LNG до 10 % обсуждается специалистами, пока же производители газовых турбин и двигателей допускают содержание H_2 в LNG в пределах от 1 до 5 %. Даже при содержании водорода 10 % плотность смеси для некоторых газов выходит за пределы допустимого диапазона $0,55 < d < 0,75$, как показано на рис. 7. Добавление биометана приводит к засорению распределительной сети такими веществами, как силоксаны и сера, оказывающими вредное воздействие на все пользовательское оборудование, в особенности — на газовые двигатели. Появление на рынке H_2 в качестве радикального средства декарбонизации может привести к частым изменениям состава поступающего в двигатель газа. Один из сценариев — хранение H_2 в существующей распределительной сети природного газа (рис. 8). Водород будет производиться в мощных промышленных установках и через сеть поступать к конечным потребителям, или же использоваться в производстве синтетич-



Рис. 8. Производство и использование водорода [4]

еских топлив. Современный газовый двигатель должен допускать работу на газе, содержащем от 0 до 100 H_2 %.

Организация сгорания водорода

INNIO имеет большой опыт работы газовых двигателей Jenbacher на всех видах неприродных газов. В составе некоторых из этих газов, таких как мусорный и шахтный газы, преобладает CH_4 (метан), поэтому их свойства в качестве горючего мало отличаются от природного газа. Другая большая группа газов (например, газы, используемые при газификации и в сталелитейном производстве) имеет в своей основе H_2 и CO . Совокупная наработка двигателей INNIO Jenbacher на этих газах, которые могут содержать до 70 % H_2 , превышает миллион моточасов. Как правило, состав газа на входе конкретной установки достаточно стабилен, поэтому двигатель может быть спроектирован с расчетом на относительно стабильный состав. Если же ожидаются существенные колебания состава газа, то это потребует дополнительных конструкторских решений, и, возможно, определенных компромиссов в части показателей качества двигателя. Несколько примеров использования отходящих газов промышленных установок в газовых двигателях «Jenbacher» показаны на рис. 9. Располагая столь обширным опытом, фирма поставила себе целью создать двигатель с максимальной топливной адаптивностью, т. е. способный работать на газе с содержанием H_2 от 0 до 100 %. Наиболее предпочтительным способом организации рабочего процесса является система прямого зажигания с регулируемым уровнем турбулизации потока в главной камере сгорания, который обеспечивается поршнем специальной формы, разбивающим часть локальных вихрей на входе. Таким образом, стабильное сгорание H_2 достигается за счет качественной организации рабочего процесса, начиная от способа приготовления смеси, движения рабочего заряда, зажигания смеси и кончая управлением процессом горения. Камера сгорания, рассчитанная на использование газа с большим содержанием H_2 , по геометрии отличается от камеры, рассчитанной на горение чистого природного газа.

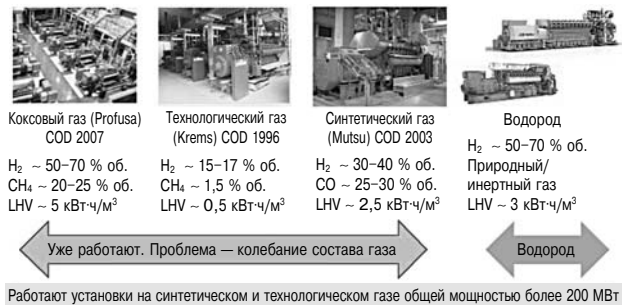


Рис. 9. Свойства различных газов, содержащих H_2

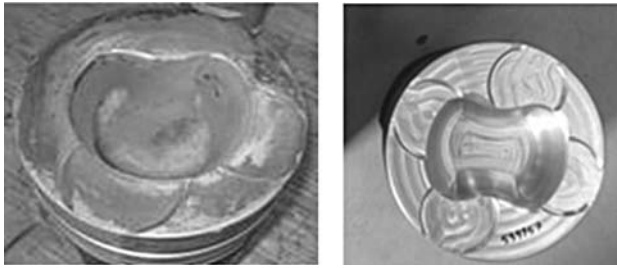


Рис. 10. Пример формы камеры в поршне

Газовые двигатели INNIO, рассчитанные на использование неприродных газов, имеют ряд конструктивных отличий от обычных двигателей, рассчитанных на природный газ. Один из примеров — конструкция поршня двигателя Jenbacher типа 6, показанная на рис. 10. Стандартный вариант поршня имеет либо плоское днище, либо камеру в поршне с незначительным заглублением, а турбулизация смеси достигается за счет форкамеры. Однако для газа с высоким содержанием H_2 вариант с форкамерой не годится. Пример формы камеры в поршне для горения H_2 показан на рис. 10. Конструкция и форма камеры сгорания отработывались при исследованиях на одноцилиндровом отсеке (SCE). При увеличении содержания H_2 процесс горения ускоряется, и его эффективность увеличивается.

В этом эксперименте мощность поддерживалась постоянной, что привело к росту максимального давления сгорания (рис. 11). Это означает, что базовая конструкция должна выдерживать высокое давление или двигатель придется дефорсировать. Влияние содержания H_2 на изменение показателей двигателя показано на рис. 12. Основные показатели рассчитаны по результатам испытаний SCE. Очень быстрое сгорание при 50 % H_2 не приводит, однако, к столь же быстрому росту общего КПД двигателя. Чтобы сохранить выбросы NO_x на том же уровне, приходится обеднять рабочую смесь.

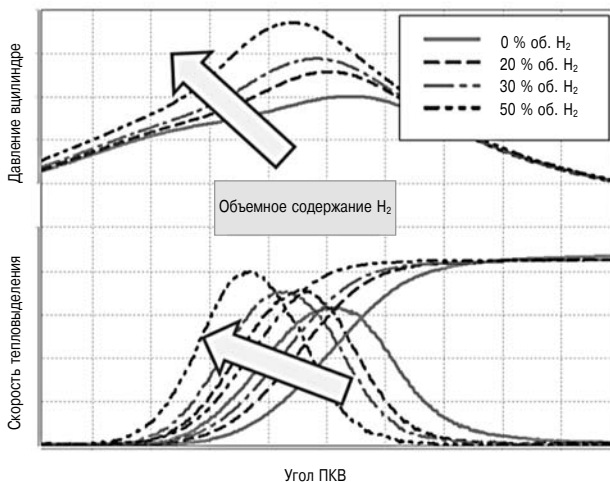


Рис. 11. Скорость тепловыделения при различном содержании H_2

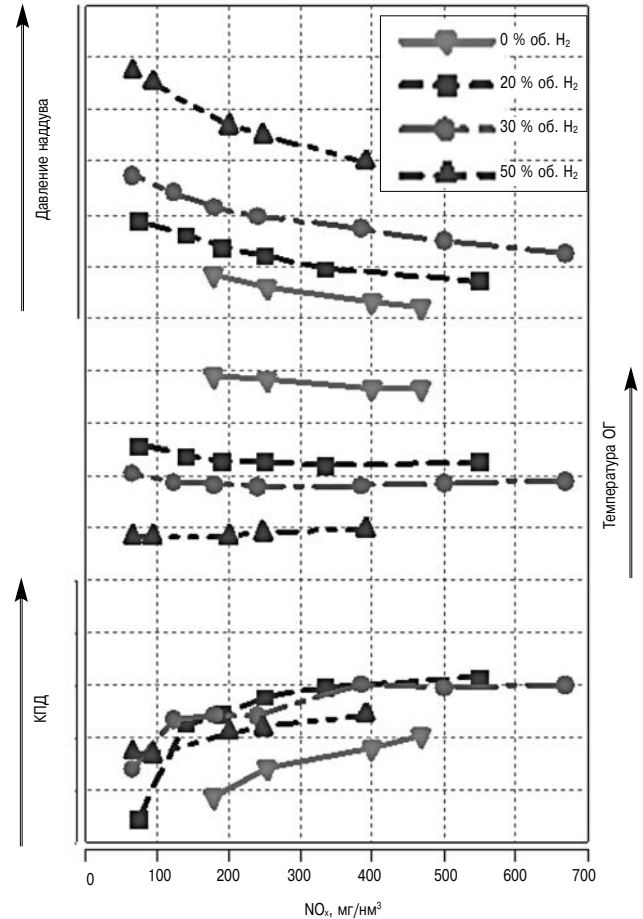


Рис. 12. Показатели двигателя при работе на газах с различным содержанием H_2

Это заставляет повышать давление наддува, что ведет к росту насосных потерь. Последнее обстоятельство сводит на нет выигрыш в КПД, полученный за счет быстрого сгорания. Однако, небольшая добавка H_2 к газу обеспечивает реальный выигрыш в КПД и стабильную работу двигателя с более низким уровнем выбросов NO_x . Особенно ярко выраженное anomalous сгорание наблюдалось при работе на газах с высоким содержанием H_2 и/или CO вследствие ускорения сгорания.

На рис. 13 показаны зависимости давления в цилиндре от угла поворота коленвала. Кроме того, показана кривая (1) напряжения зажигания. Видно, что опасность детонации возникает при раннем зажигании (самовоспламенении). Процесс горения при раннем зажигании протекает достаточно быстро, что приводит к чрезвычайно высокому максимальному давлению сгорания. Проблема состоит в том, что при возникновении детонации стандартная система защиты двигателя не в состоянии уловить этот момент, что может привести к тяжелым последствиям. Для безопасной и стабильной работы двигателя необходима система измерения мгновенного значения давления в цилиндре, способная реагировать на пиковое значение давления. Такая система уже несколько

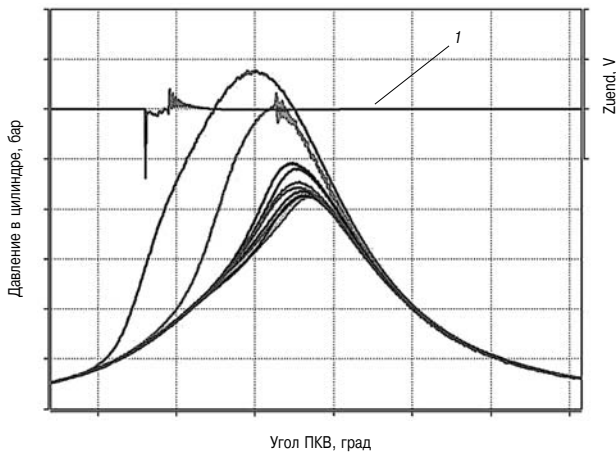


Рис. 13. Аномальное сгорание: как это выглядит



Рис. 14. Альтернативный процесс организации сгорания водорода [5]

лет применяется в двигателях INNIO Jenbacher типа 6.

Альтернативный способ избежать феноменов аномального сгорания состоит в организации прямого впрыска H_2 в главную камеру сгорания. Воспламенение происходит от свечи зажигания или впрыска небольшой порции пилотного топлива (рис. 14).

Данная концепция — прямой впрыск с альтернативным зажиганием от пилотного топлива — была разработана в рамках исследовательского проекта, выполненного Large Engines Competence Center GmbH (LEC). Этот проект является частью инновационно-исследовательской программы Horizon 2020 по гранту № 768945.

Разумеется, могут быть и другие способы использования H_2 в газовом двигателе. Некоторые из них уже реализованы, другие, вероятно, вскоре появятся.

Примеры реализации

Фирмой INNIO построено множество установок, работающих на газе с добавлением H_2 , например демонстрационная установка P2G в Аргентине. Возобновляемая энергия, полученная от системы ветрогенераторов, хранится в форме H_2 , а в периоды повышенной потребности в энергии H_2 подается в газовый двигатель, где

снова превращается в электроэнергию. Этот двигатель не был предназначен для работы на чистом водороде. В штатном режиме он работает на природном газе. Для демонстрационной установки в топливо добавляется 40 % водорода, в результате чего лишь незначительно снижается мощность. Эта установка уже работает около 10 лет.

Говоря о дальнейшем развитии данной концепции, следует упомянуть проект HyMethShip в рамках программы ЕС Horizon 2020, о которой уже говорилось выше. Энергия хранится в форме метанола (CH_3OH), который получен из водорода, взятого из возобновляемых источников и используемого в замкнутом цикле. Проект LEC подробно описан в докладе 104 CIMAC-2019.

Заключение

Для достижения поставленной цели — 100 % декарбонизации — необходим источник возобновляемой энергии, которого будет хватать более чем на одни сутки. Энергию, предназначенную для сезонного потребления, желательно хранить в химической форме. Такой формой могут быть водород и/или SNG, которые можно либо добавлять в существующую инфраструктуру для природного газа, либо закачивать в подземные хранилища. В периоды дефицита недостающее количество электрической и тепловой энергии может быть получено от газовых двигателей, работающих на смеси водорода и природного газа. Иначе говоря, необходим двигатель, способный работать на газовом топливе, содержащем от 0 до 100 % H_2 . Фирма INNIO обладает технологиями создания такого двигателя, что было подтверждено демонстрационными моделями. Остается вопрос, что делать с парком существующих двигателей.

Условные обозначения

CAES	Хранилище энергии в виде сжатого воздуха (compresses air energy storage)
CCS	Хранилище собранного углерода (Carbon Capture Storage)
CHP	Когенерация (Combined Heat and Power)
GHG	Парниковый газ (Green House Gas)
IEA	Международное энергетическое агентство (International Energy Agency)
NG	Природный газ (Natural Gas)
NNG	Неприродный газ (Non-Natural Gas)
P2G	Мощность — в газ (Power to Gas)
PFP	Максимальное давление сгорания (Peak Firing Pressure)
SCE	Одноцилиндровый двигатель (Single Cylinder Engine)
SNG	Синтетический природный газ (Synthetic Natural Gas)

Литература

1. CIMAC Positioning Paper 07/2015 Impact of Gas Quality on Gas Engine Performance.
2. IEA «Roadmap — Hydrogen and Fuel Cells».
3. FVV — Optionen für eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050; Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft.
4. NREL; National Renewable Energy Laboratory.
5. European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement № 768945.
6. IEA «Tracking Clean Energy Progress 2017».

УДК 621.436

Маслов А.П., Рождественский Ю.В., Левцов М.В. Графоаналитический анализ возможности обеспечения одинакового хода поршней V- и W-образных двигателей с прицепными шатунами // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 3–8.

Ключевые слова: V- и W-образные двигатели, главные и прицепные шатуны, равенство хода поршней, графоаналитическое построение КШМ.

Представлен графоаналитический метод построения КШМ V- и W-образных двигателей с прицепными шатунами, позволяющий создавать условия для достижения одинакового хода поршней, соединенных с главным и прицепным шатунами. Условия достижения равенства хода поршней обеспечиваются за счет выбора геометрических размеров деталей КШМ и взаимного расположения деталей ЦПГ. Предложена математическая формула для расчета и размеров КШМ с одинаковым ходом поршней в цилиндрах с главным и прицепным шатунами виртуального W-образного двигателя. Ил. 7, Библ. 4 назв.

УДК 621.437

Федянов Е.А., Левин Ю.В., Шумский С.Н. Использование фазированной подачи малых добавок водорода для улучшения показателей роторного двигателя Ванкеля // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 9–12.

Ключевые слова: двигатель Ванкеля, фазированный впрыск водорода, повышение экономичности, снижение выбросов углеводородов.

Роторно-поршневой двигатель, выполненный по схеме Ванкеля, обладает малыми габаритами и весом, большой удельной мощностью и является альтернативой традиционным поршневым двигателям. Однако повышенный расход топлива и выбросы несгоревших углеводородов препятствуют их широкому распространению. Устранение отмеченных недостатков достигнуто за счет добавок свободного водорода. Представлены результаты экспериментальных исследований рабочего процесса роторно-поршневого двигателя Ванкеля ВА3-311 с фазированной (по времени) подачи добавки водорода, обеспечивающей повышение полноты сгорания рабочей смеси. Табл. 1, Ил. 3, Библ. 21 назв.

УДК 621.313.322-843.6

Радченко П.М., Крашенин В.Е., Макаев М.А. Комбинированный двухэтапный наддув дизель-генератора в переходных режимах // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 13–18.

Ключевые слова: судовой дизель-генератор, режимы наброса нагрузки, приемистость турбокомпаундная система, колесо турбины, подача сжатого воздуха, качественный переходный процесс.

Рассмотрена технология комбинированного двухэтапного наддува судового дизель-генератора в переходных режимах. Технология реализована за счет электропривода ротора турбокомпрессора и подачи сжатого воздуха на колесо турбины. Технология обеспечивает повышение полноты сгорания топлива, снижение вредных выбросов, улучшение приемистости и повышение качества электроэнергии, вырабатываемой дизель-генератором, при резком набросе нагрузки. Табл. 1, Ил. 6, Библ. 7 назв.

УДК 621.43.057

Плотников С.А., Кантор П.Я., Мотовилова М.В. Расчет характеристик впрыскивания при работе дизеля на активированном топливе // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 19–23.

Ключевые слова: дизель, распыливание подогретого топлива, работоспособность форсунки, параметры топливного факела. Экспериментально проверена работоспособность топливной форсунки, распыливающей дизельное топливо, подогретого до 300 °С. Приведены результаты расчетов геометрических характеристик топливного факела при впрыске горячего топлива: угол конуса распыливания топлива, скорость и длина топливного факела, средний размер капель. Гипотетически обоснована возможность улучшения качества смесеобразования и полноты сгорания, повышения эффективных и ресурсных показателей дизеля при впрыске разогретого топлива в камеру сгорания. Табл. 1, Ил. 3, Библ. 13 назв.

УДК 621.436

Бирюков Н.Н., Мудрецов Д.Н., Марков В.А., Поздняков Е.Ф., Карпен Ф.С. Удаление нагара в двигателях внутреннего сгорания с помощью водородно-воздушной смеси // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 24–29.

Ключевые слова: Поршневые ДВС, детали камеры сгорания, нагарообразование, генератор водородно-воздушной смеси, удаление нагара и кокса.

Приведены основные факторы, влияющие на процессы отложения нагара и кокса на деталях камеры сгорания дизельных и бензиновых двигателей. Рассмотрены возможные неисправности двигателей, вызванные интенсивным нагарообразованием и коксообразованием. Предложен способ очистки деталей камеры сгорания поршневых ДВС от нагара за счет подачи в цилиндры двигателя водородно-воздушной смеси. В качестве генератора водородно-воздушной смеси служит установка Leader-4M, разработанная в целях реализации технологии удаления нагара и кокса. Приведены результаты испытаний установки на моторном стенде, экспериментально подтверждена ее эффективность. Табл. 2, Ил. 5, Библ. 18 назв.

УДК 621.432.4

Валеев Р.С., Еникеев Р.Д., Сакулин Р.Ю. Повышение стойкости поршней двухтактных ДВС к прогару посредством нанесения МДО-покрытия // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 30–34.

Ключевые слова: двухтактный бензиновый двигатель, прогар днища поршня, термобарьерная теплозащита, нанесение МДО-покрытия.

Существенная проблема эксплуатации форсированных двухтактных бензиновых двигателей — прогар днища поршней. Одним из методов решения этой проблемы являются нанесение термобарьерных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования (МДО). Проведены исследования, подтверждающие способность МДО-покрытия на днище поршня, значительно повысить устойчивость к прогару. Экспериментально установлено, что нанесение МДО-покрытия на днище поршня, повышает его тепловую стойкость и не оказывает негативного влияния на эффективные и экологические показатели двигателя. Табл. 2, Ил. 9, Библ. 20 назв.

УДК 621.43

Водород — перспективное топливо для поршневых ДВС (материалы конгресса СИМАС 2019) // Двигателестроение. — 2020. — № 2. — С. 35–53.

Ключевые слова: Исследовательский проект HyMethShip, газовые двигатели, снижение вредных выбросов, метанол, декарбонизация, синтез-газ, «зеленый» водород, газовое топливо с добавками водорода.

Исследовательский проект HyMethShip, реализуется с целью радикального снижения уровня выбросов судовых двигателей с одновременным повышением их КПД. Система, создаваемая в рамках проекта, должна обеспечить снижение выбросов CO₂ не менее чем на 97 %, практически обнулить выбросы SO_x и PM, сократить выбросы NO_x как минимум на 80 % по сравнению с нормой по IMO Tier III. Система HyMethShip включает поршневой ДВС, работающий на метаноле или на водороде, мембранный реактор, систему улавливания CO₂ и емкости для его хранения. При этом водород для работы двигателя получается из возобновляемого метанола. Система планируется к испытаниям в составе демонстрационной установки в мощностью до 2 МВт. В консорциум разработчиков вошли 13 участников, в числе которых судостроительная компания, одна из крупнейших в мире верфей, классификационное общество, а также ряд исследовательских организаций, университетов и производителей оборудования.

Газовые двигатели «Jenbacher» в составе генераторов средней мощности надежно работают на топливах с высоким содержанием водорода. К ним относятся разнообразные синтетические газообразные топлива, производимые из низкокалорийных газов, а также природный газ, искусственно обогащенный добавками водорода. Продуктом электролиза воды, является 100 %-ый очищенный водород (так называемый «зеленый» водород), добавляемый в действующую систему распределения природного газа, которая, по существу представляет собой огромное хранилище химической энергии, необходимой для компенсации сезонных колебаний производительности источников возобновляемой энергии, а именно, ветрогенераторов и солнечных батарей. При смешивании водорода с природным газом его содержание может колебаться в очень широких пределах. Это не является препятствием для работы газовых двигателей фирмы «Jenbacher», однако при больших колебаниях концентрации водорода или слишком быстром ее изменении могут возникать проблемы. Предмет настоящего доклада — демонстрация опыта, накопленного при решении проблем в данной области. Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником. Табл. 2, Ил. 22, Библ. 18 назв.

UDC 621.436

Maslov A.P., Rozhdestvensky Yu.V. and Levtsov M.V. Graph-analytic method of crank gear design for V- & W-engines featuring master and slave connecting rods // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 3–8.

Keywords: V- & W-engines, master and slave connecting rods, equal piston strokes, graph-analytic method of crank gear design.

These authors present graph-analytic method of crank gear design for V- & W-engines featuring master and slave connecting rods in such a manner that strokes of both pistons (attached to master and slave connecting rods respectively) would be equalized. This goal is achieved through proper selection of geometry of crank gear parts and layout. The authors provide formula for design and calculation of equal-stroke crank gear of virtual W-engine. 7 ill., 4 ref.

UDC 621.437

Fedyanov E.A., Levin Yu.V. and Shumsky S.N. Minor addition of hydrogen to fuel as a means to improve rotary engine performance // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 9–12.

Keywords: rotary engine, Wankel engine, phased hydrogen injection, fuel economy, lowering hydrocarbon emission.

Rotary engine, invented by Felix Heinrich Wankel, is an alternative to conventional reciprocating engine, and exceeds the latter in terms of power density. However, they are not widespread so far because of higher fuel consumption and hydrocarbon emissions. Said drawbacks may be remedied through the injection of free hydrogen. The results of experiments on Wankel engine type VAZ-311 show that hydrogen injection results in higher completeness of mixture combustion. 1 table, 3 ill., 21 ref.

UDC 621.313.322-843.6

Radchenko P.M., Crashenin V.E. and Makaev M.A. Transients in marine engine-generator featuring combined two-stage supercharge system // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 13–18.

Keywords: marine engine-generator, load application modes, acceleration, turbo-compound engine, turbine wheel, compressed air injection, transient performance.

The article discusses transient performance of combined two-stage supercharge system. The technology in question includes electric-driven turbocharger rotor and compressed air injection in such a manner that compressed air jet impacts the turbine wheel. Such an approach contributes into completeness of mixture combustion, decrease in noxious emissions, higher acceleration and better quality of electric power during transients.

1 table, 6 ill., 7 ref.

UDC 621.43.057

Plotnikov S.A., Kantor P.Ya. and Motovilova M.V. Activated fuel as a means to improve engine performance // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 19–23.

Keywords: diesel engine, atomization of heated fuel, injector performance, fuel jet parameters.

The idea was tested on a test stand featuring injector fed with diesel fuel heated to 300 °C. The authors calculated geometric dimensioning of hot fuel jet, fuel cone angle, fuel jet velocity and length, and average droplet dimensions. The test results witness to improvement in mixing quality, completeness of combustion and other engine performance characteristics. 1 table, 3 ill., 13 ref.

UDC 621.436

Biriukov N.N., Mudretsov D.N., Markov V.A., Pozdniakov E.F. and Karpets F.S. Hydrogen-air mixture injection as a means of carbon deposit removal // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 24–29.

Keywords: reciprocating engine, combustion chamber components, carbon deposit, hydrogen-air mixture generator, carbon deposit removal.

The article discusses principal factors that influence carbonization/caking processes in engine combustion chamber. The authors studied possible engine malfunctions caused by extensive carbonization/caking. The offered technology is based on cleaning of combustion chamber components with hydrogen-air mixture injected into engine cylin-

ders. Carbon deposit is removed with specially designed injector unit type Leader-4M. Efficiency of the method in question was validated by tests.

2 tables, 5 ill., 18 ref.

UDC 621.432.4

Valeev R.S., Yenikeev R.D. and Sakulin R.Yu. Micro-weld oxidation as a means to prevent burnout of 2-stroke engine piston // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 30–34.

Keywords: 2-stroke petrol engine, piston crown burnout, thermal overload protection.

Burnout of piston crown is an issue typical to high-powered two-stroke petrol engines. One of possible methods to solve the problem is application of heat insulating coating with micro-weld oxidation method. The tests confirmed that such coating effectively prevent piston crown burnout, as it improves heat resistance of the piston without compromising fuel economy and environmental performance of the engine.

2 tables, 9 ill., 20 ref.

UDC 621.43

Hydrogen — up-and-coming fuel for reciprocating engines (based on CIMAC 2019 papers) // *Dvigatelistroyeniye*. — 2020. — № 2. — P. 35–54.

Keywords: HyMethShip project, gas engines, reduction in noxious emissions, methanol, decarbonization, synthetic natural gas, «green» hydrogen, hydrogen-activated fuel gas.

The HyMethShip project is a cooperative R&D project funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. The project aims to drastically reduce emissions while improving the efficiency of waterborne transport. The HyMethShip system will achieve a reduction in CO₂ of more than 97 % and practically eliminate SO_x and PM emissions. NO_x emissions will fall by over 80 % below the IMO Tier III limit. The HyMethShip system innovatively combines a membrane reactor, a CO₂ capture system, a storage system for CO₂ and methanol as well as a hydrogen-fueled combustion engine into one system. Methanol is reformed to hydrogen, which is then burned in a conventional reciprocating engine that has been upgraded to burn multiple fuel types and specially optimized for hydrogen use. The system will be developed, validated, and demonstrated on-shore on an engine in the range of 1 to 2 MW. The HyMethShip consortium consists of 13 organizations from six EU member states. The partners within the consortium together represent the two dominant parts of the shipping sector value chain, i.e. ship building and operation, they are covering engineering and manufacturing with respect to all technologies that are involved in the HyMethShip propulsion system and they are providing maritime consultancy, especially classification and compliance.

In the mid-sized power generation segment, Jenbacher gas engines are a proven technology provider to utilize high hydrogen gaseous fuels. Coke oven gases as well as byproduct gases from chemical processes containing a hydrogen content up to 70 volumes % have been used in various types of engines and accumulated well more than one million operating hours. Hydrogen from renewable sources like wood gasification can contain up to 50 volume % of hydrogen. Hydrogen from electrolysis is typically provided as a 100 volume % and purified H₂ fuel and considered as carbon free (green H₂) when electricity is produced from renewable sources. One of the main purposes to produce green hydrogen is to add it to the natural gas system, because the natural gas system is seen as a seasonal and large energy storage and necessary for balancing the intermittent electricity production from renewables wind and solar. When hydrogen is mixed with natural gas, the hydrogen content can vary in a wide range. Gas engines have the capability to burn gases with a wide range of hydrogen content, but there are also some challenges with a potentially high fluctuation of the hydrogen content or fast rate of change. The future advantages, the challenges as well as the experience with high hydrogen gases on Jenbacher gas engines will be discussed in this paper.

The CIMAC papers are translated into Russian by G.Melnik, PhD.

2 tables, 22 ill., 18 ref.

Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

Журнал «Двигателестроение» является ежеквартальным научно-техническим изданием, посвященным проблемам развития, проектирования, изготовления и эксплуатации поршневых двигателей.

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

- расчеты, конструирование, исследования двигателей;
- системы и агрегаты двигателей;
- конструкционные материалы;
- топливо и смазочные материалы, присадки;
- ресурсосбережение;
- эксплуатация и ремонт двигателей;
- автоматизация и диагностирование;
- проблемы экологии;
- гипотезы и дискуссии;
- история развития конструкций (проектов), предприятий и науки о двигателях;
- обзорная и справочная информация.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

Рукопись статьи должна иметь рекомендацию к публикации в журнале (направление) от организации, где выполнялась работа, а также акт экспертной комиссии с указанием того, что рукопись не содержит сведений, запрещенных к публикации в открытой печати.

Заглавие статьи должно быть кратким (не более 120 знаков), точно отражающим ее содержание.

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисуночными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисуночных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Даже если все иллюстрации заверстаны автором в текст электронной копии рукописи, то их представление в виде отдельных файлов и распечаток на отдельном листе обязательно.

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

Если представленные в редакцию рукописи не удовлетворяют перечисленным требованиям, то они могут быть доработаны по согласованию с автором сотрудниками редакции. Услуги редакции по доработке рукописей статей платные.

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

Авторское право на конкретную статью принадлежит авторам. Ответственность за содержание статьи несет также автор. При перепечатке статьи или ее части ссылка на журнал обязательна.

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

Редакция журнала