

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Макарьев Евгений Васильевич —
кандидат технических наук,
ведущий инженер проектов.
ООО «MT-Grup»
Makariyev-SMF@yandex.ru
Махфуд Мохаммед Маад — аспирант.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
maad_mahfood@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Makariyev Evgeny Vasilievich —
PhD, principal project engineer.
ООО «MT-Grup»
Makariyev-SMF@yandex.ru
Mahfoud Mohammad Maad — postgraduate.
Supervisor:
Bezyukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
maad_mahfood@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2016 года

УДК 621.431.36:629.5.03-08

Н. Г. Кириллов

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА И ПЕРВЫЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДНА НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Статья посвящена анализу решения проблем при создании первого российского судна, работающего на сжиженном природном газе. Проанализированы современные экологические требования к морским и речным судам. Рассмотрено влияние водного транспорта на экологию крупных портов, в частности, Санкт-Петербурга. Сделан вывод о необходимости применения природного газа в качестве моторного топлива для судовых двигателей. Изложены уникальные отечественные технологии по переводу судовых дизелей на двухтопливный режим и использованию быстростъемных криогенных емкостей СПГ. Приведены результаты ходовых натурных испытаний судна-газохода с использованием сжиженного природного газа в качестве моторного топлива. В ходе испытаний при работе на двухтопливном режиме судовой энергетической установки был достигнут коэффициент замещения дизельного топлива 70 % (30 % — дизельное топливо, 70 % — сжиженный природный газ). Теоретические работы и натурные испытания первого отечественного судна на сжиженном природном газе проводились под научным руководством автора. Полученный опыт может дать уже в ближайшее время мощный толчок отечественным судостроителям к созданию высокoeкономичных и экологических судов речного и смешанного плавания, а России стать одним из мировых лидеров по применению СПГ на водном транспорте.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, компримированный природный газ, судовая энергетическая установка, газодизель, судно-газоход, емкость СПГ.

Экологические проблемы эксплуатации водного транспорта в России и Санкт-Петербурге

Одним из проявлений перехода развитых стран мира на новый технологический уровень является стремительно растущее применение альтернативных видов моторного топлива, среди которых наиболее перспективным является природный газ. Изначально применение природного газа в качестве моторного топлива на транспортных средствах преследовало технико-эконо-

мические цели: экономию средств на приобретение топлива, поскольку цена эквивалентного количества газа значительно ниже, чем дизельного топлива или бензина, и обеспечение устойчивого топливоснабжения в перспективе с учетом динамики изменения добычи нефти и газа. Важным, с точки зрения экономики, является также снижение текущих расходов на эксплуатацию транспортных средств при использовании природного газа за счет повышения ресурса и надежности работы двигателей, уменьшения расхода смазочного масла и понижение требований к его качеству. Снижение износа основных деталей двигателей (цилиндрово-поршневой группы, кривошипно-шатунного механизма и т. д.) объясняется тем, что при работе двигателя на газе отсутствуют неиспарившиеся жидкие фракции, которые, проникая в рабочие цилиндры двигателя на традиционных нефтяных топливах, вызывают смывание смазки и корродирование стенок цилиндра, а, проникая в картер, разжижают масло. При работе двигателя на природном газе в продуктах сгорания топлива отсутствуют частицы твердого углерода, вызывающие износ деталей [1].

Однако в настоящее время все более актуальным аспектом использования природного газа на транспорте является экологический фактор. Широко известно, что транспорт является одним из основных источников вредных выбросов в окружающую среду, на него приходится около 40 % суммарных выбросов загрязняющих веществ и более 10 % выбросов парниковых газов [2]. Например, в Санкт-Петербурге на долю транспортных источников различного назначения приходится около 92 % выбросов загрязняющих веществ. Из официального Доклада Комитета по охране окружающей среды, природопользования и экологической безопасности Санкт-Петербурга следует, что суммарный выброс загрязняющих веществ в нашем городе пока только растет. В частности, увеличение наблюдается по таким показателям, как оксид углерода, летучие органические соединения и др. По диоксиду азота, например, который содержится в выхлопных газах автомобилей, предельно-допустимая концентрация в воздухе превышена в 20 раз. Если в 2011 г. в Петербурге на одного человека приходилось около 60 кг вредных веществ, то к 2017 г., когда автомобильный парк города составит более 2,5 млн автомобилей, эта цифра возрастет до 75 – 80 кг. По статистике уже сегодня 96 % жителей города на Неве живет в условиях высокого и очень высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха, а экологическую ситуацию в Петербурге можно назвать критической.

Известно, что Санкт-Петербург является крупнейшим в России морским и речным портом, поэтому на экологию воздушного пространства города, ввиду большой агрегатной мощности энергетических установок морских и речных судов, существенное влияние оказывает водный транспорт. Так, например, в Санкт-Петербурге основная доля перевозок водным транспортом приходится на речные перевозки по Неве, связывающей город с Ладожским озером и являющейся конечным отрезком Волго-Балтийского водного пути. Обычно навигация на Неве открывается в середине апреля и закрывается в октябре-ноябре; в год через Санкт-Петербург по реке в среднем проходит более 7 тыс. судов смешанного и внутреннего плавания. Кроме этого, в навигацию 2015 г. в Санкт-Петербурге функционировали многочисленные внутренние маршруты речного водного транспорта: шесть внутренних регулярных субсидируемых маршрутов; транспортные маршруты «Санкт-Петербург – Петергоф» и «Санкт-Петербург – Кронштадт», обслуживаемые скоростными судами типа «Метеор»; а также более 100 экскурсионно-прогулочных маршрутов водного транспорта. С учетом огромного количества речных судов, эксплуатируемых в городской черте Санкт-Петербурга, и морских судов, заходящих в акваторию Финского залива, доля водного транспорта в загрязнении городской воздушной среды в летние месяцы доходит до 10 % от общего количества загрязнений, выбрасываемыми различными видами транспорта [3].

Практический опыт использования альтернативных видов моторного топлива показывает, что применение природного газа в качестве моторного топлива позволяет снизить выбросы токсичных веществ в окружающую среду: оксида углерода — в 2,5 раза, оксида азота — в 2 раза, углеводородов — в 3 раза, задымленности — в 9 раз [4]. Поэтому задача перехода различных видов техники на природный газ, относится к числу приоритетных для транспортного комплекса

Российской Федерации. Основные задачи и обязанности государственных органов по применению природного газа в качестве моторного топлива определены поручениями Президента Российской Федерации от 11 июня 2013 г. № Пр-1298, Правительства Российской Федерации от 24 июня 2013 г. № АД-П9-4314, Комплексным планом мероприятий по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива, утвержденным Правительством Российской Федерации 14 ноября 2013 г. № 6819п-П9, Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 г., Энергетической стратегией России на период до 2030 г., Стратегией инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г. и другими документами.

Необходимо отметить, что кроме загрязнения воздушной среды, другим источником экологической опасности при эксплуатации водного транспорта на традиционных нефтяных видах топлива является загрязнение акваторий портов, рек и водоёмов за счет так называемых «подсланевых вод», которые образуются в машинных отделениях судов и отличаются высоким содержанием нефтепродуктов. Источниками загрязнения могут являться также нефть и нефтепродукты, попадающие в водные ресурсы вследствие недостаточной герметичности корпусов нефтеналивных судов и бункеровочных станций, утечки нефтепродуктов в процессе перегрузки и др. Загрязнение акваторий портов, рек и водоёмов нефтью и нефтепродуктами затрудняет все виды водопользования. Влияние нефти, керосина, бензина, мазута, смазочных масел на водоём проявляется в ухудшении физических свойств воды (замутнение, изменение цвета, вкуса, запаха), растворении в воде токсических веществ, образовании поверхностной плёнки, понижающей содержание в воде кислорода, а также осадка нефти на дне водоёма. Характерный запах, и привкус обнаруживаются уже при концентрации нефти и нефтепродуктов в воде 0,5 мг/л.

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами акваторий портов, рек и водоемов приводит к ухудшению качества рыбы (появление окраски, пятен, запаха, привкуса), гибели, отклонениям от нормального развития, нарушению миграции рыб, молоди, личинок и икры, сокращению кормовых запасов (бентоса, планктона), мест обитания, нереста и нагула рыб. Биомасса бентоса и планктона на загрязнённых участках реки резко уменьшается. Токсическое воздействие нефти и нефтепродуктов на рыб обуславливается выделяющимися при разрушении нефти токсическими веществами. Особую опасность представляют нафтеновые кислоты, содержащиеся в нефти и нефтепродуктах. Концентрация нефти в воде 20 – 30 мг/л вызывает нарушение условно-рефлекторной деятельности рыб, их гибель. Донные нефтяные отложения в анаэробных условиях (при дефиците кислорода) сохраняются длительное время и являются источником вторичного загрязнения водоёмов [5].

Только массовый перевод судов смешанного и внутреннего плавания на использование природного газа в качестве моторного топлива позволит решить проблему загрязнения российских акваторий портов, рек и водоёмов нефтепродуктов при эксплуатации водного транспорта.

Обобщая приведенные факты, можно сделать вывод, что в Российской Федерации одним из наиболее перспективных направлений использования природного газа в судах внутреннего и смешанного плавания является перевод на газомоторное топливо судов, работающих в черте крупных городов: прогулочных и экскурсионных судов, буксиров, теплоходов портового флота и лоцманских катеров. С одной стороны, именно для этих судов проблема экологической безопасности стоит особенно остро, а с другой — сохранения водных биоресурсов и чистой воды для водоснабжения крупных населенных пунктов. С учетом данных факторов, использование природного газа в качестве моторного топлива целесообразно, в первую очередь, для судов Волжского, Московского, Камского, Волго-Донского, Северо-Западного, Кубанского и Западно-Сибирского пароходств. Перспективным является также использование судов-газоходов смешанного и внутреннего плавания в районах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, где находятся предприятия по добыче природного газа и отсутствуют нефтеперерабатывающие предприятия, что вызывает трудность в обеспечении флота топливом нефтяного происхождения.

Природный газ как моторное топливо на транспортном средстве может находиться в двух состояниях: сжиженном — СПГ и сжатом, т. е. компримированном — КПП. В цилиндры дви-

гателя он подается в газообразном виде, поэтому выбору подлежит состояние, в котором запас газа перевозится на транспортном средстве. В сжиженном состоянии природный газ находится при температуре минус 160 °С, а для его для сохранения в этом состоянии используются криогенные емкости. Однако для таких видов транспорта, как авиационный, железнодорожный и водный, использование сжатого газа весьма проблематично, и перевод этих видов транспорта на газовое топливо возможен только на основе СПГ. Это связано с тем, что применение СПГ позволяет существенно улучшить технические показатели транспортных средств по сравнению с использованием КПП: уменьшить габариты и массу системы хранения бортового топлива; увеличить полезную грузоподъемность и запас хода от одной заправки; сократить за счет более редких заправок непроизводительные затраты, связанные с холостыми пробегами. Преимущества сжиженного природного газа при использовании в качестве моторного топлива объясняются более высокой его плотностью (в 3 раза) по отношению к сжатому природному газу. Сжижение позволяет уменьшить объем газа, занимаемый в обычных условиях, почти в 600 раз, что приводит, по сравнению со сжатием газа, к уменьшению массы системы хранения природного газа на транспортном средстве в 3 – 4 раза, а объема в 1,5 – 3 раза [6].

Мировые тенденции по использованию сжиженного природного газа на водном транспорте

В настоящее время среди всех видов транспорта наиболее критичная и наиболее обсуждаемая ситуация в вопросе использования сжиженного природного газа складывается, прежде всего, для морского водного транспорта [7].

Необходимость применения природного газа на морских судах определяется существующими и планируемыми к введению нормами по контролю за выбросами оксидов серы и азота и созданием особых районов морских акваторий, где эти выбросы будут контролироваться. В соответствии с Требованиями Приложения VI МК МАРПОЛ, наиболее жесткие требования устанавливаются для районов контроля выбросов (Emission Control Areas — ECA), к числу которых относятся Балтийское и Северное моря, прибрежные воды США и Канады, Карибское море, Средиземное море, побережье Японии, Малаккский пролив (рис. 1).

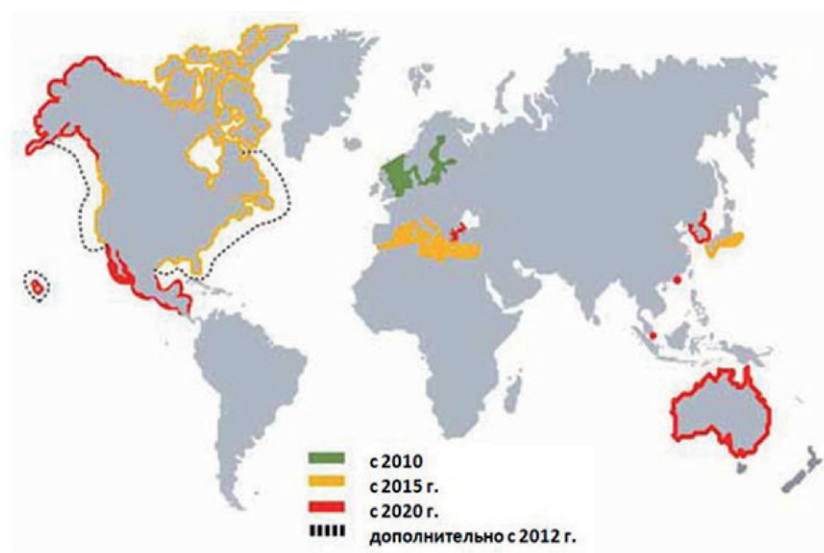


Рис. 1. Районы контроля выбросов (ECA)

Так, уже с 1 января 2015 г. в зонах особого контроля над выбросами серы (Sulphur Emission Control Areas — SECA), в число которых входят Балтийское и Северное моря, содержание серы в судовом топливе не должно превышать 0,1 % (это в 10 раз меньше, чем было разрешено до 2015 г.). Особые требования для дизельных двигателей разработаны Европейским Союзом. В частности,

выброс серы при нахождении в портах Евросоюза не должен превышать 0,1 – 0,2 %. При невыполнении этого требования судно должно получать более дорогую береговую электроэнергию, а с 2016 г. в ЕС использование высокосернистого мазута будет караться конфискацией судна.

С 2020 г. будет введено ограничение на содержание серы в судовом топливе на уровне не более 0,5 % по всему миру. В 2022 г. начнет действовать международное соглашение о придании Балтийскому морю статуса NECA (Nitrogen Emission Control Area) — зоны особого контроля над выбросами окислов азота. В соответствии с положениями Конвенции МАРПОЛ, статус района NECA предполагает, что все суда, построенные после 1 января 2022 г. и эксплуатируемые в таком районе, должны иметь дизельные установки, отвечающие стандартам Уровня III.

Мазут, как традиционное судовое топливо, не сможет удовлетворять новым требованиям. Это означает, что судовладельцам и операторам судов придется либо устанавливать дорогостоящее оборудование (скрубберы) по очистке судовых отработанных газов, либо переходить на использование сжиженного природного газа. В настоящее время практически все судовладельцы, готовясь к вводимым ограничениям, в качестве наиболее эффективного варианта рассматривают переход на использование СПГ для судовых энергетических установок. Природный газ позволяет полностью исключить выброс окислов серы и твердых частиц, снизить на 90 % выбросы окислов азота и уменьшить выбросы CO₂ на 30 %.

Мировой опыт показывает, что в судовой энергетике природный газ может использоваться только в виде сжиженного природного газа ввиду наиболее приемлемых массогабаритных характеристик топливной системы. Если сегодня в мире насчитывается около 100 морских и речных судов на СПГ, то к 2030 г., по прогнозам, их будет в 370 раз больше, т. е. 3700. В соответствии со стратегией, подготовленной Европейской комиссией, к 2020 г. все морские порты ЕС, а к 2025 г. — также все крупные речные порты должны быть оборудованы пунктами бункеровки сжиженным природным газом. При этом портовые власти будут вольны определять конкретные способы бункеровки и логистики СПГ. Пункты бункеровки предполагается оборудовать не только в портах Северного и Балтийского морей (зона особого контроля над выбросами серы, ЕСА), но и во всех других портах, включая средиземноморские. Спрос на судовое газомоторное топливо возрастет с 0,6 млн т/г, до около 16 млн т/г. к 2030 г. Это не только колоссальный рынок СПГ-бункеровки, но и значительные затраты для судовладельцев. Поэтому власти ЕС уже сейчас озабочены переводом судов на СПГ и выделяют на это финансирование и гранты.

Маршруты основной части морских грузоперевозок России проходят через районы контроля выбросов, в частности через Балтийское и Северное моря, соответственно для нашей страны переход на новые экологические стандарты имеет особую актуальность. Принятие указанных ограничений неминуемо повлечет за собой существенное уменьшение грузооборота морским транспортом со странами ЕС и Англии, и, как следствие — существенное уменьшение торгового оборота в случае, если заранее не побеспокоиться о необходимых технических мероприятиях по соответствию новым экологическим требованиям [8].

Тема использования природного газа актуальна и для речных судов. С одной стороны, из-за большой агрегатной мощности энергетических установок речные суда являются основным источником загрязнения атмосферы в таких локальных зонах, как порты в черте городов, гидротехнические сооружения и акватории рек. С другой стороны, переход на природный газ позволит снизить себестоимость перевозок речным транспортом и переключить часть грузов с автомобильного и железнодорожного видов транспорта на речной транспорт.

Перевод речных судов на применение СПГ — общемировой тренд в развитии судовой энергетики. Так, в ноябре 2015 г. исследовательская компания *DNV GL Netherlands* завершила работы по оценке создания Трансевропейской транспортной сети на основе СПГ-коридора на маршруте рек Рейн – Майн и Дунай. Исследование финансировал консорциум, состоящий из 50 европейских компаний, в том числе Группы портов Рейна, включающей в себя порты Роттердама, Антверпена, Страсбурга и Мангейма (рис. 2). Эти порты играют ведущую роль в Европе по развитию использования СПГ в качестве топлива для внутренних водных путей.

Представители *DNV GL* отмечают, что исследование помогло завершить дискуссии вокруг вопроса использования СПГ в качестве судового топлива для речного транспорта и начать развитие данного инновационного направления.



Рис. 2. Заправка судна смешанного плавания сжиженным природным газом в порту Роттердама

Первый российский опыт создания отечественного судна-газохода на сжиженном природном газе

Ранее сжиженный природный газ на отечественном речном транспорте не использовался. Основной причиной являлось отсутствие отечественного опыта в создании судовых энергетических установок, использующих СПГ в качестве моторного топлива. Однако в настоящее время ситуация кардинально изменилась — создано первое отечественное судно-газоход на СПГ, что явилось технологическим прорывом использования сжиженного природного газа в судовой энергетике.

В настоящее время под руководством автора специалистами компании ООО «НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания»» (ООО «НПО «СПбЭК»») завершена опытно-конструкторская работа (ОКР) по созданию первого российского судна-газохода на сжиженном природном газе. В рамках данной работы на использование сжиженного природного газа был переведен специально приобретенный теплоход «Нева-6» валовой вместимостью около 210 рег. т, ранее работавший только на дизельном топливе (рис. 3).

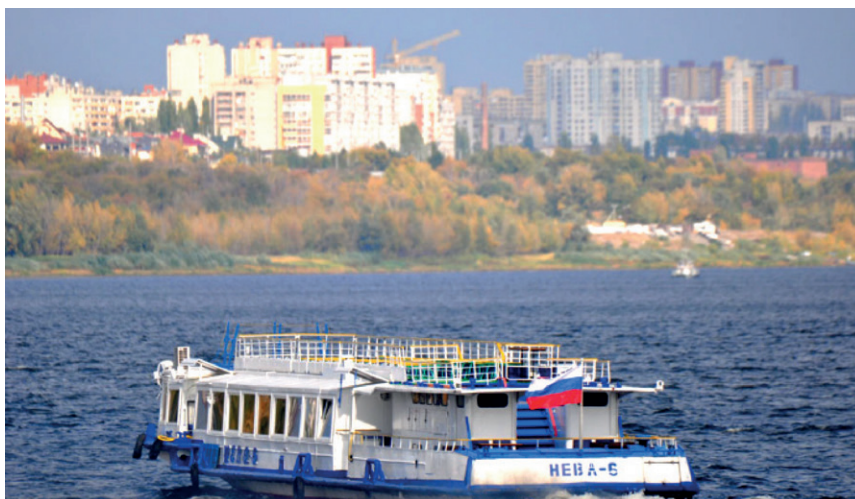


Рис. 3. Внешний вид приобретенного теплохода «Нева-6» перед модернизацией для работы на сжиженном природном газе

В ходе выполнения ОКР специалистами ООО «НПО «СПбЭЖ»» были разработаны новые отечественные технологии:

- по переводу судовых дизелей на двухтопливный газодизельный режим работы с использованием СПГ в качестве основного моторного топлива (коэффициент замещения 70 %);
- по конструктивному исполнению и размещению изотермических емкостей с криогенным топливом;
- по конструктивному исполнению промежуточного контура с теплоносителем для испарения сжиженного природного газа;
- по системам автоматизированного управления двухтопливным режимом работы судовой энергетической установки на основе двух газодизелей;
- по системам пожаротушения и ликвидации аварийных ситуаций при эксплуатации судов-газоходов на СПГ.

При переводе судовых дизелей 3Д6 модернизируемого судна «Нева-6» на двухтопливный режим был выбран вариант внешнего смесеобразования. При таком смесеобразовании природный газ подается во впускной воздушный коллектор, из которого газозвдушная смесь поступает в цилиндры дизельного двигателя. В конце такта сжатия в цилиндр впрыскивается запальная доза дизельного топлива (порядка 30 % от номинальной цикловой подачи), которое необходимо вследствие того, что давление в конце сжатия не обеспечивает достижения температуры самовоспламенения метана, составляющей 650 – 720 °С и значительно превышающей температуру самовоспламенения дизельного топлива (350 – 400 °С). Такой способ воспламенения, обеспечивает возможность быстрого перехода с газового топлива на дизельное и обратно [9].

Уникальность указанного ОКР заключается в том, что перевод судовой энергетической установки пассажирского судна типа «Нева» на двухтопливный газодизельный режим работы производится без демонтажа штатных судовых дизелей. Судно дополнительно оснащается комплектом навесного газового оборудования с системой автоматического управления двухтопливным режимом (рис. 4), оптимизированной на береговом испытательном стенде для замещения 70 % дизельного топлива при работе на номинальной мощности. Такой подход в значительной степени позволяет снизить затраты на перевод судна или другого транспортного средства на газодизельный цикл работы.

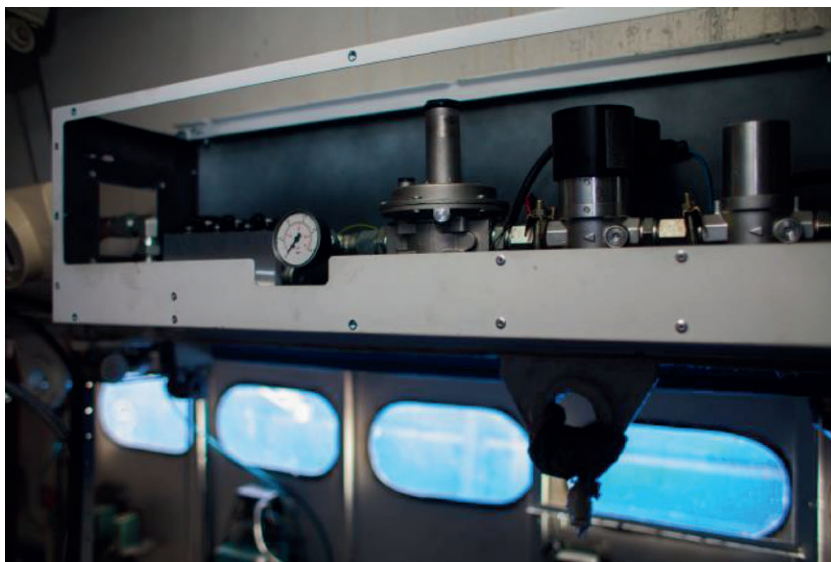


Рис. 4. Комплект навесного газового оборудования для подачи природного газа, размещенного на боковой стенке машинного отделения судна-газохода «Нева-6»

Основные рабочие параметры газодизеля, такие как температура выхлопных газов, температура масла и охлаждающей жидкости, остаются в пределах допусков, установленных заводом-

изготовителем. Как только в двигатель поступает газ, регулятор уменьшает подачу дизельного топлива, сохраняя номинальные обороты и обеспечивая необходимую выходную мощность. Система автоматизированного управления двухтопливным режимом позволяет обеспечивать автоматический перевод работы судовых двигателей с газового топлива на дизельное и ручной перевод работы судовых двигателей с дизельного топлива на газовое. Контролируемые параметры газодизеля: температура выхлопных газов, давление и температура воздуха во впускном коллекторе, разрежение на впуске и вибрация двигателя, давление природного газа на входе и на выходе из регулятора и др.

Система автоматического управления двухтопливным режимом переводит работу двигателя на использование только дизельного топлива, при сохранении необходимого уровня выходной мощности, при возникновении одной из следующих ситуаций: отсутствие природного газа; предельно низкое или высокое давление природного газа после испарителя; высокая температура выхлопных газов; низкая нагрузка по сравнению с номинальной мощностью (менее 15 %); нагрузка более 100 % от номинальной мощности. Пуск и остановка газодизеля на основе модернизированного двигателя 3Д6 происходит только на дизельном топливе.

Решения по обеспечению безопасности опытной эксплуатации судна, переоборудованного для работы СПГ, основывалось на положениях, предусмотренных Дополнением № 2 «Временные технические требования к судам-газоходам, использующим компримированный природный газ» к Правилам классификации и постройки судов внутреннего плавания Российского Речного Регистра, которые были утверждены распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации № НС-17-р от 30.01.2004 г.

При создании судна-газохода на СПГ специалистами ООО «НПО «СПбЭК»» впервые в мире и России была разработана и применена технология применения быстросъемных криогенных модулей для хранения сжиженного природного газа на борту судна. Разработанная технология предусматривает погрузку уже заправленных сжиженным природным газом быстросъемных криогенных модулей (рис. 5), что снижает затраты потенциальных судовладельцев и исключает все проблемы, связанные с вопросами технологического обслуживания модулей (заправки, расхолаживания, захолаживания, дегазации, слива, хранения СПГ и т. д.), которое осуществляется непосредственно на месте заправки модулей сжиженным природным газом квалифицированными специалистами по криогенной технике [10].



Рис. 5. Погрузка быстросъемных криогенных модулей со сжиженным природным газом СПГ на теплоход «Нева-6»

Доставка быстросъемных криогенных модулей может быть осуществлена от места производства (места заправки) СПГ до места бункеровки (например, речного порта) специализирован-

ными грузовыми автомобилями. Замена криогенных модулей с СПГ может быть осуществлена в любом месте, где возможна швартовка судна и есть место для установки погрузчика (например, автомобильного крана). Замена криогенных модулей будет занимать не более 3 ч.



Рис. 6. Быстросъемные криогенные модули СПГ, установленные на фундаменте из металлических двутавровых балок (верхняя палуба теплохода «Нева-6»)

В соответствии с разработанной технологией, на открытой верхней палубе судна был заблаговременно подготовлен фундамент для быстросъемных криогенных модулей, который представляет собой каркас из соединенных металлических двутавровых балок, приваренных к бортам судна (рис. 6). В настоящее время, с учетом накопленного опыта, специалисты ООО «НПО «СПбЭК»» готовы разработать техническую документацию по дооборудованию отечественных судов смешанного и внутреннего плавания для работы на СПГ.

Экспериментальные швартовые и ходовые испытания суда-газохода проходили в акватории г. Волгограда (рис. 7) и показали, что использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива на судах внутреннего плавания не только технически возможно, но и экономически целесообразно.



Рис. 7. Судно-газоход «Нева-6» на ходовых испытаниях в районе речного порта г. Волгоград

Так, результаты швартовых испытаний судна-газохода «Нева-6» позволяют сделать несколько важных выводов:

- не нужно вносить значительных изменений в существующие судовые двигатели и топливную аппаратуру;

- газосмесительное оборудование конструктивно просто, не содержит сложных и прецизионных деталей и узлов и при серийном выпуске сравнительно недорого;
- при эксплуатации снижение финансовых расходов на топливо практически пропорционально соотношению цен «дизельное топливо – сжиженный природный газ»;
- при отсутствии сжиженного природного газа всегда можно вернуться к 100 %-му использованию только дизельного топлива;
- существенную статью расхода составляет оборудование для хранения запаса СПГ. Его стоимость зависит от вида емкостей для хранения и способа их размещения на судне;
- при использовании двухтопливного режима было достигнуто значительное снижение концентрации вредных веществ в отработанных газах от 20 до 40 %; значительное снижение шумности и увеличение ресурса судовой двигательной установки и др.

Заключение

Анализ использования различных видов моторных топлив по критерию «экологичности», показывает, что наиболее чистым топливом является природный газ. Проблемы экологической безопасности водного транспорта являются составной частью экологической безопасности страны. В настоящее время очевидно, что, если Россия хочет решить проблемы экологии водного транспорта и не отстать от мировых тенденций развития современного морского и речного судостроения, необходимо срочно начать инвестировать средства в организацию газификации судовой энергетики на основе использования сжиженного природного газа как наиболее дешевого и экологически чистого вида моторного топлива.

Использование СПГ как универсального моторного топлива XXI в. — интенсивно развивающееся направление, которое уже в ближайшее время может превратиться в самостоятельную высокорентабельную отрасль отечественной экономики. В рамках этого направления, полученный специалистами ООО «НПО «СПбЭК»» уникальный опыт по созданию первого в России судна-газохода на СПГ с судовой энергетической установкой, работающей в двухтопливном режиме, даст уже в ближайшее время мощный толчок российским судостроителям к созданию высокоэкономичных и экологических судов речного и смешанного плавания. Трудность решения указанных задач определялась полным отсутствием отечественного практического опыта по использованию сжиженного природного газа в судовой энергетике.

Переход на сжиженный природный газ позволит снизить себестоимость перевозок водным транспортом и переключить часть грузов с авиационного, автомобильного и железнодорожного видов транспорта на морской и речной транспорт.

Однако для масштабного перехода водного транспорта на использование сжиженного природного газа предусматривается:

- стимулирование разработки и производства судов внутреннего и смешанного плавания, работающих на СПГ, повышение их надежности, безопасности и энергоэффективности, развитие сопутствующей сервисной инфраструктуры;
- развитие заправочной инфраструктуры СПГ на внутренних водных путях Российской Федерации;
- разработка механизмов стимулирования использования природного газа в качестве газомоторного топлива и совершенствование нормативно-правового обеспечения в сфере использования СПГ и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов Н. Г. Экология и автотранспорт: о необходимости перехода на природный газ как перспективное моторное топливо / Н. Г. Кириллов, А. Н. Лазарев // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2010. — № 4 (52). — С. 4–10.

2. Кириллов Н. Г. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ — моторное топливо XXI века / Н. Г. Кириллов, А. Н. Лазарев // Двигателестроение. — 2010. — № 1. — С. 26–33.
3. Епифанов В. С. Применение природного газа в судовых энергетических установках / В. С. Епифанов // Речной транспорт (XXI век). — 2008. — № 4. — С. 77–84.
4. Кириллов Н. Г. Новые технологии в применении сжиженного природного газа как моторного топлива и хладагента для авторефрижераторной техники и автотранспортных средств / Н. Г. Кириллов. — М.: ИРЦ «Газпром», 2003. — 30 с.
5. Голубев Г. Н. Геоэкология / Г. Н. Голубев. — М.: ГЕОС, 1999. — 338 с.
6. Кириллов Н. Г. Сжиженный природный газ: анализ мирового рынка и перспективы отечественного производства / Н. Г. Кириллов // Газохимия. — 2011. — № 6. — С. 23–29.
7. Безюков О. К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Яценко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 31–39.
8. Кириллов Н. Г. Сжиженный природный газ как универсальное моторное топливо XXI века: технологии производства и системы долгосрочного хранения / Н. Г. Кириллов. — М.: ИРЦ «Газпром», 2002. — 64 с.
9. Анкаров И. А. Внешние показатели различных способов смесеобразования в малоразмерных судовых дизелях / И. А. Анкаров, К. К. Колосов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 2. — С. 55–58.
10. Кириллов Н. Г. Проблемы создания хранилищ СПГ в России / Н. Г. Кириллов // Gasworld Россия и СНГ. — 2013. — № 32. — С. 32–33.

THE FIRST EXPERIENCE OF THE RUSSIAN SHIP-USING LIQUEFIED NATURAL GAS AS MOTOR FUEL

The article is devoted to the analysis of solutions when creating the first Russian ship on liquefied natural gas. There were analyzed the current environmental requirements for the maritime and river vessels. The influence of water transport on the ecology of large ports, in particular, the city of St. Petersburg was analyzed. The conclusion about the necessity of using natural gas as a motor fuel for engines was made. There are set out the unique domestic technologies of transfer of marine diesel engines to dual fuel mode and the use of mobil-cryogenic LNG tanks. The results of running full-scale tests of the ship using liquefied natural gas as a motor fuel. During testing, there has been made the replacement rate of diesel fuel 70% (30% – diesel fuel, 70% – liquefied natural gas) when the marine power installation was working on dual mode. Theoretical work and field testing of the first domestic ship on natural liquefied gas were carried out under the supervision of the author. The experience can give a strong impetus to domestic shipbuilders to create a highly economical and ecological river and mixed ships, and Russia will become one of the world leaders in the use of LNG in water transportation in the near future.

Keywords: liquefied natural gas, compressed natural gas, marine power plant, gas diesel, ship gas flue, tank LNG.

REFERENCES

1. Kirillov, N. G., and A. N. Lazarev. "Ecology and motor transport: about necessity of transition to natural gas as perspective motor fuel." *Avtogazozapravochnyj kompleks + Alternativnoe toplivo* 4(52) (2010): 4–10.
2. Kirillov, N. G., and A. N. Lazarev. "Alternative Fuels: Liquefied Natural Gas – Motor Fuel of XXI Century." *Dvigatelistroyeniye* 1 (2010): 26–33.
3. Epifanov, B. C. "Primenenie prirodnogo gaza v sudovyh jenergeticheskikh ustanovkakh." *River transport (XXIst century)* 4 (2008): 77–84.
4. Kirillov, N. G. *Novye tehnologii v primenenii szhizhennogo prirodnogo gaza kak motornogo topliva i hladaagenta dlja avtorefrizheratornoj tehniki i avtotransportnyh sredstv*. M.: IRC «Gazprom», 2003.
5. Golubev, G. N. *Geojekologija*. M.: GEOS, 1999.
6. Kirillov, N. G. "Szhizhennyj prirodnyj gaz: analiz mirovogo rynka i perspektivy otechestvennogo proizvodstva." *Gazohimija* 6 (2011): 23–29.

7. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and O. I. Jashhenko. "Dual-fuel engines on water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O.Makarova* 6(28) (2014): 31–39.
8. Kirillov, N. G. *Szhizhennyj prirodnyj gaz kak universalnoe motornoe toplivo XXI veka: tehnologii proizvodstva i sistemy dolgosrochnogo hranenija*. M.: IRC «Gazprom», 2002.
9. Apkarov, Idris Adamovich, and Konstantin Konstantinovich Kolosov. "External indicators of various methods of mixture formation in small marine diesel engines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2011): 55–58.
10. Kirillov, N. G. "Problemy sozdaniya hranilishh SPG v Rossii." *Gasworld Rossija i SNG* 32 (2013): 32–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кириллов Николай Геннадьевич —
доктор технических наук,
Заслуженный изобретатель РФ,
заместитель генерального директора
по перспективным разработкам
и защите интеллектуальной собственности.
ООО «НПО «Санкт-Петербургская
электротехническая компания»»
kirillov_ng@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirillov Nikolay Gennadievich —
Dr. of Technical Sciences,
Honored Inventor of the Russian Federation,
Deputy General Director
of Advanced Engineering and Protection
of Intellectual Property
«NPO «Saint-Petersburg Electrotechnical
Company»»
kirillov_ng@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 621.432

**В. А. Жуков,
А. И. Яманин**

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КИНЕМАТИКИ КРИВОШИПНО-ШАТУННЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПРИЦЕПНЫМИ ШАТУНАМИ

Статья посвящена сравнительной оценке различных расчетных методик, применяемых для кинематического анализа кривошипно-шатунного механизма. Расчет кинематических параметров прицепных поршней кривошипно-шатунных механизмов V-образных двигателей по различным аналитическим алгоритмам способен приводить к существенным различиям результатов, что ведет к снижению точности динамического анализа механизма и прочностных расчетов деталей. С использованием различных аналитических методик и методов численного моделирования определены перемещение, ускорение поршня и гармонические составляющие ускорения для кривошипно-шатунного механизма судового дизеля М400, выполнено сравнение точности полученных результатов. На основании сравнения погрешностей результатов показана эффективность численного моделирования и анализа таких механизмов методами и средствами современной CAD/CAE-технологии. Использование методов и средств CAD/CAE-технологии позволяет повысить точность кинематических, динамических, прочностных расчетов и качество проектирования двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: кривошипно-шатунный механизм, прицепной шатун, поршень, аналитический алгоритм, численное моделирование и анализ, перемещение, ускорение поршня, судового дизель, CAD/CAE-технологии.



КИНЕМАТИЧЕСКИЙ анализ кривошипно-шатунных механизмов (КШМ) двигателей внутреннего сгорания предшествует динамическому анализу КШМ и прочностным расчетам деталей КШМ. Точность результатов, полученных при кинематическом анализе, существенным образом влияет на достоверность определения сил, действующих в КШМ и корректность последующих прочностных расчетов деталей. В связи с этим актуальной является задача оценки точности различных расчетных методик, применяемых для кинематического анализа.