

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

З. М. Арабова¹, М. Ш. Арабов², А. А. Волкова³, П. А. Саадати³

¹ *Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского
Российской академии наук, Москва, Российская Федерация*

² *Каспийский институт морского и речного транспорта им. генерал-адмирала
Федора Матвеевича Апраксина, филиал Волжского государственного университета
водного транспорта, Астрахань, Российская Федерация*

³ *Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматриваются актуальные в современных условиях проблемы сохранения и наиболее экономного расходования существующих источников энергии с минимальными выбросами в окружающую среду. Ужесточение мер по исключению или минимизации негативного воздействия на окружающий мир – это объективная жизненная необходимость для выживания человечества на нашей планете. Поиск наиболее экологически чистого топлива – важная задача для исследователей в различных областях современной науки. Обозначены мероприятия Международной морской организации (ИМО) по ужесточению экологических требований на море и преимущества перехода транспорта, в том числе судов, с флотского мазута на сжиженный природный газ. Отмечено, что с 01.01.2020 г. ИМО выдвинула требования к содержанию концентрации серы в исходном топливе до 0,5 %. Проиллюстрировано содержание серы в судовых топливах по действующим нормативам. Рассматриваются возможные для Российской Федерации преимущества в случае принятия соответствующих законодательных актов в сфере судостроения и эксплуатации судов. Перечислены преимущества сжиженного природного газа по сравнению с другими топливами. Проиллюстрированы прогнозные значения спроса на сжиженный природный газ для бункеровки судов на 2020–2040 гг. Проведены исследования и выведена формула для определения условия перехода судов на сжиженный природный газ. Рассматриваются существующие и возможные в ближайшем будущем проекты по генерации сжиженного природного газа в Арктической зоне России. Сделаны выводы, что Российская Федерация обладает обширными месторождениями природного газа и научно-техническим потенциалом для развития и возрождения судостроения как внутри страны, так и за ее пределами.

Ключевые слова: экологически чистое топливо, воздействия на окружающую среду, сжиженный природный газ, Мировой океан, метан, суда, контроль выбросов.

Для цитирования: *Арабова З. М., Арабов М. Ш., Волкова А. А., Саадати П. А.* Анализ возможности перевода водного транспорта на сжиженный природный газ // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 60–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-60-73.

Введение

Тенденция к увеличению народонаселения на 85–90 млн чел. в год (за столетие – до 6,5 млрд чел.) способствует стремительному росту промышленности, использованию самых различных типов топлив и, соответственно, активному загрязнению окружающей среды, в том числе вод Мирового океана. Неразумное использование разнообразных видов топлив в гонке за сиюминутной выгодой может закончиться катастрофой для человечества [1]. Мы уже являемся свидетелями глобального потепления на планете, вызванного выбросами вследствие использования различных технических устройств. Воды некоторых рек и озер исчерпали все возможности к самоочищению, безвозвратно нарушена естественная экосистема, огромные территории Земли подвергнуты техногенному загрязнению [2]. Таким образом, в настоящее время проблемы защиты окружающей среды не только актуальны среди ученых-экологов, но важны для международного сообщества в целом.

Цель настоящей работы состоит в определении наиболее рационального (экологического, экономного) вида энергии, приемлемого для нашей планеты на ближайшие 40 лет.

К вопросу об «экологическом» топливе

Евросоюз к 2050 г. утвердил стратегию (в рамках Парижского соглашения), направленную на существенное снижение выбросов углекислого газа в атмосферу, и предъявил повышенные экологические требования для снижения парникового эффекта на планете. Международные организации определили вектор дальнейшего развития по уменьшению негативного воздействия на окружающий мир: всемирное ужесточение мер по снижению количества выбросов в атмосферу, что было зафиксировано в стандартах Международной морской организации (ИМО), в частности уже с 2020 г. ужесточены международные требования к выбросам в атмосферу от плавающих судов. Какого-либо послабления этих требований ожидать не стоит, поскольку если не будут существенно снижены негативные нагрузки на окружающую среду, множество видов экосистемы исчезнет безвозвратно.

Ужесточение экологических требований на судах в ближайшие десятилетия приведет к постепенному вытеснению из обихода не только флотского мазута (HFO) [3], но и всех других видов топлив из нефти, кроме газового топлива (метана). Безусловно, у судостроителей имеются варианты соблюдения стандартов ИМО по выбросам, различные дорогостоящие технические решения, однако для судовладельцев, в особенности когда речь идет о проектировании и строительстве новых судов, это не станет рациональным, экономичным и стратегически верным решением.

В настоящее время ни гипотетические разработки проектов космических солнечных электростанций (где нет восходов и закатов Солнца, облаков), ни геотермальная, ни биомассовая, ни ветровая энергетика или энергия приливов и отливов в ближайшее будущее не могут быть альтернативой углеводородам, лишь небольшим дополнением к углеводородному сырью [4].

Поиски «экологического» топлива являются насущной проблемой человечества. Европа признала, что в ближайшие годы (до 2050 г.) нет альтернативы метану как самому экономичному и экологически чистому топливу [5, 6]. Поэтому в современных условиях достаточно остро стоит вопрос по переводу транспорта (автотранспорта, железнодорожного, водного), а также промышленности на относительно чистое, безвредное топливо.

Результаты научных исследований: газомоторное топливо как решение для существующих проблем

В настоящее время в водах Мирового океана совершают переход более 65 000 судов различного класса, и только небольшое количество судов (менее 200), по данным классификационного общества Det Norske Veritas (DNV), переведено на газомоторное топливо (сжиженный природный газ (СПГ)).

Лидером по газификации в области водного транспорта является Норвегия, где прописаны около 70 % метановых судов мира. В Российской Федерации перевод судов на сжиженный газ только обсуждается и далек до реализации, если в масштабах государства не будут изменены существующие подходы к решению данного вопроса.

Ситуация обострилась для российских судовладельцев после того, как организация ИМО с 01.01.2020 г. ужесточила требования к содержанию концентрации серы в исходном топливе до 0,5 % [7] (ранее содержание серы в топливе допускалось до 3,5 % (рис. 1)).

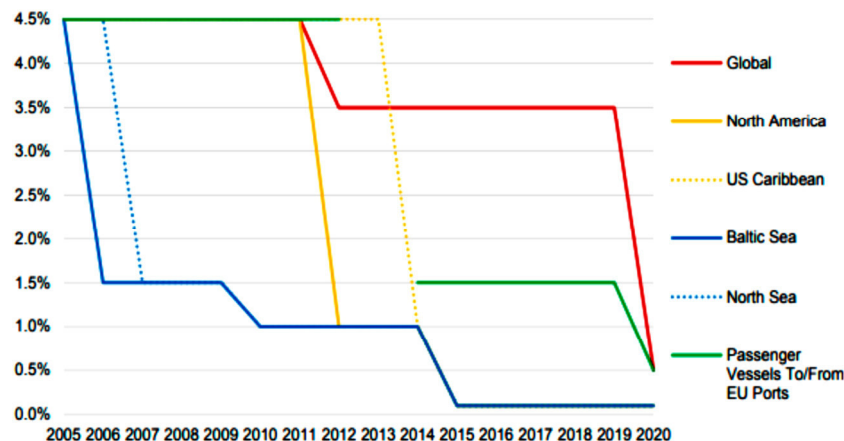


Рис. 1. Допустимое содержание серы в судовых топливах по нормативам [7]

К сожалению, по организационным и управленческим причинам мы все еще не смогли создать развитую сеть даже для перевода автотранспорта на газомоторное топливо, хотя РФ является производителем СПГ и было бы гораздо выгоднее стратегически локализовать в стране технологии по производству СПГ [5]. Приходится констатировать факт того, что мы сильно отстали в этом направлении по различным причинам, прежде всего из-за отсутствия последовательной государственной поддержки на должном уровне. Тем временем в США весь технический парк жилищно-коммунального хозяйства переведен на газомоторное топливо.

Рассмотрим подробнее вопрос использования газомоторного топлива (метана), которое является наиболее приемлемым вариантом топлива как с экологической, так и с экономической точек зрения.

Сегодня разведанные запасы природного газа (с известными месторождениями газовых гидратов в мире) огромны и достаточны на ближайшие тысячелетия, их добыча, осушка, переработка не требуют каких-либо больших капитальных затрат [8, 9].

Активное вовлечение углеводородов в начале 20-х гг. XX столетия привело к мощному развитию производительных сил, следствием чего явились более комфортные условия жизни для человека, повышение продолжительности жизни и резкое увеличение народонаселения.

Применение газомоторного топлива (метана) на транспорте, в промышленности исключает ряд проблем, которые казались неразрешимыми совсем недавно, когда использовали такие источники топлива, как мазут или каменный уголь:

- в десятки, в сотни раз снижается антропогенное воздействие (выбросы) на окружающую среду с отходящими дымовыми, токсичными газами, которые способствуют парниковому эффекту на нашей планете;

- из дымовых газов промышленных предприятий исчезают различные выбросы так называемых «вредных газов» с компонентами S, Si, Ca, Mg, Na, K, Al и тяжелых металлов Fe, Pb, Zn, Ni, Cu.

К недостаткам использования газомоторного топлива на транспорте относится незначительное снижение мощности (не выше 10–15 %), в том числе на легковом транспорте. Использование газомоторного топлива (CH₄) вместо таких традиционных топлив, как бензин, дизельное топливо, мазут, на транспорте (морских судах, железнодорожных составах, воздушном транспорте, автотранспорте) открывает поистине огромные перспективы в области снижения антропогенного воздействия на окружающую среду. Ведь в газомоторном топливе концентрация метана достигает 99,9 %, отсутствуют соединения серы, тяжелые металлы, свойственные другим видам топлив. Это стало решающим в выборе газомоторного топлива (CH₄) как самого экологически чистого вида топлива современности. Западные страны Евросоюза, США, Канада, Китай и др. на государственном уровне создали условия для широкого внедрения газомоторного топлива во всех сферах народного хозяйства, учитывая минимальную концентрацию в дымовых газах углекислого газа (CO₂) [10, 11].

Исходя из антропогенного воздействия каждого вида наиболее используемых топлив на окружающую среду, себестоимости и коэффициента полезного действия, использование газомоторного топлива стало альтернативой другим видам топлива на ближайшие 50 лет.

Широкое распространение газомоторного топлива позволит решить не только проблемы дымовых токсичных газов, выбрасываемых с промышленных предприятий и транспорта и негативно воздействующих на окружающую среду, появляются возможности использовать нефть (смесь самых разных углеводородов) не в качестве топлива, а как сырье химической промышленности для производства самых разнообразных изделий, веществ с заданными свойствами.

При окислении газомоторного топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) или дизельных двигателях в цилиндропоршневой группе на стенках отсутствуют какие-либо образующиеся отложения (характерные для ДВС), установлено, что износ цилиндропоршневой группы уменьшается примерно в два раза.

Принципиально все типы судов можно перевести на СПГ, но его использование в качестве судового топлива представляется более привлекательным и выгодным для определенных групп судов. Это зависит от следующих показателей:

- *время работы в зонах контроля выбросов*. Особенно выгодно для судов, работающих в зонах контроля выбросов, которые подпадают под самые строгие правила по загрязнению воздуха. Они представляют хорошую окупаемость капиталовложений по переводу на СПГ. Суда,

которые соответствуют данному показателю, – это танкеры, суда для генеральных грузов, контейнеровозы, паромы и круизные суда, проводящие определенное время в зонах контроля выбросов;

– *суда прибрежного плавания и местные суда*. Данные типы судов предназначены для работы в определенной зоне или гавани, например паромы, буксиры и офшорные служебные суда. В зависимости от того, находится ли район или порт их операций в зонах контроля выбросов, эти типы судов могут работать постоянно в соответствии с самыми строгими правилами в отношении загрязнения воздуха;

– *чувствительность к стоимости топлива*. Для судов, эксплуатационные расходы и капитальные затраты которых ниже, чем затраты на топливо, экономия затрат на топливо может быстро уравновесить инвестиции, необходимые для установки оборудования СПГ;

– *вместимость для размещения топливного оборудования СПГ*. Одной из наиболее важных проблем использования СПГ в качестве топлива является большой размер топливных баков СПГ, поскольку они требуют больше места (примерно в 3–4 раза), чем эквивалентные судовые резервуары для дизельного топлива;

– *стоимость и доступность СПГ*. Цена и доступность СПГ варьируются в зависимости от региона, поскольку большая часть объектов по бункеровке СПГ находится в зонах контроля выбросов. Суда, работающие на СПГ, такие как танкеры, контейнеровозы, автовозы и балкеры, должны учитывать наличие СПГ в их действующих портах, а также правила и методы бункеровки;

– *возможность переоснащения*. Модернизация существующих судов требует значительных инвестиций. Тем не менее некоторые группы судов имеют значительный потенциал для модернизации и переводу судна на СПГ, поскольку новое строительство стоит в определенных регионах довольно высоко;

– *перспективы обновления флота*. Этот вопрос, прежде всего, связан с ужесточением правил ИМО по выбросам в окружающую среду. Предполагается, что некоторые типы судов будут иметь соответствующий рост и спрос на использование СПГ в качестве судового топлива. Ожидается, что в связи с их эксплуатационными характеристиками количество морских обслуживающих судов, контейнеровозов и нефтеналивных танкеров, работающих на СПГ, значительно увеличится;

– *линейные суда*. Количество лайнеров и трамповых судов варьируется среди разных типов судов. Из-за нераспространенности инфраструктуры СПГ во всем мире суда, обслуживающие линейные перевозки, более подходят для работы на СПГ, поскольку они функционируют между фиксированными портами;

– *чувствительность к количеству выбросов в окружающую среду*. Двигатели, работающие на СПГ, способствуют снижению выбросов выхлопных газов, позволяя выполнять экологически безопасные операции. В настоящее время некоторые сегменты судоходства, такие как круизные или пассажирские суда, находятся в поиске экологически чистых ценностей и рассматривают использование СПГ в качестве судового топлива.

Суда с эксплуатационными характеристиками, соответствующими вышеупомянутым показателям, будут иметь высокий потенциал для перевода на СПГ.

Для дальнейших научных исследований мы используем элементы корреляционно-регрессионного анализа. Если в ходе работы будет известно, что изменение одного явления вызвано изменениями другого (на основе аналитической группировки и дисперсионного метода), т. е. установлена существенная причинная связь, то целесообразно использование термина «корреляционная зависимость», в другом случае следует употребить термин «корреляционная связь».

Существует и функциональная связь между явлениями. Функциональные связи всегда имеют то или иное математическое выражение, в то время как корреляционная связь может иметь математическое выражение «в среднем», а не в каждом отдельном случае. Таким образом, выбираем план работы:

1. Устанавливаем результативный признак (y) и факторные (x_1, x_2, \dots, x_n). Например, результативным признаком можно выбрать внедрение газомоторного топлива, а факторными – снижение мощности, воздействие выбросов, износ цилиндрической группы, затраты на установку и т. д.;

2. Осуществляем проверку информации на однородность и нормальность распределения. Однородность совокупности определяется коэффициентом вариации, который не должен превышать 33 %;

3. Устанавливаем наличие и направление корреляционной зависимости между результативным признаком на основе аналитической группировки. Все единицы совокупности разбиваются на группы по факторному признаку, и в каждой группе рассчитывается средняя величина результативного признака. Данные этой группировки можно изобразить графически, построив линию регрессии. Так, можно судить не только о наличии, но и о форме корреляционной связи;

4. Определяем степень тесноты связи и оценку ее существенности.

Теснота парной корреляции измеряется коэффициентом корреляции r – при линейной корреляции, корреляционным отношением η – при линейной и криволинейной зависимости:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}};$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_2^2}}.$$

Коэффициент корреляции может принимать значение в пределах от -1 до $+1$. Знак указывает на направление связи. Абсолютная величина иллюстрирует силу связи: чем ближе к 1 , тем сильнее связь.

Квадрат коэффициента корреляции, называемый коэффициентом детерминации, иллюстрирует, на сколько процентов изменение результата обусловлено изменением фактора.

На практике могут быть использованы и другие показатели определения тесноты связи, например коэффициент Фехнера:

$$K_{\phi} = \frac{C - H}{C + H},$$

где C – число совпадений знаков отклонений наблюдаемых значений случайных величин от их средних значений; H – число несовпадений знаков отклонений наблюдаемых значений случайных величин от их средних значений.

Коэффициент Фехнера целесообразно использовать для установления факта наличия связи при небольшом объеме исходной информации.

После определения тесноты связи выполняется построение модели связи, т. е. уравнение регрессии;

5. Определить тип уравнения регрессии можно, исследуя зависимость графически, на основе группировки. Так, если результативный и факторный признаки возрастают примерно одинаково, то это свидетельствует о том, что связь между ними линейная; если один признак увеличивается, а другой неравномерно уменьшается, то связь гиперболическая. Если с увеличением значений фактора результативный признак сначала растет, а потом снижается, то связь параболическая.

Для определения параметров используется метод наименьших квадратов. Решаем систему нормальных уравнений.

Для линейной связи система нормальных уравнений будет следующей:

$$\begin{cases} na + b \sum x = \sum y; \\ a \sum x + b \sum x^2 = \sum xy. \end{cases}$$

В качестве меры достоверности уравнения корреляционной зависимости будем использовать процентное отношение средней квадратичной ошибки и уравнения S к среднему уровню результативного признака \bar{y} :

$$\frac{S}{\bar{y}} = 100\%, \text{ где } S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - p}}.$$

Если это отношение не превышает $10-15\%$, то будем считать, что уравнение регрессии достаточно эффективно отображает изучаемую взаимосвязь;

6. Для сравнения роли различных факторов в формировании результата определяются коэффициенты эластичности:

$$\varepsilon_i = b_i \frac{\bar{X}}{\bar{Y}}.$$

Коэффициент эластичности иллюстрирует, на сколько процентов в среднем изменится результат с изменением фактора на 1 %.

Таким образом, выбрав признаки и исследуя их методом корреляционно-регрессионного анализа, мы можем получить достоверную картину взаимосвязи между выбранными признаками, определить степень тесноты связи, определить роль каждого фактора и его влияние на результативный признак.

Обсуждение и сопоставление данных

Преимущества СПГ по сравнению с другими топливами:

– более стабильная работа двигателя транспорта (октановое число СПГ – не менее 110) и теплотехнического оборудования для генерации энергии, т. к. молярная доля метана, согласно ГОСТ Р 56021-2014, должна быть не менее 99 %;

– отсутствие масштабных проблем при авариях судна на море, следствием которых всегда является антропогенное воздействие на окружающую среду из-за разлива топлива (печного топлива, дизельного топлива, мазута) [1];

– себестоимость СПГ как минимум в два раза меньше, чем дизельного топлива, используемого преимущественно как основное топливо на дизельных генераторах;

– сжиженный природный газ не токсичен и не агрессивен, является криогенной жидкостью без цвета и запаха и при атмосферном давлении кипит при -161 °С, а по степени воздействия на организм человека пары СПГ относятся к веществам 4-го класса опасности, т. е. это малоопасное вещество.

Первые шаги в РФ по переводу танкеров на СПГ сделали в 2011 г. ПАО «Совкомфлот» и компания Shell Western LNG B. V. (Shell), которые подписали соглашение о поставках СПГ в качестве топлива для серии первых в мире танкеров типоразмера «Афрамекс», которые будут работать на газомоторном топливе [11]. В планах ФГУП «Атомфлота» – строительство четырех ледоколов на СПГ (рис. 2).



Рис. 2. Танкер Bit Viking, переведенный на СПГ-топливо в 2011 г. [12]

Основная проблема внедрения СПГ как топлива в масштабах РФ на речном, морском, железнодорожном и автотранспорте – отсутствие координирующего центра (с соответствующими инвестициями). Попытки некоторых компаний (ООО «Газпромнефть Марин Бункер») строить суда-бункеровщики СПГ и соответствующую инфраструктуру пока не привели к прорыву в этом направлении (рис. 3).

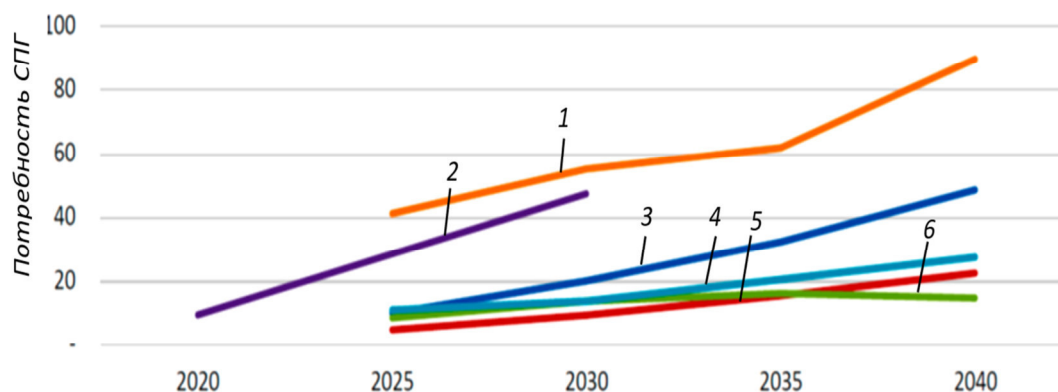


Рис. 3. Прогнозы спроса на СПГ для бункеровки судов (2020–2040 гг.) [1]:
 1 – зафиксирован максимум Ллойда (2017 г.); 2 – прогнозы аналитиков (2017 г.);
 3 – автономный международный орган в рамках новой политики (2018 г.);
 4 – зафиксирован минимум Ллойда (2017 г.);
 5 – автономный международный орган в рамках текущей политики (2018 г.);
 6 – автономный международный орган в рамках устойчивого развития (2018 г.)

В действительности строительство новых судов на СПГ-топливе шаг за шагом набирает обороты в мире. Прогнозируемая газомоторная революция становится реальностью. Российская Федерация обладает огромными месторождениями природного газа, и кораблестроение с сохранившимся научно-техническим потенциалом имеет хорошие перспективы для развития, возрождения судостроения в направлении локализации производств, выпускающих основную оснастку судов.

Перечисленные промышленно значимые проекты (табл.) доказывают, что к 2030 г. в Арктике имеются реальные возможности генерировать до 70 млн т СПГ в год [4–6], а при соответствующем координирующем центре возможно превратить Арктику в экологически благополучную зону.

Существующие и возможные проекты в ближайшем будущем по генерации СПГ в Арктической зоне РФ

Название проекта	Инициатор проекта	Местоположение производства	Мощность предприятия, тыс. т/г.
Балтийские проекты:			
КС Портовая	ООО «Газпром»	Финский залив – Балтийское море	1 500
Порт Высоцк	АО «Газпромбанк»		2 000
«СПГ-Горская»	ООО «СПГ-Горская»		1 800
«Балтийский СПГ»	ООО «Газпром»	Усть-Луга	10 000
«Калининградский СПГ»	АО «Криогаз»	Балтийское море	150
«Норильский СПГ»	АО «Норильскгазпром»	Норильск	2 000
Арктические проекты:			
«Печора СПГ»	ПАО «НК Роснефть», Alltech	Баренцево море – порт Индига	5 000
«Ямал СПГ»	ПАО «НОВАТЭК»	Порт Сабетта	17 000
«Арктик СПГ-2»	ПАО «НОВАТЭК»	Гыданский полуостров, Карское море	33 000

* Составлено по [13–17].

Учитывая богатства Севера РФ, которые освоены не более чем на 10 %, и реализованные проекты по СПГ, у нашей страны имеются все возможности защитить свои интересы и запретить судоходство по Северному морскому пути судам, не использующим экологически чистое топливо (СПГ), при этом одновременно наращивать темпы перевода своего флота на газомоторное топливо.

Перевод судов на сжиженный природный газ: коммерческая и эксплуатационная составляющие

Выбор конкурентоспособного судна практически определяется ставкой фрахта и предлагаемой платой за тайм-чартер. Другими словами, при прочих равных условиях – чем ниже фрахтовая ставка, тем выше вероятность аренды для рейсов. На рынке тайм-чартеров фрахтователи руководствуются не только арендой, но и потреблением с заданной скоростью. Это означает, что владельцы заинтересованы в предоставлении энергоэффективных судов, т. е. судов с более низкой удельной стоимостью топлива. Следовательно, сравнение судов, работающих на обычном топливе и СПГ, должно основываться на производстве требуемой энергии и рыночной цене для одинаковых скорости, вместимости и параметров рейса.

Структура затрат на морскую перевозку:

1. Капитальные затраты, связанные с финансированием и приобретением судна;
2. Эксплуатационные расходы, связанные с обеспечением мореходности судна (укомплектование персоналом, смазочные материалы, запчасти, запасы, административные дела и т. д.);
3. Расходы на рейс, связанные с конкретным рейсом или поездкой туда и обратно (портовые и каналные сборы, бункеры и расходы на погрузочно-разгрузочные работы).

Ожидается, что капитальные затраты для судов, работающих на СПГ, будут выше, чем для судов, работающих на традиционном топливе, из-за более дорогой силовой установки и связанной с ней технологией. Самым большим фактором затрат на дополнительные требуемые инвестиции для всех судов является резервуар для СПГ. Дополнительные капитальные затраты могут варьироваться от 5 до 20 млн долл. США, в зависимости от объемов бака и двигателя.

Как и у большинства технологий, по мере того, как на рынок выходит все больше поставщиков и разрабатываются более специализированные и рентабельные технологии, ожидается, что затраты на топливную систему будут снижаться. Как правило, общие дополнительные затраты на судно, работающее на СПГ (в основном применимы для торговых судов, таких как балкеры, контейнеровозы и танкеры), составляют 15–30 % от стоимости постройки нового судна обычного типа.

Хотя внедрение технологии СПГ влияет на операционные расходы, информация с описанием конкретных изменений, публикуемая в академических и профессиональных источниках, ограничена. Поскольку экипаж двигателя определяется на основе установленной мощности (в л. с. или кВт), можно предположить, что никаких изменений в количестве людей, занятых движущей силой, не ожидается. Предполагается, что разница в эксплуатационных расходах, связанных с экипажем, техническим обслуживанием и ремонтом судов, работающих на СПГ, и судов, работающих на традиционном топливе, незначительна.

Поскольку стоимость конкретного рейса зависит от портовых и каналных сборов, сборов за погрузочно-разгрузочные работы и расходов на топливо, ожидаются существенные различия в структуре затрат для судов, работающих на СПГ, и судов, работающих на обычном топливе. Если предположить, что сборы за погрузочно-разгрузочные работы схожи, внимания требуют две другие категории.

Во-первых, ожидается, что портовые сборы будут гораздо ниже для судов, соблюдающих требования ИМО по выбросам в окружающую среду [18]. Во-вторых, сопоставимая цена на топливо для судов, работающих на СПГ, ниже.

Таким образом, конкурентоспособность судов, работающих на СПГ, по сравнению с судами, работающими на обычном топливе, зависит от различий в капитальных затратах (Кап) и расходах на рейс (Рейс). Присвоив индекс 1 судам, работающим на обычном топливе, 2 – судам, работающим на СПГ, можно вывести следующие расчеты для аналогичных судов, если все другие условия, такие как вместимость, рейс и т. д., будут одинаково конкурентоспособными [19]:

$$\text{Опер}_1 + \text{Кап}_1 + \text{Рейс}_1 = \text{Опер}_2 + \text{Кап}_2 + \text{Рейс}_2;$$

$$\text{Кап}_1 + \text{Рейс}_1 = \text{Кап}_2 + \text{Рейс}_2, \quad (1)$$

т. к. $\text{Опер}_1 = \text{Опер}_2$; если $\text{Кап}_2 = (1 + k) \cdot \text{Кап}_1$, где k является наценкой нового судна, работающего на СПГ, тогда уравнение (1) можно переписать:

$$\text{Кап}_1 + \text{Рейс}_1 = (1 + k) \cdot \text{Кап}_1 + \text{Рейс}_2 \Rightarrow \text{Рейс}_1 - k \cdot \text{Кап}_1 = \text{Рейс}_2. \quad (2)$$

Уравнение (2) подразумевает, что путевые расходы судна, работающего на СПГ, должны компенсировать наценку за приобретение. Разбивание расходов на рейс на погрузочно-разгрузочные работы, портовые сборы и стоимость топлива, принятие следующих условий:

$$\text{Рейс}_1 = \text{Порт}_1 + \text{Топливо}_1 + \text{Груз}_1;$$

$$\text{Рейс}_2 = \text{Порт}_2 + \text{Топливо}_2 + \text{Груз}_2;$$

$$\text{Порт}_2 = (1 - m) \cdot \text{Порт}_1;$$

$$\text{Топливо}_2 = (1 - n) \cdot \text{Топливо}_1;$$

$$\text{Груз}_1 = \text{Груз}_2$$

позволяют уравнение (2) переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Порт}_1 + \text{Топливо}_1 - k \cdot \text{Кап}_1 &= \text{Порт}_2 + \text{Топливо}_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow m \cdot \text{Порт}_1 + n \cdot \text{Топливо}_1 &= k \cdot \text{Кап}_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает условие, при котором оба типа судов одинаково конкурентоспособны. Это выражение также может побудить органы власти к предоставлению стимулов, поскольку m как скидка для судов с уменьшенным уровнем выбросов оценивается и определяется на основе двух факторов: наценки, уплаченной за приобретение судна, работающего на СПГ, и разницы в цене бункеровки СПГ по сравнению с обычными бункерами:

$$m \cdot \text{Порт}_1 + n \cdot \text{Топливо}_1 = k \cdot \text{Кап}_1 \Rightarrow m = (k \cdot \text{Кап}_1 - n \cdot \text{Топливо}_1) / \text{Порт}_1. \quad (4)$$

Вопрос, который также может иметь финансовые последствия, – это потеря грузового пространства из-за установки на борту резервуаров для СПГ. Это соображение относится как к новым судам, так и к модернизированным. Из различных типов судов группа нефтеналивных танкеров и танкеров-химовозов обеспечивает наибольшую гибкость при установке и модернизации резервуаров для СПГ, поскольку не требуется никаких серьезных изменений. Резервуары СПГ можно разместить на палубе, где будет достаточно места. Контейнеровозы и суда типа RORO также могут относительно легко размещать резервуары для СПГ. Как и в случае с нефтеналивными танкерами и танкерами-химовозами, установка резервуаров для СПГ и их модернизация возможны, но влекут за собой следствие в виде потерянных грузовых мест. Резервуар для СПГ будет занимать место контейнеров, что нежелательно с коммерческой точки зрения, поскольку снижает полезное доступное для использования пространство. Навалочные и генеральные грузовые суда сталкиваются с самой большой проблемой с позиции размещения резервуаров для СПГ. Резервуары объемом более 600 м³ потребуют значительных модификаций надстройки для размещения.

Суда обеспечения платформ жертвуют большим количеством грузового пространства под палубой, где обычно размещаются резервуары, что окажет влияние на их финансовые показатели. Более того, на большинстве этих судов устанавливаемые дизельные двигатели являются четырехтактными, их модернизация стоит дорого. Во многих случаях стоимость модернизации может быть близка к стоимости установки нового двигателя, что делает инвестиции менее привлекательными. Для небольших пассажирских судов размещение цистерны под СПГ будет проблематичным, и в некоторых случаях установка цистерны СПГ на борту может оказаться невозможной. На более крупных пассажирских судах палубное пространство можно было бы использовать для размещения цистерн СПГ, хотя и за счет уменьшения вместимости или доступного пространства для пассажиров.

Вследствие требований к пространству для установки резервуаров СПГ разумно ожидать, что суда, работающие на СПГ, могут быть немного больше, чем суда, работающие на обычном топливе, для размещения того же груза. Следовательно, энергоэффективность, обеспечиваемая использованием СПГ в качестве судового топлива, обязательно связана со снижением вместимости. Однако это снижение является существенным.

Заключение

Скачкообразное увеличение количества населения [16] на планете привело к промышленной революции, последствиями чего стало глобальное потепление, загрязнение почвы, огромные выбросы вредных веществ из различных технических устройств в воздух и катастрофическое загрязнение вод Мирового океана. Тем не менее для человека еще существует возможность совместить свои интересы с бережным использованием природных ресурсов.

Ужесточение мер по исключению или минимизации негативного воздействия человечества на окружающий мир, в первую очередь, является объективной жизненной необходимостью, связанной с множеством рисков.

Поиск экологически чистой энергии с минимальными выбросами вредных веществ в окружающий мир в настоящее время также является актуальной проблемой человечества. Принятые ИМО меры по ужесточению экологических требований на море для нас должны быть руководством к действию, тем более в РФ уже имеются проекты по генерации СПГ в Арктике. Если АО «Объединенная судостроительная корпорация» своевременно запустит проектирование и строительство судов с арктическим классом на газомоторном топливе в необходимом количестве с одновременной локализацией производств для выпуска оснастки судов и в РФ примут соответствующие законодательные акты по недопущению в воды Арктики судов с выбросами серы и других вредных (парниковых) веществ, это будет важным шагом в процессе защиты воздушного пространства Арктики от вредных выбросов, а также в обеспечении защиты интересов российских компаний, генерирующих газомоторное топливо, судостроителей, учитывая, что для Северного морского пути нужны будут не только новые суда – газовозы для СПГ, но и танкеры для перевозки нефти, руды, леса, угля, контейнеровозы и множество мелких судов-буксиров класса Arc4 – Arc7. Кроме того, принятые меры способствовали бы открытию новых производств по выпуску обвязки судов с инновационными технологиями, с появлением новых рабочих мест.

На основе статистического анализа стоимости энергии выгода от использования СПГ с позиции соотношения цены и потребления энергии очевидна: снижение стоимости энергии достаточно, чтобы компенсировать наценку за приобретение судов, работающих на СПГ.

Проведенные исследования, согласно уравнению (4), проиллюстрировали условие для оценки конкурентоспособности судов, работающих на СПГ, с учетом принятой структуры затрат коммерческих судов. Используя данную формулу или подход, заинтересованные стороны могут оценивать стимулы, необходимые для продвижения СПГ в качестве судового топлива прозрачным способом, который может быть настроен для различных типов судов. Государство, руководствуясь этим подходом, может также стимулировать судовладельцев субсидиями на портовые сборы для судов с уменьшенным уровнем выбросов.

Переход на экологически чистое газомоторное топливо судов – это объективная необходимость на ближайшее 50 лет, и чем быстрее это осознают судостроители, тем меньше у них в будущем составят эксплуатационные издержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патин С. А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. Библиотека ВНИРО, 2008. 508 с. URL: <http://dspace.vniro.ru/handle/123456789/1264> (дата обращения: 17.04.2021).
2. Самые загрязненные реки России. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c8930777951ff00b405a92f/samye-zagriaznennye-reki-rossii-5c89412128941b00b4b28407> (дата обращения: 05.11.2020).
3. Климентьев А. Ю., Книжников А. Ю. Методика оценки запрета использования мазута в Арктической зоне Российской Федерации. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 21 с.
4. Климентьев А. Ю., Книжников А. Ю., Григорьев А. Ю. Перспективы и возможности использования СПГ для бункеровки в арктических регионах России. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. 60 с.
5. Книжников А. Ю., Климентьев А. Ю. Перевод арктического флота с мазута на сжиженный природный газ (СПГ). Россия в окружающем мире // Судостроение в Арктике: дискус. материалы к междунар. конф. (Архангельск, июнь, 2019 г.). Архангельск: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2019. 29 с.
6. Климентьев А. Ю., Книжников А. Ю. Потенциал газификации Арктической зоны Российской Федерации сжиженным природным газом (СПГ). М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 86 с.

7. Климентьев А. Ю., Митрова Т. А., Собко А. А. и др. Среднетоннажный СПГ в России: между небом и землей. М.: Изд-во Москов. шк. упр. Сколково, 2018. 102 с.
8. US Coalbed Methane: Past, Present, Future / U.S. Energy Information Administration. URL: http://www.eia.gov/oil_gas/tpd/cbmusa2.pdf (дата обращения: 09.11.2020).
9. Ventilation air methane (VAM) // B&W MEGTEC. 2014. URL: <http://www.megtec.com/ventilation-air-methane-vam> (дата обращения: 09.11.2020).
10. Mingxun J., Hu Aimer Wang Zhuping. China United Coalbed Methane Corporation Ltd. Analysis on current status and development trend of China's coalbed methane resources. Proceedings. The 8th International Conference on Northeast Asian Natural Gas and Pipeline: Multilateral Cooperation (Shanghai, China, 2004, 8–10 March). China, Shanghai, 2004. P. 75–85.
11. LNG Supply Chains and the Development of LNG as a Shipping Fuel in Northern Europe. Oxford Institute for Energy Studies, 2019. URL: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/01/LNG-supply-chains-and-the-development-of-LNG-as-a-shipping-fuel-in-Northern-Europe-NG-140.pdf> (дата обращения: 11.12.2020).
12. Anders Hermansson. Case: Tanker ship Bit Viking. LNG Conversion for environmental sustainability. Wärtsilä, 2012. URL: https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/services-documents/learning-center/references/services-reference-tarbit-shipping.pdf?sfvrsn=600ee245_0 (дата обращения: 11.12.2020).
13. Residuals bunker fuel ban in the IMO Arctic waters. An assessment of costs and benefits. Delft, CEDelft, August 2018. URL: <https://www.cedelft.eu/en/publications/2165/residuals-bunker-fuel-ban-in-the-imo-arctic-waters> (дата обращения: 11.12.2020).
14. Heavy Fuel Oil use in the IMO Polar Code Arctic Summarized by Flag State, 2015. Prepared for: European Climate Foundation, February 2018. URL: <https://www.hfofreearctic.org/wp-content/uploads/2018/03/Briefing-1-HFO-use-in-2015-by-flag-states.pdf> (дата обращения: 18.12.2020).
15. Impact Assessment methodology and the proposed ban on HFO and carriage as fuel by ships operating the Arctic. HFO-Free Arctic, October 2018. URL: <https://www.hfofreearctic.org/en/2018/10/18/pre-mepc-73-media-briefing-on-ban-on-use-and-carriage-of-heavy-fuel-oil-use-by-ships-in-the-arctic/> (дата обращения: 11.12.2020).
16. Alternative fuels in the Arctic - a report generated for PAME. DNV GL 2019. URL: <https://www.pame.is/document-library/shipping-documents/heavy-fuel-oil-documents/452-report-on-the-environmental-economic-technical-and-practical-aspects-of-the-use-by-ships-in-the-arctic-of-alternative-fuels-1/file> (дата обращения: 17.12.2020).
17. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ 18.09.2008 № Пр-1969). URL: <https://rg.ru/2009/03/30/arktika-osnovy-dok.html> (дата обращения: 08.09.2020).
18. Арабова З. М., Арабов М. Ш., Прохоров Е. М., Саадати П. А. Проблемы и пути снижения антропогенного воздействия на воды Мирового океана // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 3. С. 41–47.
19. Рудакова Р. П., Букин Л. Л. Практикум по статистике. СПб.: Питер Пресс, 2017. 287 с.

Статья поступила в редакцию 29.04.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зарема Михайловна Арабова – младший научный сотрудник лаборатории инструментальных методов и органических реагентов; Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук; Россия, 119991, Москва; zarema.polymer@gmail.com.

Михаил Шугеевич Арабов – канд. хим. наук, доцент; доцент кафедры судомеханических дисциплин; Каспийский институт морского и речного транспорта им. генерал-адмирала Федора Матвеевича Апраксина, филиал Волжского государственного университета водного транспорта; Россия, 414000, Астрахань; arabov57@mail.ru.

Аида Абаевна Волкова – канд. экон. наук; доцент кафедры высшей и прикладной математики; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; aida1979@mail.ru.

Пейванд Ахмад Саадати – ассистент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; peyvand@inbox.ru.



ANALYSIS OF CONVERSION OF WATER TRANSPORT ENGINES TO LIQUEFIED NATURAL GAS

Z. M. Arabova¹, M. Sh. Arabov², A. A. Volkova³, P. A. Saadati³

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Caspian Institute of Sea and River Transport after General-Admiral F. M. Apraksin,
branch of Volga State University of Water Transport, Astrakhan, Russian Federation

³ Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The article considers the problems of preservation and the most economical use of existing energy sources with minimal emissions into the environment, which are urgent in modern conditions. Tightening measures to exclude or minimize the negative impact on the nature is an objective vital necessity for the survival of humanity on the planet. The search for the most environmentally friendly fuel is an important task for researchers in various fields of modern science. The measures of the International Maritime Organization (IMO) on tightening the environmental requirements at sea and the advantages of the conversion of transportation means, including ships, from black oil to liquefied natural gas are outlined. It has been stated that since 01.01.2020 IMO has put forward the requirements for the sulfur concentration in the initial fuel up to 0.5%. The sulfur content in marine fuels is illustrated, according to the current standards. Possible advantages for the Russian Federation are considered in the event that appropriate legislative acts are adopted in the field of shipbuilding and the operation of ships. The advantages of liquefied natural gas compared to other fuels are listed. The forecast values of the demand for liquefied natural gas for bunkering ships for 2020–2040 are illustrated. Research has been carried out and a formula has been derived to determine the conditions for the transition of ships to liquefied natural gas. Existing and possible in the near future projects for the generation of liquefied natural gas in the Arctic zone of Russia are considered. It is concluded that the Russian Federation has vast deposits of natural gas and scientific and technical potential for the development and revival of shipbuilding both within the country and abroad.

Key words: clean fuels, environmental impacts, liquefied natural gas, oceans, methane, ships, emission control.

For citation: Arabova Z. M., Arabov M. Sh., Volkova A. A., Saadati P. A. Analysis of conversion of water transport engines to liquefied natural gas. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3:60-73. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-60-73.

REFERENCES

1. Patin S. A. *Neftianye razlivy i ikh vozdeistvie na morskuiu sredu i bioresursy* [Oil spills and their impact on marine environment and bioresources]. Biblioteka VNIRO, 2008. 508 p. Available at: <http://dspace.vniro.ru/handle/123456789/1264> (accessed: 17.04.2021).
2. *Samye zagriaznennye reki Rossii* [Most polluted rivers in Russia]. Available at: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c8930777951ff00b405a92f/samye-zagriaznennye-reki-rossii-5c89412128941b00b4b28407> (accessed: 05.11.2020).

3. Kliment'ev A. Iu., Knizhnikov A. Iu. *Metodika otsenki zapreta ispol'zovaniia mazuta v Arkticheskoi zone Rossiiskoi Federatsii* [Methodology for assessing ban on using fuel oil in Arctic zone of Russian Federation]. Moscow, Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF), 2018. 21 p.
4. Kliment'ev A. Iu., Knizhnikov A. Iu., Grigor'ev A. Iu. *Perspektivy i vozmozhnosti ispol'zovaniia SPG dlia bunkerovki v arkticheskikh regionakh Rossii* [Prospects and possibilities of using LNG for bunkering in Arctic regions of Russia]. Moscow, Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF), 2017. 60 p.
5. Knizhnikov A. Iu., Kliment'ev A. Iu. *Perevod arkticheskogo flota s mazuta na szhizhennyi prirodnyi gaz (SPG). Rossiia v okruzhaiushchem mire. Sudostroenie v Arktike* [Transfer of Arctic fleet from fuel oil to liquefied natural gas. Russia in outside world. Shipbuilding in Arctic]. *Diskussionnye materialy k mezhdunarodnoi konferentsii (Arkhangel'sk, iun', 2019 g.)*. Arkhangel'sk, Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF), 2019. 29 p.
6. Kliment'ev A. Iu., Knizhnikov A. Iu. *Potentsial gazifikatsii Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii szhizhennym prirodnyim gazom (SPG)* [Potential of gasification of Arctic zone of Russian Federation with liquefied natural gas]. Moscow, Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF), 2018. 86 p.
7. Kliment'ev A. Iu., Mitrova T. A., Sobko A. A. i dr. *Srednetonnazhnyi SPG v Rossii: mezhdu nebom i zemlei* [Medium-tonnage LNG in Russia: between heaven and earth]. Moscow, Izd-vo Moskovskaia shkola upravleniia Skolkovo, 2018. 102 p.
8. *US Coalbed Methane: Past, Present, Future*. U.S. Energy Information Administration. Available at: http://www.eia.gov/oil_gas/rpd/cbmusa2.pdf (accessed: 09.11.2020).
9. *Ventilation air methane (VAM)*. B&W MEGTEC, 2014. Available at: <http://www.megtec.com/ventilation-air-methane-vam> (accessed: 09.11.2020).
10. Mingxun J., Hu Aimer Wang Zhuping. China United Coal bed Methane Corporation Ltd. Analysis on current status and development trend of China's coalbed methane resources. *Proceedings. The 8th International Conference on Northeast Asian Natural Gas and Pipeline: Multilateral Cooperation (Shanghai, China, 2004, 8–10 March)*. China, Shanghai. P. 75-85.
11. *LNG Supply Chains and the Development of LNG as a Shipping Fuel in Northern Europe*. Oxford Institute for Energy Studies, 2019. Available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/01/LNG-supply-chains-and-the-development-of-LNG-as-a-shipping-fuel-in-Northern-Europe-NG-140.pdf> (accessed: 11.12.2020).
12. Anders Hermansson. *Case: Tanker ship Bit Viking. LNG Conversion for environmental sustainability*. Wärtsilä, 2012. Available at: https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/services-documents/learning-center/references/services-reference-tarbit-shipping.pdf?sfvrsn=600ee245_0 (accessed: 11.12.2020).
13. *Residuals bunker fuel ban in the IMO Arctic waters. An assessment of costs and benefits*. Delft, CEDelft, August 2018. Available at: <https://www.cedelft.eu/en/publications/2165/residuals-bunker-fuel-ban-in-the-imo-arctic-waters> (accessed: 11.12.2020).
14. *Heavy Fuel Oil use in the IMO Polar Code Arctic Summarized by Flag State, 2015*. Prepared for: European Climate Foundation, February 2018. Available at: <https://www.hfofreearctic.org/wp-content/uploads/2018/03/Briefing-1-HFO-use-in-2015-by-flag-states.pdf> (accessed: 18.12.2020).
15. *Impact Assessment methodology and the proposed ban on HFO and carriage as fuel by ships operating the Arctic*. HFO-Free Arctic, October 2018. Available at: <https://www.hfofreearctic.org/en/2018/10/18/pre-mepc-73-media-briefing-on-ban-on-use-and-carriage-of-heavy-fuel-oil-use-by-ships-in-the-arctic/> (accessed: 11.12.2020).
16. *Alternative fuels in the Arctic - a report generated for PAME*. DNV GL 2019. Available at: <https://www.pame.is/document-library/shipping-documents/heavy-fuel-oil-documents/452-report-on-the-environmental-economic-technical-and-practical-aspects-of-the-use-by-ships-in-the-arctic-of-alternative-fuels-1/file> (accessed: 17.12.2020).
17. *Osnovy gosudarstvennoi politiki Rossiiskoi Federatsii v Arktike na period do 2020 goda i dal'neishuiu perspektivu (utv. Prezidentom RF 18.09.2008 № Pr-1969)* [Fundamentals of state policy of Russian Federation in Arctic for period up to 2020 and beyond (approved by the President of the Russian Federation on September 18, 2008 No. Pr-1969)]. Available at: <https://rg.ru/2009/03/30/arktika-osnovy-dok.html> (accessed: 08.09.2020).
18. Arabova Z. M., Arabov M. Sh., Prokhorov E. M., Saadati P. A. Problemy i puti snizheniia antropogenogo vozdeistviia na vody Mirovogo okeana [Problems and ways of reducing anthropogenic impact on ocean waters]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2019, no. 3, pp. 41-47.
19. Rudakova R. P., Bukin L. L. *Praktikum po statistike* [Workshop on statistics]. Saint-Petersburg, Piter Press, 2017. 287 p.

The article submitted to the editors 29.04.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zarema M. Arabova – Junior Researcher of the Laboratory of Instrumental Methods and Organic Reagents; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences; Russia, 119991, Moscow; zarema.polymer@gmail.com.

Mikhail Sh. Arabov – Candidate of Chemical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Marine Engineering Disciplines; Caspian Institute of Sea and River Transport after General-Admiral F. M. Apraksin, branch of Volga State University of Water Transport; Russia, 414000, Astrakhan arabov57@mail.ru.

Aida A. Volkova – Candidate of Economics; Assistant Professor of the Department of Higher and Applied Mathematics; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; aida1979@mail.ru.

Peyvand Ahmad Saadati – Assistant of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; peyvand@inbox.ru.

