

Проблемы развития специализированного флота России: энергетический аспект



И. И. Костылев,
доктор техн. наук,
профессор, заведующий
кафедрой теплотехники,
судовых котлов
и вспомогательных
установок, президент
Государственного
университета морского
и речного флота (ГУМРФ)
им. адм. С. О. Макарова



М. К. Овсянников,
доктор техн. наук,
профессор кафедры
теплотехники, судовых
котлов и вспомогательных
установок, ГУМРФ
им. адм. С. О. Макарова

Возрастающий международный интерес к энергоресурсам Арктики может стать стимулом к развитию российского судостроения. Одна из сложнейших задач, связанных с освоением арктического шельфа, — морская транспортировка сжиженного природного газа, развивающееся производство которого в арктических регионах может увеличить грузопоток по Северному морскому пути до 50 млн т в год. Государственную программу освоения арктического шельфа невозможно выполнить без специализированного флота, способного работать в арктических условиях и сконструированного с применением самых современных технологий.

Еще пять лет тому назад, в условиях глубокой депрессии отечественных судоходства, судостроения и тяжелого машиностроения, на правительственном уровне было принято политическое решение о создании «Объединенной судостроительной корпорации» (ОСК). В соответствии с Указом Президента В. В. Путина от 22.02.2007 г. в материалах совместного заседания Госсовета и Морской коллегии 02.05.2007 г. была заявлена необходимость построить 375 судов общей стоимостью около 640 млрд руб. (около 20 млрд долл.) [1].

Предполагалось, что бюджетные средства будут направлены на «разработку, проектирование, производство, поставку, гарантийное и сервисное оборудование, модернизацию, ремонт, утилизацию судостроительной техники военного и гражданского назначения». Было запланировано «строительство сооружений для освоения континентального шельфа в интересах государственных и иных заказчиков, включая иностранных, а также внедрение новых технологий и разработок в области судостроения».

Уже одно это довольно беспорядочное перечисление направлений деятельности ОСК дает основание усомниться в возможной ее эффективности. «Адмиралтейскими верфями» (Санкт-Петербург) были выполнены лишь единичные заказы «Совкомфлота»: ряд танкеров-продуктовозов класса MR, два челночных арктических танкера «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров», способных самостоятельно работать в ледовом поле толщиной до 1,2 м. Выборгский судостроительный завод также по заказу «Совкомфлота» обеспечил поставку до 90 % металлоконструкций для постройки серии судов-снабженцев «Витус Беринг» совместным предприятием ОСК и STX (Финляндия). «Совкомфлот» приобрел два газовоза, «Гранд Анива» и «Гранд Елена», вместимостью 150 тыс. куб. м каждый. При этом ОСК создала на правах дочерних акционерных обществ региональных субхолдингов, 100 % акций которых находится в федеральной собственности: ОАО «Западный центр



судостроения» (Санкт-Петербург), «Северный центр судостроения и судоремонта» (Северодвинск Архангельской области), «Дальневосточный центр судостроения и судоремонта» (Владивосток). Субхолдинги есть, судостроения пока нет. Суда по-прежнему строятся за рубежом.

Возможно, что в 2013 г. дело сдвинется с мертвой точки. К тому есть стимул государственного значения, о существовании которого, впрочем, было известно и раньше: о нем говорили и делали ответственные заявления на всех уровнях управления народным хозяйством и страной, вплоть до Президента и Председателя Правительства РФ. Этот стимул — международное обострение политико-экономического интереса к освоению Арктики.

В частности, на последнем в 2012 г. заседании Морской коллегии при Правительстве РФ с ее председателем, первым заместителем Председателя Правительства РФ Д. О. Рогозиным обсуждался круг проблем, связанных с национальными интересами России в Арктическом регионе, защита и всестороннее обеспечение которых гарантирует стране суверенитет и экономическую независимость. Поскольку Арктика — это прежде всего океан, полноценное решение любой арктической проблемы невозможно без самого активного участия в нем флота. Без специализированного для арктических условий флота не может быть выполнена обширная государственная программа освоения арктического шельфа с его богатейшими энергоресурсами.

Построение транспортно-технологической системы

Мировой морской транспорт ежегодно перевозит 2,5 млрд т нефтяных грузов — это 90 % перевозок углеводородов, т. е. мировая экономика обеспечивается энергией в основном танкерным флотом (6 тыс. судов общим дедвейтом 400 млн т).

«Совкомфлот» входит в пятерку ведущих танкерных компаний мира. Флот компании насчитывает 156 судов общим дедвейтом 12 млн т. Более трети этого состава — суда ледового класса. При этом в настоящее время и в перспективе «Совкомфлот» только на 35 % обслуживает российскую грузовую базу. Остальные 65 % — грузы иностранных

фрахтователей (Gasprom Global LNG, Royal Dutch Shell, СИБУР).

Включился в эксплуатацию «Витус Беринг» — пионер серии многофункциональных ледокольных судов-снабженцев, предназначенный для обслуживания добывающих платформ в рамках проекта «Сахалин-1» [2].

Стратегия «Совкомфлота» — 2017 предусматривает развитие перевозок сжиженного природного газа (СПГ) при одновременном расширении обслуживания предприятий и установок по добыче углеводородов на континентальном шельфе, особенно в ледовых и сложных климатических условиях.

С одной стороны, по авторитетным оценкам [2], грузопоток по Северному морскому пути (СМП) может достигнуть 50 млн т в год, из них основную часть составят грузы энергетического профиля, главным образом СПГ, индустрия которого в арктических регионах от Штокмановского месторождения до шельфовых разработок на Ямале пока только начинает развиваться. Для сравнения: установившийся грузопоток СПГ с «Сахалином-2» равен 10 млн т в год, т. е. составляет лишь пятую часть планируемого грузопотока по СМП.

С другой стороны, реализация этого грузопотока с СПГ неминуемо столкнется с необходимостью предварительного преодоления ряда трудностей, начиная с навигационных и дорогостоящих дноуглубительных работ, установки специализированных терминалов и заканчивая строительством завода по сжижению природного газа с его инфраструктурами и установкой грузообработывающего оборудования и т. п. В общем предварительном анализе возможных реалий построения транспортно-технологической системы (ТТС, [3]) и при выборе ее целесообразного варианта не должен быть упущен ни один из многочисленных факторов. Различными аспектами такого анализа и проблемой в целом уже несколько лет (с 2002 г.) занимаются большие группы специалистов известных заинтересованных корпораций и институтов: Крыловского государственного научного центра, ЦНИИМФ, Газпрома — по Штокмановскому месторождению в Баренцевом море (с 2002 г.), Новатэка — по месторождениям на шельфе Ямала (с 2005 г.), СН Инвеста — по Печорскому шельфу (с 2008 г.).

Наиболее передовым проектом ТТС следует, вероятно, считать Штокманов-

ский, но и его реализация откладывается. Между тем в дальнейших работах, в том числе организационного характера, может быть широко и детально использован норвежский опыт строительства и 5-летней эксплуатации комплекса Snohvit по добыче, сжижению и морской транспортировке СПГ [4] в арктических условиях. Это месторождение природного газа около острова Мелькья находится в Баренцевом море в непосредственной близости от Штокмановского. Более того, возможно, что для бюджета РФ и Газпрома целесообразно сдать Штокмановское месторождение в концессию, если соответствующий договор будет приемлемым для Норвегии и, например, для норвежской корпорации Statoil (подобный опыт у нашей страны и Газпрома уже есть).

Безусловно, успех в организации и технологическом обеспечении добычи, производства и морского экспорта СПГ был бы недостижим без активного участия зарубежных компаний, обладающих подобным опытом и материально-инженерной основой, которые позволили реализовать проект «Сахалин-2» во всех его деталях. Штокмановский проект, не говоря уже о других арктических проектах, заметно сложнее «Сахалин-2» во всех отношениях.

Тип судна для транспортировки СПГ следует выбирать, оценивая возможность его круглогодичной работы в ледовом поле 2-метровой толщины (в проекте Новатэка) при дедвейте 75–80 тыс. т, длине 300 м, ширине 50 м с осадкой до 12 м. Очевидно, что для вывоза хотя бы 6 млн т в год на плече Териберка — Роттердам при скорости хода 18 узлов понадобятся три LNGC (liquefied natural gas carrier) такой вместимости и более дюжины фидерных LNGC меньшей вместимости и соответственно меньшего габарита, но усиленной ледопроеходимости, специально оборудованных под перегрузку СПГ на плаву на крупнотоннажный LNGC после прохождения основных ледовых полей. Фидерные суда могут быть построены на верфях Санкт-Петербурга и Северодвинска, после того как те освоят специальные технологии производства криогенных танков. В настоящее время российское судостроение такими технологиями фактически не располагает.

Нет у нашей страны и опыта перегрузки СПГ с судна на судно на плаву. Его приобретение — как и приобретение соответствующего оборудования с

современной электронной (цифровой) техникой управления и регулирования работой агрегатов — тоже представляет собой актуальную организационную и техническую проблему.

Современная система реконденсации

Надо отметить, что морская транспортировка СПГ технически сложнее и дороже морских перевозок любых других грузов, даже если осуществляется не в арктических широтах. Проявившаяся после 2000 г. тенденция увеличения вместимости и соответственно габарита и стоимости LNGC объяснялась стремлением снизить удельную цену транспортной составляющей в общей цене СПГ.

В авторитетных российских публикациях 2012 г. [3] отмечается, что разработка и внедрение современной ТТС транспортировки сжиженного газа, по крайней мере со Штокмановского месторождения (с фидерными челноками) и с Восточного побережья Сибири (Сабетта, Харасавэй), потребует рассмотрения проектов будущих магистральных газопроводов вместимостью до 350 тыс. куб. м с осадкой 20–25 м. Их грузовая система сложна как в схеме, так и технологически. Некоторое представление об этом дает краткое описание наиболее современных бортовых реконденсационных установок (РУ) [5] на теплоходах Q-Flex и Q-Max, обеспечивающих полный возврат в танки испаряющегося груза (BOG — Boil of Gas). Обе системы являются результатом длительной интенсивной работы соответствующих подразделений Qatargas 2 и Exxon Mobil.

Основой проектных разработок послужила известная информация о возможной скорости объемного выхода пара чистого метана из танков LNGC на уровне Boil of Rate, BOR = 0,14 %/сутки. Можно считать, что реальное значение BOR зависит от ряда меняющихся факторов, включая погоду, состояние моря, температуру окружающей среды, состояние судна и изоляции танков, режимы работы судна. Например, сразу после погрузки, в процессе продолжающегося снижения температуры стенок танка, BOR может в 1,5 раза превысить расчетное значение. Еще большие всплески значения BOR могут возникать в связи с существенными нарушениями изоляции стенок танка или в условиях какого-либо подвода к танку теплоты, вплоть до аварийного. Последние случаи проектирования РУ, естественно, не рассматриваются. Непревышение номинального (расчетного) давления в куполе танка обеспечивается надежной работой предохранительного клапана с необходимым запасом площади проходного сечения в нем. Отметим, что в аварийном случае интенсивного испарения и сверхвысокого значения BOR простой отвод газа в котел (при отсутствии РУ) не спасает положения без использования предохранительного клапана, стравливающего BOG в атмосферу. Дополнительно следует отметить — возможно, не в пользу РУ, — что последняя, по сравнению с отводом пара груза в котел, несравненно более чувствительна к изменению величины BOR и требует в судовой эксплуатации надежной системы автоматического регулирования режима работы всех предметно составляющих ее компонентов. Понятно, почему на первых LNGC большой вместимости (например, Jamal) РУ устанавливалась наряду с паровой турбиной в качестве главного двигателя. Все эти факторы, включая требования по обеспечению безопасности автоматического контроля и управления, должны быть учтены в проектах и при постройке LNGC с РУ в соответствии с положениями Газового кодекса ИМО и Между-

народной ассоциации классификационных обществ (МАКО).

Специалисты Qatargas 2 и Exxon Mobil дополнительно разработали следующие спецификационные требования к производству и эксплуатации бортовых РУ:

- бортовая РУ должна иметь практически удвоенную производительность для проектной полной реконденсации естественно испаряющегося в любом грузовом рейсе метана из всех судовых танков;
- вся вращающаяся техника РУ должна иметь двойной запас мощности;
- в системе РУ должен быть предусмотрен в качестве резерва агрегат для сжигания пара груза, сообщающийся в случае необходимости с куполами танков.

Безусловно, фактором, оказывающим значительное влияние на режим работы элементов РУ, является состав груза, в частности присутствие в нем азота: больше азота в поставленном грузе в жидкой фазе — относительно в еще большем количестве он будет присутствовать в куполе танка. При отводе испаряющегося груза в топку котла этот фактор не имеет, по сути, никакого значения, тогда как в РУ он обуславливает наличие специального сепаратора и приемника неконденсирующегося газа.

Азот как хладагент (рефрижерант) в бортовой РУ, наряду с другими положительными свойствами, не токсичен, не горюч и может в нужном количестве производиться в судовых условиях в азотных генераторах с электроприводом с небольшим расходом электроэнергии.

Система реконденсации для судов Qatargas 2 поставляется двумя различными компаниями: Hamworthy Gas Systems (HGS) для газопроводов Q-Flex и Cryostar — для Q-Max. Теплотехническая основа систем реконденсации для судов Qatargas 2 одинакова, однако имеются конструкционные различия, которые требуют более детального рассмотрения.

Реконденсационная установка HGS Mark I System

На рис. 1 приведена принципиальная схема Hamworthy потоков реконденсируемого пара груза (BOG) и азота, участвующего в процессе в качестве хладагента. Пар груза из купола по трубопроводу (1) танка поступает в предварительный охладитель (2), откуда забирается двухступенчатым компрессором (3). Сжатый в нем газ подается на криогенную платформу (4) с установленным на ней трехканальным теплообменником (5). Охлажденный в нем низкотемпературным азотом уже в жидкой фазе BOG поступает в сепаратор, из верхней газовой части которого оставшийся в нем после азотного теплообменника пар через дроссель поступает либо обратно в купол танка, либо отводится в агрегат для сжигания (обычно в топку вспомогательного котла).

Небольшая часть BOG в жидкой фазе через трехходовой кран (7) через дроссель (8) уходит на предварительный охладитель (2), а его основная часть через дроссель (9) как конденсат поступает в грузовую танк. Весь ход пара груза от купола танка до его возвращения в танк обеспечивается работой компрессора (3). Азотный цикл РУ обеспечивает работа трехступенчатого компрессора (10) с промежуточными охладителями. Сжатый в нем азот по трубопроводу (11) направляется в трехходовой противоточный теплообменник (5), после которого охлажденный для дальнейшего сжижения метан поступает в расширительную турбину — экспандер (12). На выходе из нее с необходимо низкой температурой конденсат азота по трубопроводу (13) в качестве главного хладагента (рефри-

жеранта) направляется в криогенный теплообменник (5). На схеме показан резервуар (14), в котором под давлением выше давления, создаваемого компрессором (10), содержится резервный запас азота для компенсации возможных потерь в азотном цикле РУ.

Предварительный охладитель (2), как видно на рис. 1, встроенный в вертикальный цилиндрический коллектор для сбора тяжелых компонентов конденсата, предотвращает их попадание в компрессор (3). Охлажденный в нем BOG сжимается в двухступенчатом центробежном компрессоре Atlas Copco примерно до 4,5 бара. Облопатывание сужающейся проточной части обеих ступеней регулирует поток в зависимости от интенсивности парообразования в танках (BOR). Сжатый газ входит в криогенный охладитель (5), где охлаждается азот в противоточном оребренном пластинчатом теплообменнике. Трехпроточный теплообменник поставляется Nordon Gryogenic. В нем одновременно с охлаждением до реконденсации пара груза (BOG) осуществляется предварительное (перед экспандером (12)) охлаждение сжатым трехступенчатым компрессором (10) азотом в азотном цикле РУ. Сконденсированный в теплообменнике метан, как отмечалось ранее, попадает в сепаратор (6), из которого в жидкой фазе уходит через трехходовой кран (7) в танк с давлением, регулируемым дросселем (9). Криогенный теплообменник и сепаратор komponуются на одном фундаменте термоизолированного отсека (4) во избежание (или по крайней мере снижения) протечек теплоты в систему реконденсации груза.

Азотный отсек РУ HGS Mark I System поставляется компанией Atlas Copco. Поступающий из криогенного теплообменника азот с давлением порядка 13,5 бара в трехступенчатом компрессоре (10) сжимается до 57 баров и проходит, как видно

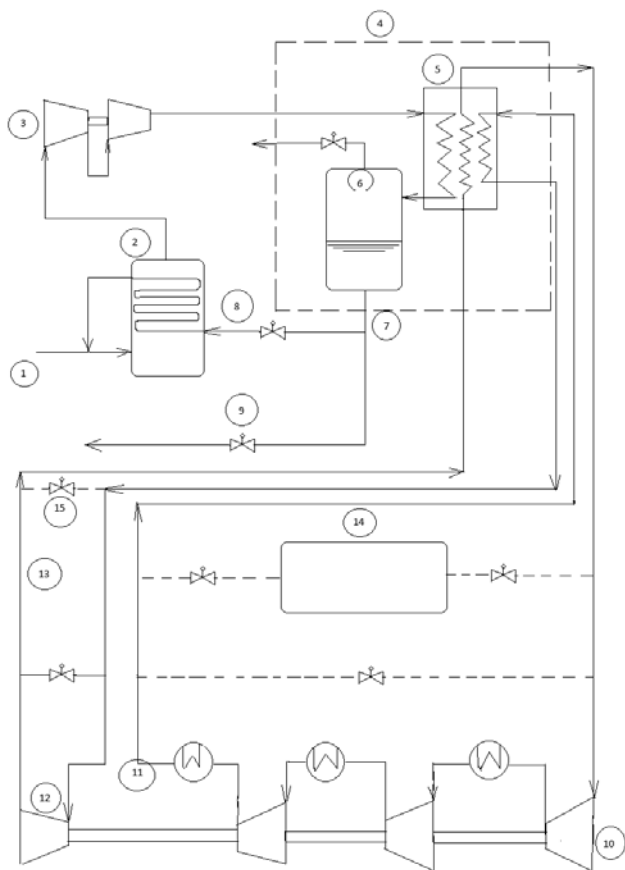


Рис. 1. Схема реконденсации испаряющегося в танках метана (РУ) Hamworthy (HGS Mark I System)

на рис. 1, через три охлаждаемых пресной водой охладителя, после чего в трехходовом криогенном охладителе он охлаждается примерно до -110°C . Далее в расширительной турбине (12) (expander), эта температура понижается до $-163...-165^{\circ}\text{C}$ для реконденсации метана (BOG) в трехходовом криогенном теплообменнике (5).

Степень эффективности азотного цикла РУ (холодопроизводительность) регулируется массовым содержанием в нем азота, т. е. его дополнением или изъятием в цикле за счет соответствующего изменения давления на линии ступеней компрессора (10) в совокупности с азотным резервуаром высокого давления (14) (рис. 1). На судне этот толстостенный цилиндр устанавливается на палубе. Азот производится на судне специальной установкой, очищается и высушивается перед сжатием в специальном многоступенчатом компрессоре, подающим его в резервуар (14). Кроме этого способа, холодопроизводительность азотного цикла может регулироваться изменением профиля проточной части расширительной турбины поворотом лопаток на входе в импеллер, а также частичным байпасированием подачи азота на экспандер (15). Разворотом лопаток импеллера экспандера можно пользоваться для быстрого относительного подогрева самого экспандера, во избежание конденсации азота на выходе из него в случае быстрого протекания процесса расширения его в проточной части.

Реконденсационная установка HGS Mark I System способна обеспечить скорость переработки испаряющегося в танках метана на уровне 6 т/ч. В максимальном случае для LNGC вместимостью 300 тыс. куб. м при BOR = 0,15 %/сут часовой выход пара составит 9,6 т/ч = 2,6 кг/с. При максимальной производительности (т/ч) РУ HGS Mark I System общая потребляемая мощность электроприводов составляет 5,8 МВт.

Реконденсационная установка Cryostar Ecorel

Все газовозы Qatargas 2 Q-Max оборудованы реконденсационными установками Eco Rel, поставляемыми фирмой Cryostar SAS. Перед тем как было принято решение об установке этой системы, она получила сертификацию от компаний Qatargas и Exxon Mobil. Принципиальная ее схема (рис. 2) не имеет существенных отличий от только что рассмотренной схемы HGS Mark I System.

Пар метана из грузовых танков поступает в двухступенчатый центробежный компрессор с промежуточным охладителем (2), прокачиваемым частью отработавшего в главном конденсаторе (5) рефрижеранта (N_2) и отводимым на промежуточный охладитель (2) в трехходовом кране (4) через дроссель (3). Основная часть рефрижеранта прокачивает теплообменник (6), в котором осуществляется предварительное охлаждение всей массы выходящего из танков метана после компрессора (4) перед поступлением его в главный конденсатор (5). Из него конденсат BOG поступает либо через трехходовой кран (7) и дроссель (8) напрямую в танк, либо в сепаратор (18). Из верхней части объема сепаратора оставшийся пар метана отводится через дроссель (11) в танк или в агрегат сжигания. Конденсат из сепаратора через отдельный дроссель (9) уходит в трубопровод слива его в танк. Так замыкается метановый цикл РУ.

Главный конденсатор (5) в системе Ecorel — двухходового противоточного типа, в отличие от трехходового в HGS Mark I System. Отработавший в главном конденсаторе криогенный азот продолжает работать в качестве рефрижеранта в про-

мохладителе (2) компрессора (1) и предварительном охладителе (6). Соединившись через трехходовой кран (12) в один поток, азот поступает в противоточный оребренный пластинчатый теплообменник (13) (производитель — Linde), в котором продолжает свою работу как рефрижерант по отношению к азоту, поступающему к нему в противоток от трехступенчатого компрессора (14) с промежуточными охладителями (15) и (16). Из теплообменника (13) азот для завершения штатного охлаждения уходит в расширительную турбину (экспандер) (17), откуда с температурой $-163...-165$ °С направляется в главный противоточный конденсатор. Как видно на схеме (рис. 2), небольшая часть азотного хладагента, регулируемая дросселем (3), после главного конденсатора через трехходовой кран уходит на проохладитель (2) между ступенями главного метанового компрессора (1). Основная часть азота идет в предшествующий главному конденсатору (5) теплообменник (6). После него азот возвращается в главный азотный компрессор (14). На этом завершается азотный цикл РУ (цикл компандера). В азотном цикле, как и в компандере HGS, имеется отдельный (вне общего фундамента) прочный контейнер с запасом азота для компенсации возможных утечек в соединениях трубопровода под высоким давлением.

Процессы в агрегатах РУ с азотным циклом с различными ступенями сжатия метана представлены диаграммой на рис. 3.

Что касается номинальной массовой производительности по реконденсации системы Cryostar Ecorel, то она примерно такая же, как у HGS Mark I System, для метана, по стандарту Qatar 2 LNG, и может быть обеспечена на уровне 7 т/ч. При этом на газовозах Q-Max интенсивность роста парообразования (BOR) при прочих равных условиях считается несколько более высокой из-за больших размеров судна. Потребная мощность

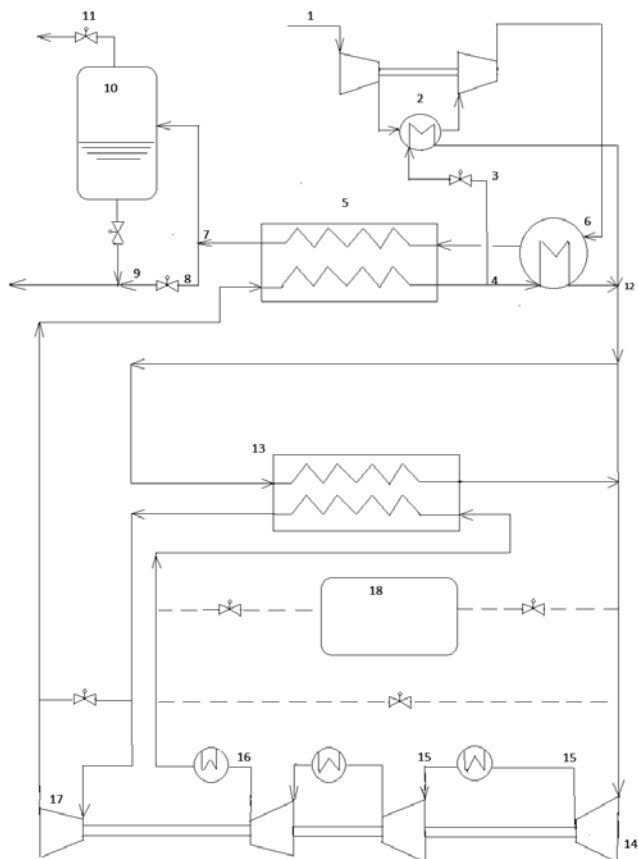


Рис. 2. Принципиальная схема РУ Cryostar Ecorel

приводов на номинальном проектном режиме работы Ecorel несколько выше 6 МВт.

Настройка и испытания

Последовательное описание процессов в агрегатах обеих систем РУ демонстрирует необходимость оснащения их сложной, отлаженной и надежной системой автоматического контроля и регулирования с большим числом контролируемых и регулируемых характеристик в многочисленных местах расположения датчиков (температуры, давления, расхода), а также возможность настройки их на необходимую холодопроизводительность с учетом всех данных о грузе и условий его морской перевозки, включая перегрузочные операции. Например, в простейших случаях обеспечения сравнительно низкой холодопроизводительности может быть целесообразно в азотном цикле байпасировать расширительную турбину с ее регулируемым импеллером. Вероятны даже случаи отсутствия необходимости повторного сжижения испарившегося груза (BOG), когда в азотном цикле может быть отключен (байпасирован) противоточный теплообменник (13).

При выборе материала элементов конструкции и в процессе эксплуатации следует иметь в виду определенную вероятность конструкционного разрушения теплообменника (появления трещин или ненормальных деформаций в теплопередающих пластинах или трубах и т. п.). Во всяком случае, при эксплуатации к такого рода возможности следует относиться настороженно, особенно в условиях смены температурного режима работы. Скорость изменения температуры должна быть по возможности минимальной. При этом в случаях, когда давление в танках поднимается выше нормы, в самом начале этого процесса автоматически должен включаться второй метановый компрессор и, если массовая реконденсация находится на номинальной отметке, избыточный выход также автоматически переключается на агрегат его сжигания. Если холодильный отсек (HGS) или компандер (Cryostar Ecorel) находятся не в рабочем состоянии, метановые компрессоры автоматически подают пар испарившегося груза (BOG) из куполов танка непосредственно на агрегат сжигания. То же самое происходит и в случае чрезмерного выхода пара при нормальном процессе реконденсации в номинальном режиме (автоматически включается резервный компрессор с подачей от него BOG в агрегат сжигания). В балластном переходе РУ работает при выходе пара из танков со скоростью 2 т/ч с полной его реконденсацией и возвращением в танк в жидкой фазе.

Системы автоматического контроля и управления на судах Q-Flex и Q-Max поставляются фирмами Honeywell и Kongsberg Maritime. Их установке предшествуют тщательный анализ взаимодействия агрегатов непосредственно РУ и их реакции на управляющие сигналы от системы автоматического контроля.

Первоначально эти исследования выполнялись на компьютерных моделях в лабораториях производителей, а окончательно настройка и испытания системы — на судах с участием специалистов Qatargas 2 и Exxon Mobil, в том числе в грузовых рейсах. Первой по такой большой и жесткой программе прошла испытание система полной автоматизации контроля и управления РУ HGS Mark I System для судов Q-Flex и только в 2010–2011 гг. — система для Cryostar Ecorel.

Бортовая РУ LNGC наряду с главным двигателем и его системами является энергопотребляющим комплексом, непосредственно выполняющим транспортную функцию LNGC. Для всестороннего технологического развития и конструкционно-

схемного совершенствования корпорации Qatargas 2 и Exxon Mobil прилагали различного рода усилия по всем направлениям.

Расчет энергоэффективности

Сложности установки и эксплуатации системы реконденсации сопровождаются не меньшей сложностью и высокой ценой танков LNGC, особенно мембранных призматических с вместимостью до 60 тыс. куб. м, с их основным материалом (прокатный, тонкостенный, гофрированный инвар с практически нулевым коэффициентом температурного деформирования — 36 % никеля в сплаве), изоляцией и внедренными грузовыми и контролирующими агрегатами и устройствами. Все это, соответственно, требует и новых форм учебно-практической подготовки квалифицированных кадров как в области судостроения, так и эксплуатации специализированного флота [8].

Теплотехнический анализ процессов парообразования в танках LNGC, агрегатах РУ и, в дальнейшем, использования пара метана в качестве топлива в судовой энергетической установке, позволил предложить общие критерии эффективности:

- танков: $\frac{V \rho_{ж} r}{k \Delta T A}$, с,
- где $V, \text{м}^3$ — объемная вместимость в

танке;
 $\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$ — плотность содержащегося в танке груза в жидкой фазе;
 $r, \text{Дж/кг}$ — его скрытая теплота парообразования;
 $k, \text{Вт/(м}^2 \dots \text{К)}$ — приведенный коэффициент теплопередачи через приведенную теплопередающую поверхность танка площадью $A, \text{м}^2$;

- LNGC в грузовом рейсе протяженностью $L, \text{м}$ со скоростью хода $S, \text{м/с}$:

$$(EC_{L,S}) = \frac{L}{S \cdot (ET)} = \frac{L}{(ET)} \left(\frac{A_d}{P_e} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где $P_e, \text{Вт}$ — мощность главного двигателя LNGC на гребном валу;
 $A_d, \text{кг/м}$ — пропульсивная постоянная, зависящая от многих факторов, включающих конструкционные и гидромеханические характеристики судна с винтом, состояние смачиваемых поверхностей, метеобстановку и т. п.

Как видно, критерий эффективности танка с определенным грузом определяет время τ_{total} необходимое для его полного испарения в заданных условиях рейса. Критерий эффективности LNGC оценивает относительную долю в этом времени (τ_{total}) и в тех же условиях времени конкретного рейса (τ_R). Различия в значениях (ET) для каждого из n отдельных танков в оценке $(EC_{L,S})$ при необходимости учитывается понятным выражением:

$$(ET)_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_{\Sigma}} (ET)_i \text{ при } M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i \text{ и } \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_{\Sigma}} = 1.$$

Очевидно также, что в рейсах одинаковой протяженности меньшее значение критерия $(EC_{L,S})$ при прочих равных условиях свидетельствует о большей эффективности LNGC. Полученные критерии эффективности танка и LNGC могут быть легко развиты раскрытием входящих в них характеристик для детального анализа влияния на экономическую эффективность LNGC, в том числе с различным выводом пара груза (в РУ, в судовой энергетической установке (СЭУ)).

Может быть введена дополнительная безразмерная оценка энергетической эффективности в соответствии с общим принципом введения понятия КПД, простым и не требующим какого-либо специального обоснования как отношение доставленной транспортом энергии с учетом энергетических затрат на доставку к количеству энергии в грузе, принятом на терминале экспортере:

$$E_{\Sigma} = \frac{Q_{\Gamma} - Q_{затр}}{Q_{\Gamma}} = 1 - \frac{Q_{затр}}{Q_{\Gamma}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i, затр}}{Q_{\Gamma}},$$

где $Q_{\Gamma} = M_{\Gamma} \cdot Q_{H}^0$; $Q_{затр} = g_e Q_{H,T}^0 \cdot \tau_L$ — оценки энергии груза в его массе ($M_{\Gamma}, \text{кг}$) и нижней теплотворной способности ($Q_{H}^0, \text{кДж/кг}$; g_e — удельный эффективный расход топлива на все приводы в LNGC, включая РУ на временной протяженности рейса τ_L).

В этом подходе к оценке эффективности морской перевозки СГ она может быть дифференцирована по компонентам (агрегатам) СЭУ. В этом случае определяется цена (роль) каждого компонента в энергозатратах перевозки СГ и выявляется степень целесообразности приложения усилий по повышению эффективности соответствующего i -го агрегата.

В оценке экономической эффективности морской перевозки СГ, естественно, должны быть в представленных выше выражениях учтены амортизационные расходы, связанные со всей организацией линии добычи и производства СГ, а также все текущие расходы в рейсе, включая содержание экипажа судна. Отметим, что критерии энергетической эффективности перевозки СГ (E_{Σ}) естественным образом зависят от продолжительности рейса грузового и балластного. При этом и удельная, т. е. отнесенная к единице времени величина E_{Σ} также оказывается в сложной зависимости от суммарного времени рейса.

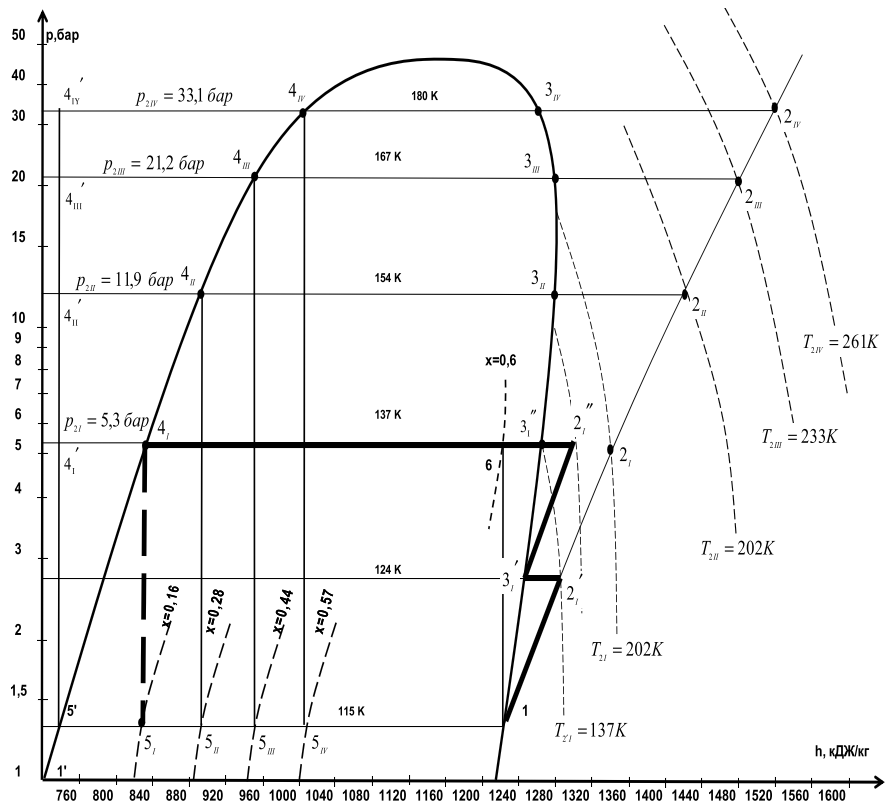


Рис. 3. Диаграмма метанового цикла с многоступенчатым компрессором

Экологический аспект

Принципиальной альтернативой реконденсации BOG является использование его в качестве топлива в главном двигателе LNGC. Этому вопросу в Газовом кодексе ИМО посвящена глава XVI, где в первом пункте (16.1) указано генеральное ограничение для морских судов: в СЭУ (в котлах, установках инертного газа, ГТУ и дизелях) как топливо может быть использован только метан. Это ограничение понятно: в одинаковых условиях по давлению и температуре метан значительно легче воздуха.

В конструкционном отношении использование метана (как и других алканов) в качестве котельного топлива не создает каких-либо дополнительных задач. Более того, в стационарных паротурбинных установках (районных электростанций) топливное оборудование котлов бывает исключительно мазутно-газовое. В отличие от судовых условий газ к форсункам поступает из сети регионального газопровода, и судовой вариант, за исключением требований к составу газа, никаких дополнительных условий не требует.

Экологические показатели судовых двигателей самого различного схемного и конструкционного исполнений определяются, главным образом, используемым в них топливом и максимальной температурой рабочего цикла. В настоящее время, после Монреальского, Киотского и других протоколов и конвенций, использование допускаемых на судах топлив нефтяного происхождения (IFO всех значений кинематической вязкости, т. е. практически всех номеров) при нормальном техническом состоянии и выполнении требований эксплуатации предполагает определенные допуски содержания вредных компонентов в отработавших газах, установленные международными документами. Дополнение к нефтяному топливу природного газа или полный переход на него в работе теплового двигателя при необходимости чистом составе газа изменяет экологические характеристики отходящих в атмосферу газов по сравнению со стандартным нефтяным топливом в лучшую сторону [6].

Альтернатива газозовам

Естественно, что при окончательном выборе ТТС в планировании экспорта СПГ должны быть учтены генеральные затраты на его производство, тем более для арктических месторожде-

ний типа Snohvit. В настоящее время в мире (в странах тропического пояса) насчитывается более 50 заводов по сжижению газа (Liquefaction Plant — LP) с нарастающим до кризиса темпом роста их количества. До 2015 г. предполагалось запустить два LP в Мурманске для переработки газа со Штокмановского месторождения с суммарной производительностью 12 млн т в год, т. е. больше производительности LP «Сахалин-2». С отсрочкой разработки Штокмана отодвигается и строительство заводов. Известно о планах США установки LP на Аляске.

В качестве принципиальной альтернативы газозовам с криогенным жидким грузом используются суда, перевозящие углеводороды (алканы, их дериваты и др.) в газовой фазе в специальных контейнерах под высоким давлением и одобренные классификационными обществами (DNV, ABS): VOTRANS, Coselle. Очевидными преимуществами этого морского транспорта газа является отсутствие в ТТС наиболее сложных и дорогостоящих терминальных сооружений: завода по сжижению газа и регазификационной станции. Недостаток обусловлен высоким давлением газа в содержащих его толстостенных емкостях любого конструкционного типа. Содержание собственно груза в них по массе не превышает обычно 20 %.

СПГ как топливо

Флот высоконапорных газозовов в настоящее время практически не развивается. Отчасти это обусловлено расширяющимся применением СПГ — его испаряющейся из танков части — в качестве топлива не только в котлах судовых паротурбинных установок, но и в главных и вспомогательных дизелях.

Инициатива здесь принадлежит финской дизелестроительной корпорации Wärtsilä (дизели W50DF и других размерностей). За последние годы производители малооборотных крейцкопфных дизелей выпускают их для эксплуатации на двойном топливе (DF — Dual Fuel: основное топливо — метан, а нефтяное топливо в качестве запального [5]). Такое использование СПГ становится обычным не только для газозовов класса LNGC, но и для морских транспортных судов любого назначения. В этом случае судно сертифицируется по современным нормам в отношении защиты окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу и получает

соответствующий паспорт EEDI (Energy Efficiency Design Index) и Enviro+ или GP (Green Passport) по классификации ABS.

Судостроительная отрасль США уже поставляет в эксплуатацию специализированные суда-заправщики (на плаву) сжиженным (криогенным) метаном. Его применение в качестве судового бункера целесообразно не только по экологическим, но и по экономическим соображениям: в настоящее время СПГ дешевле нефтяного топлива примерно на 20 %, и примерно настолько же больше его теплотворная способность.

Как заявил заместитель министра транспорта РФ В. А. Олерский в ходе российско-голландского круглого стола в Санкт-Петербурге 24 октября 2011 г., использование СПГ российскими судами ожидается к 2017–2018 гг., в этом направлении уже ведется работа [7]. В частности, в настоящее время проработан и внедряется проект перевода на СПГ топливной системы танкера «река — море» класса «Волго-Дон люкс». Главная проблема — специализированный топливный бункер с СПГ должен быть более чем вдвое объемнее, чем бункер для дизельного топлива. ■

Литература

1. Поляков В. Стратегия развития // Морские вести России. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2007. №№ 15–16.
2. Франк С., Малов С. Наше главное конкурентное преимущество — человеческий капитал и др. // Морской флот. 2012. № 6.
3. Збарашенко В. Еще один вариант ТТС для Арктики // Морской флот. 2012. № 6.
4. Костылев И. И., Овсянников М. К. Опыт арктического производства и транспорта сжиженного газа // Эксплуатация морского транспорта. СПб., ГМА им. адм. С. О. Макарова. 2010. № 3 (61).
5. Костылев И. И., Овсянников М. К. Реконденсационные установки LNGC большой вместимости // Эксплуатация морского транспорта. СПб., ГМА им. адм. С. О. Макарова. 2012. № 3 (69).
6. Костылев И. И., Овсянников М. К. Двойное топливо в современных судовых дизелях // Эксплуатация морского транспорта. СПб., ГМА им. адм. С. О. Макарова. 2013. № 1 (71).
7. Олерский В. А. Севморпуть — полный порядок // Морской флот. 2012. № 6.
8. Давыденко А. А. Отраслевые вузы: эффективность за счет реорганизации // Морской флот. 2012. № 6.