

УДК 621.59; 665.727.004; 539.4; 533.24

Г.К. Лавренченко, С.Г. ШвецУкраинская ассоциация производителей технических газов «УА-СИГМА», а/я 271, г. Одесса, Украина, 65026
e-mail: uasigma@paco.net

ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВОК ОЖИЖЕНИЯ И РЕКОНДЕНСАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Рост спроса на сжиженный природный газ (СПГ) обуславливает постоянное совершенствование схем установок и необходимого для их создания специального оборудования. Приведены схемы СПГ-комплексов малой и высокой тоннажности, описаны особенности входящих в их состав элементов. Рассматривается машинное оборудование, применяемое при производстве, транспортировании и хранении СПГ. Особое внимание уделяется специальному оборудованию, разрабатываемому для использования преимущественно в СПГ-комплексах.

Ключевые слова: Природный газ. Сжиженный природный газ (СПГ). Дроссельный вентиль. Жидкостный детандер. Парожидкостный детандер. Регазификация. Реконденсация. СПГ-установка.

G.K. Lavrenchenko, S.G. Shvets

EFFICIENT MACHINERY FOR LIQUEFACTION AND RECONDENSATION OF NATURAL GAS

Growing demand on liquefied natural gas (LNG) causes continuous improvement of units schemes and special equipment necessary for their production. Low and large-tonnage schemes of LNG-complexes have been given and their components have been described. Machinery used during production, shipment and storage of LNG has been examined. It is paid much attention to the special equipment developed for its use mainly in LNG-complexes.

Keywords: Natural gas. Liquefied natural gas (LNG). Throttle valve. Liquid expander. Steam-and-liquid expander. Regasification. Recondensation. LNG-unit.

1. ВВЕДЕНИЕ

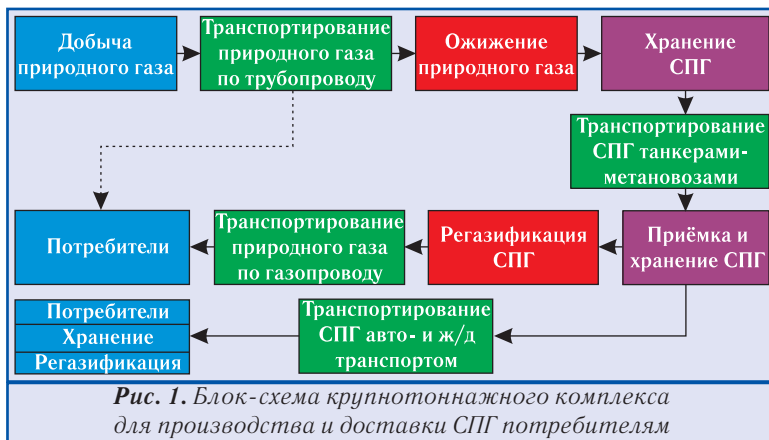
Природный газ является основным энергоносителем в топливном балансе большинства стран мира. Это объясняется высокой технологичностью и эффективностью процессов в промышленности и в быту, реализуемых на его основе. Природный газ представляет собой ценное сырьё для многочисленных химических технологий, в частности, производства аммиака, карбамида, метанола, синтетических топлив и др. Однако его запасы распределены неравномерно и поэтому возникает необходимость в транспортировании его от мест добычи к потребителям.

Доказано, что наиболее выгодный способ доставки природного газа — транспортирование его в сжиженном виде. Преимущества сжиженного природного газа (СПГ) перед сжатым газом очевидны. Это, во-первых, возможность его транспортирования на большие расстояния с использованием различных видов транспорта (морского, автомобильного или железнодорожного). Во-вторых, для средств транспортирования СПГ характерны более выгодные соотношения массы тары к её вместимости. СПГ — универсальный энергоноситель, который в кратчайшее время может

быть доставлен потребителям для использования его в качестве котельного топлива, сырья для различных синтез-процессов и производства моторного топлива.

Первая промышленная установка по производству СПГ была сооружена в 1941 г. в Кливленде (США) для покрытия суточных пиковых нагрузок потребления газа в зимнее время (так называемый «пикшейвинг»). В СССР аналогичный процесс был освоен в 1954 г. В 1964 г. в г. Арзеве (Алжир) был пущен в эксплуатацию первый крупный завод по сжижению природного газа, поставляемого в Англию и Францию. Газ с месторождений Сахары поступал по трубопроводу на завод, сжижался там и далее уже в жидком виде транспортировался по морю на остров Канвей (в устье Темзы) и в Гавр. Именно с этого момента СПГ стал восприниматься в мире как один из основных видов энергоносителей и как эффективный продукт для его транспортирования на большие расстояния.

По мере того как возрастали объёмы производства СПГ, увеличивался тоннаж танкеров-метановозов и стационарных ёмкостей для его хранения, непрерывно внедрялось новое, более эффективное и надёжное машинное оборудование, применяемое при производстве, транспортировании, хранении и рега-



зификации СПГ. Причём, большая часть этого оборудования специфична и поэтому его разработка проводилась специально для условий работы в составе СПГ-комплексов.

Рассмотрим новые образцы машинного оборудования, применяемого при производстве, хранении и транспортировании СПГ и позволяющего существенно снизить энергоёмкость указанных процессов. Подробнее остановимся на компрессорном и расширительном оборудовании.

2. МАШИННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СПГ-КОМПЛЕКСОВ

Прежде чем касаться машинного оборудования СПГ-установок необходимо указать место его в комплексе для производства и транспортирования СПГ. В общем виде такой комплекс характеризуется рис. 1.

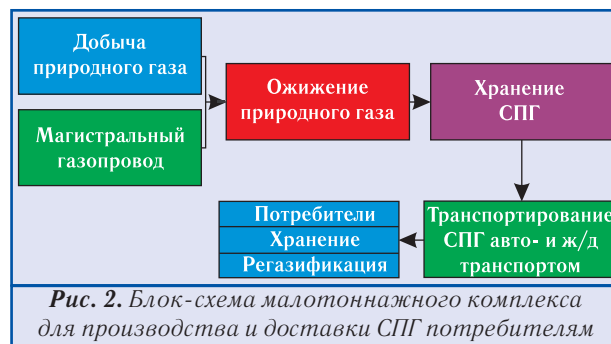
Пунктиром на рис. 1 обозначена доставка природного газа потребителям посредством газопроводов. Такой способ транспортирования природного газа является наиболее простым с точки зрения применяемого машинного оборудования, но требует больших затрат энергии на его прокачку по протяжённым газопроводам. Поэтому он становится невыгодным при удалении потребителей природного газа от мест его добычи более чем на 2000 км. Для упрощения на блок-схеме не показан комплекс подготовки природного газа (газоперерабатывающий завод), обязательно предшествующий дальнейшему трубопроводному транспортированию природного газа. В случае производства СПГ подготовку природного газа организуют вблизи ожижительной установки.

Блок-схема (см. рис. 1) предусматривает добычу природного газа, транспортирование его по газопроводам к ожижительным установкам, размещаемым преимущественно на побережье, дальние перевозки больших количеств СПГ танкерами-метановозами с последующей его доставкой потребителям в сжиженном или газообразном виде. Наиболее сложными элементами этой цепочки являются ожижительная установка и сопутствующие ей база хранения СПГ с экспортным терминалом, средства транспортирования, т.е. танкеры-метановозы, и импортный терминал с базой хранения и системой регазификации СПГ. Крупные импортные терминалы также имеют значитель-

ный парк компрессорного оборудования, предназначенного для конденсации паров СПГ, образующихся при его хранении и перегрузке. Аналогичные установки, хотя и меньшей мощности, используются на танкерах-метановозах. Во всех случаях применяется достаточно сложное оборудование, в том числе мощные турбокомпрессоры и турбодетандеры.

В случае небольших установок существенно упрощается их машинное и аппаратное оформление. Блок-схема комплекса по производству и транспортированию СПГ на базе малотоннажных ожижи-

тельных установок показана на рис. 2.



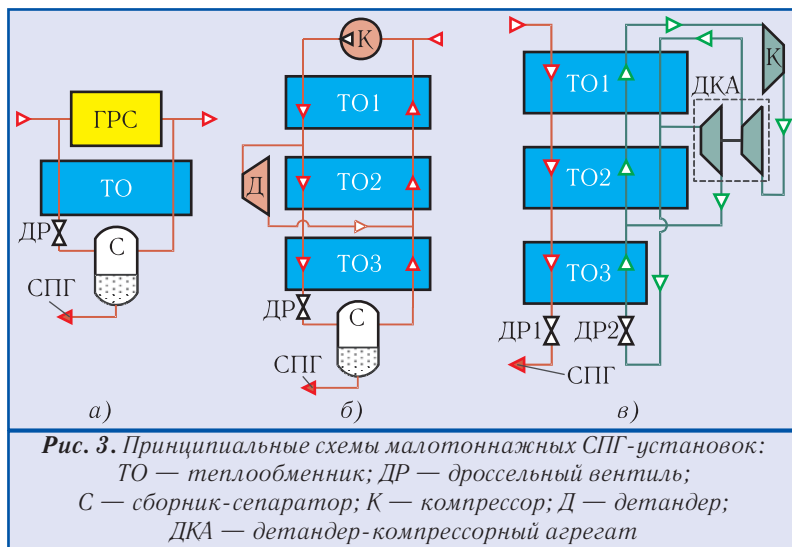
СПГ-установки средней производительности (до 15 т/ч) строятся по упрощённым схемам, исключающим использование большого количества дорогостоящего компрессорного оборудования. Малые установки, производительность которых не превышает 1 т/ч, могут и вовсе строиться на базе дроссельных циклов высокого давления. Известны также бескомпрессорные дроссельные установки использующие для производства необходимого количества холода перепад давлений природного газа на газораспределительных станциях (ГРС).

В целом СПГ-установки средней и малой производительности отличаются большим разнообразием схемных решений и, соответственно, применяемым в их составе оборудованием. Как правило, такие установки предназначены для пик-шейвинга и газоснабжения потребителей, не имеющих доступа к централизованным газопроводам. При этом СПГ доставляется потребителям исключительно в сжиженном виде и преимущественно автотранспортом. Базы хранения, размещённые у потребителей газа, не оснащаются установками для конденсации паров СПГ и только в некоторых случаях имеют устройства для понижения температуры в газовом пространстве криогенных ёмкостей.

Более подробно рассмотрим новое оборудование, применяемое при производстве, транспортировании и хранении СПГ.

2.1. Машинное оборудование малотоннажных СПГ-установок

В малотоннажных СПГ-установках для сжижения природного газа применяется внутреннее, внешнее и комбинированное охлаждение. Типичным примером



малотоннажных СПГ-установок с внутренним охлаждением являются установки, создаваемые на базе ГРС и автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) (см. рисунки 3,а и 3,б).

Именно на базе АГНКС созданы немногочисленные СПГ-установки, эксплуатирующиеся в России [1,2]. Привязка СПГ-установок к АГНКС объясняется возможностью использования поршневых компрессоров высокого давления АГНКС, загрузка которых заправками газобаллонного автотранспорта в большинстве случаев не превышает 10 %, что позволяет максимально сократить затраты на создание таких установок.

Иногда прибегают к предварительному охлаждению природного газа с помощью холодильных машин. В некоторых случаях используют более низкотемпературные пропановые циркуляционные контуры. Примером эффективного применения предварительного охлаждения может служить опытно-промышленная установка для выработки СПГ с фреоновой холодильной машиной на базе АГНКС-500. При использовании внешнего охлаждения производительность установки возросла в три раза [1].

Стремление снизить капитальные затраты при создании малых установок вынуждает максимально упрощать входящие в их состав аппараты и машины. Так, в большинстве случаев работа расширения газа в турбодетандерах полезно не используется. В малых установках с внутренним охлаждением детандеры и вовсе не применяются. Несколько повысить эффективность таких малотоннажных установок без применения дорогостоящих детандеров, удаётся заменой дроссельных вентилей эжекторами [3].

В более крупных установках, реализующих циклы с внешним или комбинированным охлаждением, для повышения эффективности циркуляционного контура считается целесообразным использование детандер-компрессорных агрегатов (ДКА), позволяющих сократить энергопотребление циркуляционных компрессоров (см. рис. 3,в). Ещё более эффективными оказываются установки с циркуляционными контурами для производства холода на различных температурных

уровнях за счёт включения в их схемы двух и более ДКА. Благодаря применению ДКА в циклах с внешним охлаждением, появляется возможность снизить давление перерабатываемого природного газа с 20 МПа до 3-3,5 МПа, что позволяет использовать для его компримирования центробежные или винтовые компрессоры взамен поршневых.

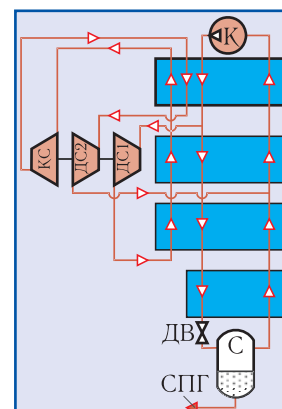
Производство холода на двух температурных уровнях более эффективно организовывать не в двух последовательно включённых ДКА, а в одном, объединяющем две детандерные (ДС) и одну компрессорную (КС) ступени, поджимающую поток газа перед детандерной ступенью низкого давления за счёт работы расширения в обеих ДС [4,5].

Причём, такое решение может эффективно применяться не только в составе циркуляционных контуров, но и в СПГ-установках с внутренним охлаждением. Одна из возможных схем такой установки показана на рис. 4.

Более подробно следует остановиться на возможностях совершенствования конструкции ДКА с двумя детандерными и одной компрессорной ступенями. Для обеспечения оптимальных условий работы КС, а также каждой из ДС, конструкцию ДКА следует создавать трёхвальной (см. рис. 5).

В трёхвальной конструкции каждой из ступеней ДКА будет соответствовать оптимальная частота вращения вала, что позволит обеспечить высокую эффективность процессов расширения и сжатия. Это также даст возможность повысить эффективность КС одновальных ДКА криогенных установок, реализующих термодинамические циклы высокого и среднего давлений. В существующих одновальных ДКА КС из-за завышенных относительно оптимального значения частот вращения общего с ДС вала имеют низкую эффективность [6]. Ещё одной особенностью такого ДКА является обеспечение высокой степени повышения давления в его КС, что приводит к необходимости применения двухступенчатого сжатия (см. рис. 5).

Следовательно, для повышения эффективности производства СПГ в малотоннажных установках нужно максимально использовать имеющиеся резервы, а



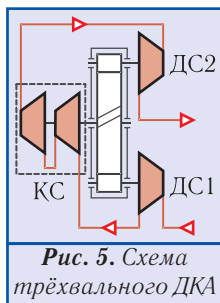


Рис. 5. Схема трёхвального ДКА

именно работу расширения природного газа в турбодетандерах, предварительное охлаждение с помощью низкотемпературных холодильных машин и т.п. Однако целесообразность применения того или иного машинного оборудования должна определяться в каждом конкретном случае путём тщательного технико-экономического анализа.

2.2. Машинное оборудование крупнотоннажных СПГ-установок

Как правило, природный газ, поступающий от мест его добычи к крупнотоннажным заводам по производству СПГ, не требует компримирования и непосредственно направляется в ожижительные установки (см. рис. 6). Большинство таких установок строится по классической каскадной схеме, а также однопоточной или каскадной схемам со смешевыми хладагентами. В таких схемах для компримирования чистых или смешевых хладагентов применяются от одного до четырёх крупных турбокомпрессоров. Это, как правило, одновальные центробежные или осевые компрессоры. Для достижения большей эффективности прибегают к тандему, объединяющему в одну машину осевой и центробежный компрессоры.

На рис. 6 в качестве примера приведена схема ожижительной установки, спроектированной и построенной компанией «Linde» (проект «Snohvit»).

Данная ожижительная установка — улучшенный вариант классической каскадной схемы. В ней имеются три ступени охлаждения (каскада), обеспечивающие предварительное охлаждение, непосредственное ожижение природного газа и его переохлаждение, и, соответственно, три турбокомпрессора (см. рис. 6). Однако, в данном случае, интересна не эта особенность цикла Linde-Statoil MFC®, а применяемые в нём жидкостные детандеры (ЖД) для расширения переохлаждённого СПГ (Д1) и смешевых хладагентов (Д2), которые заменяют традиционно используемые для этих целей дроссельные вентили. Жидкостные детандеры моделей LX08-08 и LX12-11 имеют электрогенераторы для торможения. Разработчиком и производителем этих расширительных машин является «Ebara International Corporation» (США). Компания поставила более 45 ЖД модельного ряда LX для расширения СПГ и смешевых хладагентов в интервале мощностей тормозного электрогенератора от 80 до 2050 кВт [7].

Серия ЖД также разработана специалистами компании «Cryostar» (Франция). Максимальная заявленная мощность детандера серии LTG составляет 3500 кВт [8].

Жидкостные детандерные агрегаты серии LX имеют вертикальную конструкцию с погружным электрогенератором (см. рис. 7). Криогенная жидкость в них подаётся через патрубок, расположенный в верхней части кожуха агрегата. Пройдя кольцевой

канал, опоясывающий электрогенератор, она поступает на расширение. В зависимости от перепада давлений криоагента детандер может иметь одну, две или три ступени расширения, представляющие собой осе-радиальные колёса с покрывными дисками.

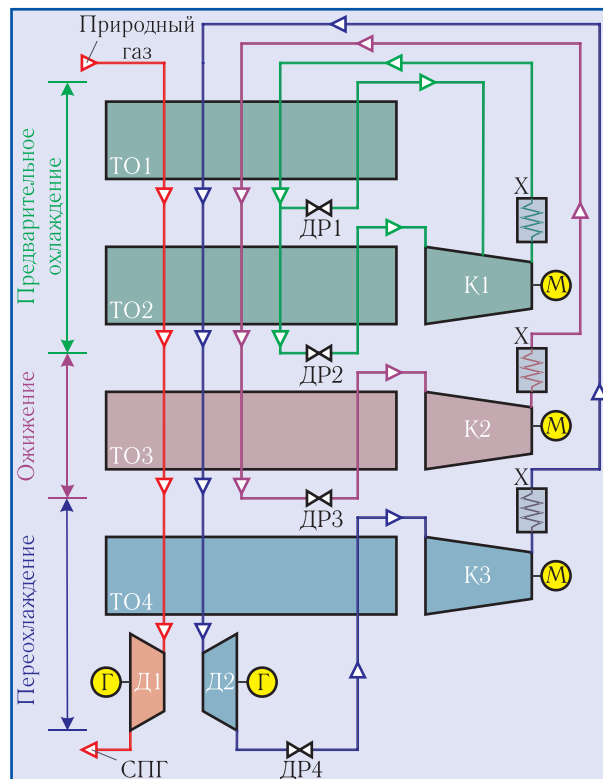


Рис. 6. Схема ожижителя, реализующего цикл Linde-Statoil MFC с внешним каскадным охлаждением на смешевых хладагентах:

ТО1-ТО4 — теплообменники;
ДР1-ДР4 — дроссельные вентили;
К1-К3 — компрессоры циркуляционных контуров;
Х — концевые холодильники; М — двигатели;
Г — электрогенераторы; Д1, Д2 — жидкостные детандеры для расширения СПГ и смешевых хладагента

Детандеры этой серии могут выполняться с регулируемой частотой вращения, однако при большой мощности электрогенератора для передачи вырабатываемой им электроэнергии в сеть потребуются использование дорогостоящих преобразователя частоты и трансформатора. Поэтому следующее поколение серии LX выполняются с постоянной частотой вращения [9].

ЖД в составе ожижителей природного газа могут применяться как для расширения переохлаждённого СПГ, поступающего на хранение в изотермические ёмкости, так и в холодильных циклах для расширения смешевых хладагентов, используемых для предварительного охлаждения, ожижения и переохлаждения природного газа. Для иллюстрации выигрыша от использования ЖД на рис. 8 в T-s-диаграмме изображены процессы расширения смешевых хладагента и переохлаждённого СПГ.



Рис. 7. Конструкция ЖД второго поколения серии LX

Из анализа рис. 8,а видно, что в ЖД не удаётся реализовать весь перепад давления, так как в его конструкции не предусмотрена возможность работы в парожидкостной области. Хотя разработчик гарантирует надёжную работу детандера вблизи левой пограничной кривой и даже при небольшом количестве паровой фазы, которая может образовываться в процессе расширения [7].

В связи с этим, процесс расширения разбивается на два этапа (см. рис. 8,а): детандирование жидкости (процесс 1-3) и затем её дросселирование (процесс 3-4). Если сравнить процесс расширения 1-3-4 с простым дросселированием (процесс 1-2), то рост холодопроизводительности цикла Δq_1 будет соответствовать площади 2-а-b-4-2. Из рис. 8,а следует, что Δq_1 будет тем больше, чем ниже температура в т. 1, т.е. чем больше будет переохлаждён хладагент, чего не всегда удаётся достичь. Именно это объясняет ограничение области применения ЖД нижним каскадом СПГ-установок, где даже небольшое увеличение холодопроизводительности на низшем температурном уровне (порядка 100 K) существенно отражается на его энергетиче-

ских показателях. Подобное решение реализовано, например, в цикле Linde-Statoil MFC® (см. рис. 6).

Как известно, из-за огромных объёмов резервуаров для хранения СПГ в них поддерживается давление лишь не намного превышающее атмосферное. Следовательно, давление сжиженного природного газа, ожижение которого в крупнотоннажных установках проводится преимущественно при давлениях близких к критическому (для метана это 4,63 МПа), должно быть снижено практически до атмосферного. Понижение давления СПГ организуется с помощью ЖД. Для обеспечения штатной работы этих расширительных машин перед поступлением СПГ на детандирование его переохлаждают. Применение детандирования (процесс 1-3) взамен дросселирования (процесс 2-3) позволяет повысить температуру переохлаждения и, соответственно, понизить нагрузку на нижний каскад. Количественно эта экономия $\Delta q_{\text{хм}}$ эквивалентна площади 1-а-b-2-1. Приближённые расчёты показывают, что расширение СПГ в ЖД позволяет на 1,5-3 % снизить энергопотребление СПГ-установки. Эта экономия складывается из двух составляющих: снижение энергопотребления компрессорами нижнего каскада и получение энергии, генерируемой ЖД. В качестве примера укажем, что электрическая мощность, производимая ЖД СПГ-установки, созданной в рамках проекта «Snohvit», составляет 1500 кВт.

Однако в некоторых случаях с целью предотвращения вскипания СПГ в ЖД идут на повышение давления конца процесса расширения до 0,5 МПа. В этом случае процесс расширения СПГ также разбивается на два этапа: детандирование СПГ и последующее его дросселирование. Это, естественно, приводит к снижению выигрыша от применения ЖД.

Для устранения указанных выше недостатков ЖД, приводящих к значительному сокращению области их эффективного применения, компанией «Ebara International Corporation» было разработано третье поколение ЖД, конструктивные особенности которых позволяли им эффективно работать в парожидкостной области [9], т.е. был создан парожидкостный детандер (ПЖД). Это достигнуто благодаря применению уникальной концевой ступени с регулируемым шагом лопаток и сферической ступицей, получившей коммерческое название «exducer» (см. рис. 9).

Следует отметить, что впервые ПЖД поршневого типа был разработан С. Коллинзом ещё в 1969 г. для гелиевого ожижителя [10]. Плодотворной также оказалась работа в этом направлении коллектива НПО «Гелиймаш». Результатом чего стало создание гелиевого радиального ПЖД с надёжностью и изотропным КПД, значения которых практически не уступают поршневым машинам. Применение гелиевых ПЖД позволило вдвое повысить холодопроизводительность цикла при неизменных затратах энергии. Сегодня НПО «Гелиймаш» сообщает о готовности разработать и изготовить ПЖД для криогенных воздухоразделительных установок высокого давления, ожижителей азота, водорода и гелия [11].

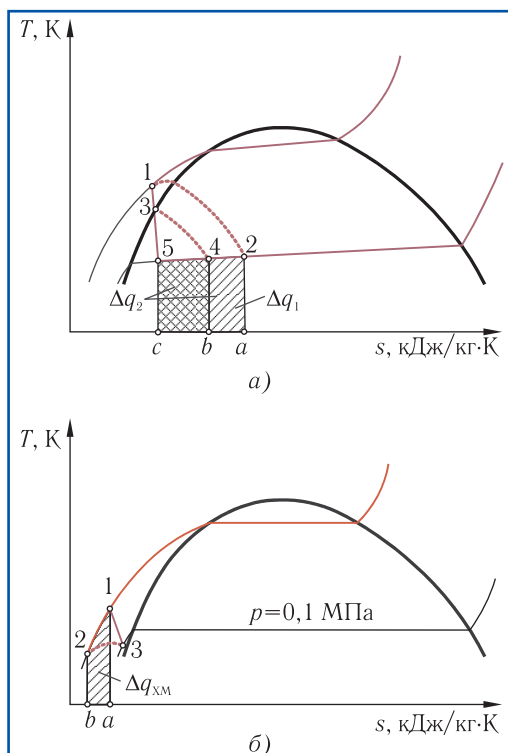


Рис. 8. Процессы расширения жидкости в ЖД и парожидкостном детандере: а — смесового хладагента; б — СПГ

Применение ПЖД позволяет проводить процесс расширения как хладагентов (процесс 1-5, рис. 8,а), так и СПГ (процесс 1-3, рис. 5,б) в один этап. Замена дроссельных вентилей ПЖД, как видно из анализа процессов в *T-s*-диаграммах, позволит существенно повысить их эффективность.

Для иллюстрации сказанного в таблице приведены расчётные данные, полученные специалистами компании «Foster Wheeler» (США) при сравнении удельного энергопотребления при производстве СПГ в одно- и двухкаскадных смесевых циклах при условии использования в качестве расширительных устройств дроссельных вентилей (ДВ), тандема ЖД и ДВ, а также ПЖД. Расчёты проводились для установки производительностью 2,1 млн. т СПГ в год.

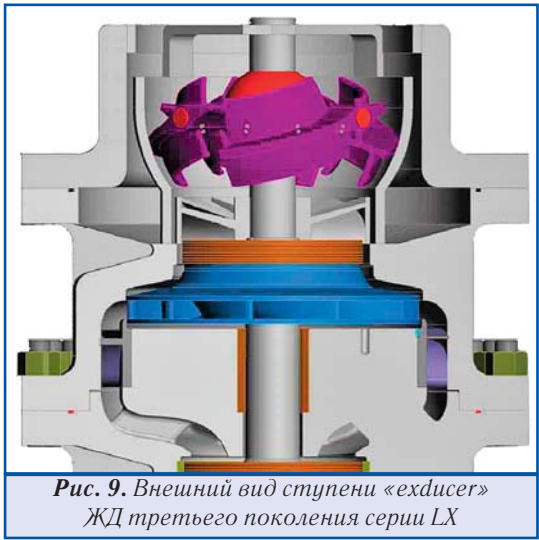


Рис. 9. Внешний вид ступени «exducer» ЖД третьего поколения серии LX

Из анализа приведённых в таблице расчётных данных видно, что совместное использование ЖД и ДВ в однокаскадном цикле позволяет снизить удельное энергопотребление более чем на 20 %. Аналогичный показатель для двухкаскадного цикла — 10 %. При замене же дроссельных вентилей ПЖД снижение удельных энергозатрат оказывается ещё более интенсивным: для однокаскадного цикла — 28 %; двухкаскадного — 17 %. Следовательно, необходимо при создании СПГ-установок более широко применять как ЖД, так и ПЖД, что позволит существенно повысить их эффективность. В реальных установках совместное применение ЖД и ДВ даст возможность на 5 % повысить производительность по СПГ, а ПЖД — на 8 %.

Интересной разработкой данной компании является также ПЖД с концевым поджатием, предназна-

Результаты сравнения СПГ-установок с различными расширительными устройствами [12]

Показатель	Ед. изм.	Тип расширительного устройства		
		ДВ	ЖД+ДВ	ПЖД
Однокаскадный смесевой цикл				
Суммарная мощность компрессоров	МВт	108,735	88,413	84,447
Мощность детандеров		—	2,712	6,279
Суммарная потребляемая мощность		108,735	85,701	78,617
Удельное энергопотребление	кВт·ч/кг	0,78	0,62	0,56
Двухкаскадный смесевой цикл				
Суммарная мощность компрессоров	МВт	81,501	76,402	75,138
Мощность детандеров		—	2,094	7,061
Суммарная потребляемая мощность		81,501	74,308	68,077
Удельное энергопотребление	кВт·ч/кг	0,59	0,53	0,49

ченный для работы только в двухфазной области, в отличие от рассмотренного ранее ПЖД, расширение в котором может осуществляться из однофазной (жидкость) в двухфазную область. Особенность этого ПЖД — применение оригинальной конструкции выходного спрямляющего аппарата (см. рис. 10).

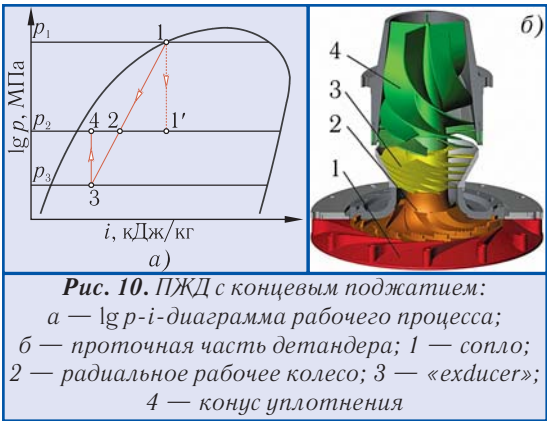


Рис. 10. ПЖД с концевым поджатием:
а — *lg p-i*-диаграмма рабочего процесса;
б — проточная часть детандера; 1 — сопло;
2 — радиальное рабочее колесо; 3 — «exducer»;
4 — конус уплотнения

Проточная часть ПЖД состоит из четырёх последовательно включённых элементов. Сопло 1 с сужающимися каналами и радиальное рабочее колесо 2 предназначены для преобразования потенциальной энергии давления СПГ в кинетическую энергию. Размещённый за ней «exducer» 3 является основным элементом проточной части и служит для расширения парожидкостной смеси (процесс 1-3) с максимально возможным вращающим моментом, передаваемым на вал ПЖД.

Принцип действия «exducer» заключается в следующем. Насыщенный СПГ при понижении давления начинает испаряться на входе в «exducer», формируя парожидкостный поток. При прохождении через его винтовые каналы интенсивность испарения многократно увеличивается, что вызывает рост скорости потока и способствует ещё более активному испарению. Интенсивное испарение СПГ приводит к увеличению удельного объёма двухфазного потока, что в ограниченном винтовыми лопатками пространстве приводит в росту давления и частичной конденсации СПГ. Описанная последовательность процессов «испарение →

увеличение удельного объёма → рост скорости → повышение давления» многократно повторяется в пределах винтовых каналов «exducer», пока двухфазный поток с высокой скоростью не покинет их.

Так как парожидкостный поток выходит из «exducer» с большой скоростью, т.е. высокой кинетической энергией, то разработчиками предусмотрен специальный элемент проточной части ПЖД, предназначенный для превращения кинетической энергии в потенциальную энергию давления, так называемый конус уплотнения 4. Он представляет собой неподвижный выходной спрямляющий аппарат с пространственными лопатками, которые образуют спиралевидные расширяющиеся каналы. На $\lg p-i$ -диаграмме (см. рис. 10) процессу торможения парожидкостного потока в конусе уплотнения соответствует линия 3-4. ПЖД описанной конструкции в номенклатуре компании обозначается аббревиатурой VX.

Следует отметить, что конструкция ПЖД VX является универсальной. Его можно переоборудовать в ЖД простой заменой проточной части (исключаются элементы 3 и 4).

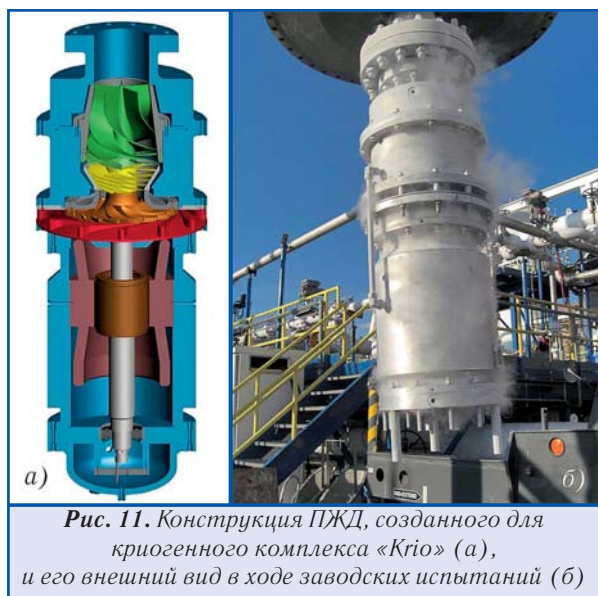


Рис. 11. Конструкция ПЖД, созданного для криогенного комплекса «Krio» (а), и его внешний вид в ходе заводских испытаний (б)

В настоящее время имеется информация только об одном реализованном проекте с применением ПЖД описанной конструкции. Это — завод по комплексной переработке природного газа «Krio» в г. Одоланов (Польша), входящий в группу компаний «Polish Oil & Gas Company» [13]. На данное предприятие для различных применений с 2001 по 2008 гг. было поставлено 4 таких ПЖД (см. рис. 11).

Криогенный комплекс «Krio» первоначально был предназначен для низкотемпературной очистки природного газа от азота, причём содержание последнего в исходном газе доходит до 45 %. Сейчас это — современное предприятие, производящее газообразные и жидкие гелий, азот и природный газ. В целом принятые при создании данного криогенного комплекса технические решения настолько интересны, что заслуживают отдельной публикации.

Для крупных проектов, мощность расширения двухфазных потоков в которых исчисляется тысячами киловатт, компания «Ebara International Corporation» предлагает использовать два последовательно включённых детандера (см. рис. 12). В первом из них происходит расширение жидкости до линии насыщения, а во втором — парожидкостной смеси. Такое техническое решение получило название «Tandem Expander™». Специалистами компании также разработана модель, объединяющая ЖД и ПЖД с одним, общим для них электрогенератором. Объединение в один агрегат ЖД и ПЖД позволяет с максимальной эффективностью использовать энергию расширения для генерации электроэнергии.

Таким образом, созданием работоспособных ЖД и ПЖД удалось в криогенной технике «разрубить Гордиев узел», представляющий неэффективное использование перепада давления криогенных жидкостей при их расширении из жидкостной в парожидкостную область, т.е. замена процесса дросселирования при $i=\text{const}$ на детандирование при $s=\text{const}$. Применение данных расширительных машин позволяет существенно повысить эффективность как ожижительных, так и рефрижераторных циклов. Единственное обстоятельство, ограничивающее область их применения только крупными СПГ-установками — их относительно высокая стоимость.

2.3. Установки реконденсации СПГ и применяемое в них машинное оборудование

С расширением инфраструктуры дальних перевозок СПГ, включающей танкеры-метановозы, а также экспортные и импортные терминалы, возникала необходимость в создании установок и специфического машинного оборудования, для реконденсации паров СПГ (BOG), образующихся при его хранении, транспортировании и перегрузке. Следует отметить, что ранее испарявшийся при транспортировании СПГ использовался в качестве топлива в двигателях танкеров-метановозов. Однако с ростом цен на природный газ и, следовательно, СПГ такое простое решение этой проблемы оказалось неэкономичным. Поэтому были разработаны и внедрены бортовые системы реконденсации BOG для исключения неэффективного расходования такого высоколиквидного продукта как СПГ.

Условия работы установок реконденсации BOG обусловили особенности применяемых схемных решений, а также используемого в них машинного оборудования. Это, в первую очередь, — необходимость сжатия низкотемпературных паров СПГ, обеспечение компактности оборудования установок, размещаемых на борту танкеров-метановозов, а также применение высокоэффективного внешнего холодильного цикла для реконденсации BOG. Подробно остановимся на каждом из отличительных особенностей таких установок.

Температура BOG на выходе из резервуаров равна примерно 110 К, что обуславливает необходимость применения специальных видов компрессорных машин. Так, например, до недавнего времени монопо-

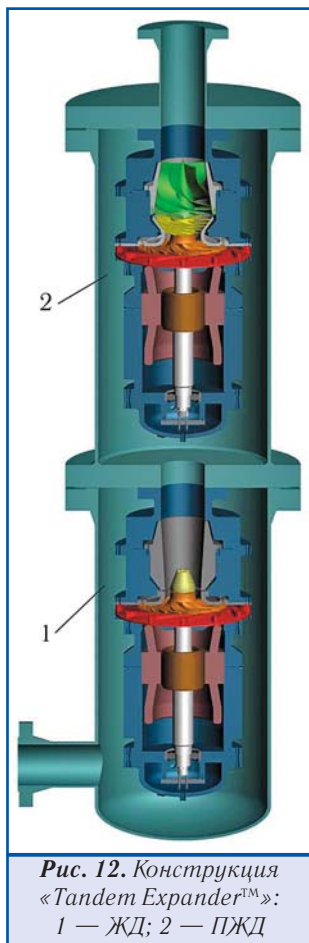


Рис. 12. Конструкция «Tandem Expander™»: 1 — ЖД; 2 — ПЖД

листом по созданию компрессоров для сжатия низкотемпературных газов была компания «Burckhardt Compression AG» (Швейцария). Разработанная специалистами данной компании серия поршневых компрессоров «Laby», благодаря оригинальной конструкции лабиринтного уплотнения пары цилиндр-поршень, может использоваться для сжатия BOG и других низкотемпературных газов [14]. Однако с повышением ёмкости резервуаров для хранения СПГ возрастают и объёмы BOG, что приводит к необходимости использовать несколько компрессоров, работающих параллельно. Такое решение снижает надёжность установок и не удовлетворяет требованиям к компактности установок, монтируемых

таннх указанными компаниями, — использование в замкнутом азотном контуре агрегата, объединяющего циркуляционный азотный компрессор, поджимающую ступень, детандер и электродвигатель. В мировой практике такой агрегат получил название компандер. На рис. 14 приведён внешний вид много-

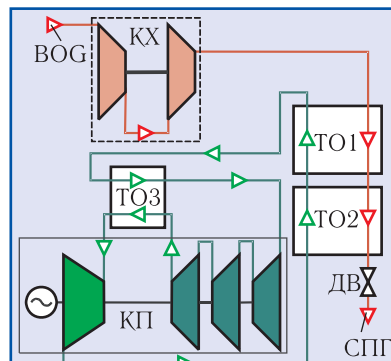


Рис. 13. Принципиальная схема установки реконденсации «EcoRel»: TO1-TO3 — теплообменники; KX — компрессор BOG; КП — компандер; ДВ — дроссельный вентиль



Рис. 14. Внешний вид компандера, созданного «Atlas Copco Energas GmbH» по заказу «Hamworthy Gas Systems AS»

на танкерах-метановозах.

Для устранения указанного недостатка были разработаны центробежные компрессоры для сжатия BOG. Среди компаний, освоивших выпуск таких компрессоров следует назвать «Atlas Copco Energas GmbH» (Швеция), «Cryostar SA» (Франция) и «Siemens AG» (Германия).

Не менее интересны схемные решения, а также оборудование, применяемое во внешних холодопроизводящих контурах. Во всех случаях для производства необходимого количества низкотемпературного холода используют внешний замкнутый азотный контур. На рис. 13 приведена принципиальная схема бортовой установки реконденсации BOG, разработанная компанией «Cryostar SA».

Подобные схемы установок реконденсации характерны также и для других специализированных компаний, таких как «Hamworthy Gas Systems AS» (Норвегия) и «Tractebel Gas Engineering» (Германия). Существенным отличием схемы установки реконденсации BOG, предлагаемой компанией «Hamworthy Gas Systems AS», является наличие теплообменника на всасывании компрессора BOG, предназначенного для подогрева паров СПГ перед компрессором за счёт теплообмена с частью сжатого азота. Различным также выбирается давление в контуре BOG, что обуславливает применение одно-, двух- или трёхступенчатых компрессоров.

Общая черта установок реконденсации, разрабо-

Согласно данным «Hamworthy Gas Systems AS», удельные энергозатраты на реконденсацию BOG, в зависимости от масштабов установки, могут составлять 0,75-0,80 кВт·ч/кг СПГ.

Положительный опыт по созданию установки реконденсации BOG, правда, пока только в стендовом варианте, также имеется у ОАО «СМПО им. М.В. Фрунзе» (Украина) [15]. Примечательно, что всё машинное оборудование, включая компрессор для сжатия BOG и азотный компандер, разработано и изготовлено собственными силами производственного объединения. Позже на базе этого стенда был создан работоспособный ожижитель природного газа, что говорит о перспективности использования применяемого в ней холодильного контура в небольших СПГ-

установках [16].

Предварительный анализ показывает, что можно заметно повысить эффективность установок реконденсации, заменив дроссельный клапан ПЖД. Указанное особенно актуально для импортных терминалов, для которых характерны большие расходы ВОВ при перегрузках СПГ с танкеров-метановозов в стационарные резервуары.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное развитие мирового рынка СПГ стимулирует создание новых мощностей для его производства и, соответственно, сопутствующей инфраструктуры, причём спрос на этот высоколиквидный энергоноситель опережает предложение. Такое положение дел вынуждает специализированные компании создавать всё более производительное оборудование, а неизбежная конкуренция между ними обуславливает постоянное повышение его эффективности. Указанное в полной мере относится и к машинному оборудованию, применяемому во всех составляющих СПГ-комплексов.

Основная отличительная особенность современных СПГ-установок — их большие масштабы. Поэтому снижение удельного энергопотребления всего на несколько процентов, даже ценой значительных капитальных затрат, быстро окупается. Это объясняет значительные усилия, прилагаемые для создания специального машинного оборудования, такого как ЖД и ПЖД. Так, например, замена дроссельного клапана на ЖД даст возможность увеличить производительность ожижительной установки на 5 %, а в случае с ПЖД — на 8 %. Причём эффективность и технологичность этих расширительных машин, достигнутая в результате настойчивого их совершенствования, позволят уже на настоящем этапе применять их и в СПГ-установках средней производительности, а также других низкотемпературных установках, в том числе воздухоразделительных и установках сжижения аммиака [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ходорков И.Л. Первый в России типовой мини-завод по производству сжиженного природного газа на АГНКС// Холодильный бизнес. — 2001. — № 4. — С. 12-13.
2. Повышение эффективности установок сжижения природного газа малой производительности/ И.Ф. Кузьменко, А.Л. Довбиш, В.А. Передельский и др.// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2002. — № 5. — С. 29-31.
3. Безруков К.В., Довбиш А.Л., Передельский В.А. Блочная установка ожижения природного газа производительностью 1,5 т/ч// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 64-67.
4. Лавренченко Г.К., Швеи С.Г. Исследование возможностей эффективного использования детандер-компрессорных агрегатов в криогенных установках среднего давления// Технические газы. — 2009. — № 3. — С. 12-17.
5. Лавренченко Г.К., Швеи С.Г. Снижение удельного энергопотребления при производстве жидкого кислорода в ВРУ среднего давления// Технические газы. — 2009. — № 5. — С. 26-32.
6. Лавренченко Г.К., Швеи С.Г. Оптимизация детандер-компрессорных агрегатов воздухоразделительных установок// Технические газы. — 2008. — № 5. — С. 13-18.
7. Официальный сайт компании «Ebara International Cryodynamics Division»: <http://www.ebaracryo.com>.
8. The win, win turbine// The Cryostar Magazine. — 2005. — № 5. — Р. 3-5.
9. Эверет Х.Х. Детандерные ожижители природного газа// Холодильный бизнес. — 2003. — № 7. — С. 40-41.
10. Криогенные системы: Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем// А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
11. Официальный сайт компании ОАО «НПО Гелий-маш»: <http://www.geliymash.ru>.
12. Barclay M.A., Yang C.C. Offshore LNG: The Perfect Starting Point for the 2-Phase Expander?// Proc. Offshore Technology Conference. — Houston, USA, 2006.
13. Kimmel H.E., Cathery S. Thermo-fluid dynamics and design of liquid-vapour two-phase LNG expanders// Proc. «Advances in process equipment». — Paris, France, 2010.
14. Ernst P. High reliability of the Laby LNG BOG compressor with the unique sealing system// Brochure «Burckhardt Compression AG». — 2005. — 8 p.
15. Бухолдин Ю.С., Сухоставец С.В., Петухов И.И. Криогенная установка для сжижения природного газа// Технические газы. — 2006. — № 5. — С. 39-46.
16. Совершенствование технологии сжижения природного газа на базе модернизированного стенда реконденсации метана/ Ю.С. Бухолдин, А.В. Зленко, В.М. Татаринов и др.// Технические газы. — 2008. — № 4. — С. 26-29.
17. Rush S., Kimmel H.E. Magnetically coupled submerged cryogenic pumps and expanders for ammonia application// Proc. AIChE «Ammonia safety symposium». — Calgary, Canada, 2009. — Paper 4d.