

А.А. Вассерман, М.А. Шутенко

Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029

e-mail: avas@paco.net

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХРАНЕНИЯ И РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ ПРИ ИХ МОРСКОЙ ДОСТАВКЕ

Предлагается перед морской перевозкой сжиженного газа переохлаждать его до более низкой температуры, чем температура насыщения при давлении перевозки. Тогда теплоприток к газу из окружающей среды через изоляцию танка будет компенсироваться нагреванием газа до температуры насыщения. Это позволит отказаться от судовой установки для реконденсации газа, испаряющегося вследствие теплопритоков, и получить существенный экономический эффект. Предлагается также использовать криогенный потенциал сжиженного природного газа при его регазификации в порту доставки. Регазификация сжиженного газа должна осуществляться в установке для разделения воздуха за счёт теплообмена с ним. Это позволит уменьшить затраты энергии на получение продуктов разделения воздуха.

Ключевые слова: Морская перевозка. Метан. Сжиженный природный газ (СПГ). Переохлаждение жидкости. Экономия энергии. Регазификация.

A.A. Vasserman, M.A. Shutenko

ON POSSIBLE IMPROVEMENT OF STORAGE AND REGASIFICATION OF LIQUEFIED GASES DURING THEIR MARITIME DELIVERY

It is proposed before the maritime transportation of liquefied gas to subcool it to the temperature which is lower than the saturation temperature at the pressure of transportation. Then the heat inflow to gas from the surroundings through the tank insulation shall be compensated by heating of gas to the saturation temperature. This will make unnecessary the ship based plant for recondensation of gas, which is vaporized owing to heat inflow, and shall give essential economic effect. It is proposed also to use the cryogenic potential of liquefied natural gas during its regasification at the port of discharge. Regasification of liquefied gas must be performed in air separation plant by way of the heat exchange with air. Such solution makes it possible to decrease energy consumption on receiving the products of air separation.

Keywords: Maritime transportation. Methane. Liquefied natural gas (LNG). Supercooling of liquid. Economy of energy. Regasification.

1. ВВЕДЕНИЕ

Морские суда-газовозы перевозят значительные количества сжиженных газов на большие расстояния. Обычно используются три способа перевозки сжиженных газов [1-3]:

- при температуре окружающей среды и соответствующем давлении насыщения;
- при атмосферном давлении и температуре нормального кипения;
- при давлении существенно выше атмосферного и соответствующей температуре насыщения (так называемый комбинированный способ перевозки).

Первый способ перевозки энергетически выгоден, так как не требует охлаждения газа, но масса пустых танков таких судов-газовозов очень велика. Эти танки должны выдерживать высокое рабочее

© А.А. Вассерман, М.А. Шутенко

давление (до 1,75 МПа), в связи с чем имеют сферическую либо цилиндрическую форму. Она плохо согласуется с конфигурацией грузовых помещений судна, что снижает эффективность использования их объёмов и в итоге уменьшает грузоподъемность газовоза.

Второй способ требует установки на судне дорогого и сложного холодильного оборудования и значительных затрат энергии на его работу в связи с необходимостью реконденсации (повторного сжижения) газа, испаряющегося вследствие притока теплоты из окружающей среды. Это экономически оправдано для больших судов при дальних перевозках. Во многих случаях испаряющийся газ не реконденсируется, а выпускается в атмосферу либо сжигается в энергетической установке судна.

Третий способ также связан с использованием

холодильного оборудования, которое имеет меньшую холодопроизводительность, чем при втором способе перевозки.

В настоящей работе модифицируется наиболее распространённый второй способ перевозки сжиженных газов так называемыми рефрижераторными газозавозами, составляющими примерно половину современных судов-газовозов [1].

Рассматривается также вопрос о полезном использовании криогенного потенциала сжиженного природного газа (СПГ) при его регазификации (повторном испарении) в порту выгрузки.

2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Предлагаемое усовершенствование касается способа перевозки сжиженных газов при давлении, незначительно превышающем атмосферное (приблизительно 0,103 МПа). Повышенное давление в танке не позволяет атмосферному воздуху проникнуть туда и образовать взрывоопасную смесь с перевозимым газом. При этом способе перевозки газ перед погрузкой на судно сжижают и хранят при температуре насыщения, соответствующей давлению, при котором осуществляется перевозка. Во время перевозки из-за притока теплоты к газу из окружающей среды некоторое количество сжиженного газа испаряется. Это количество газа повторно сжижают с помощью судовой установки реконденсации и возвращают в танк либо без сжижения используют как топливо в котле паротурбинной установки (ПТУ) судна.

Недостатком такого способа является то, что стоимость указанной установки значительна и составляет 8...12 % строительной стоимости судна [1]. Если же испаряющийся газ используется как топливо, то уменьшается количество доставляемого в порт выгрузки сжиженного газа. К тому же при этом необходимо использовать в качестве главного двигателя ПТУ вместо обычного на грузовых судах малооборотного дизеля, имеющего ряд существенных преимуществ по сравнению с ПТУ, в частности более высокий КПД.

Первоначально суда для перевозки СПГ при температуре до -164 °С строились без установок реконденсации. Более 90 % эксплуатируемых судов-метановозов работают по такому принципу. В последние годы в связи с ростом стоимости природного газа почти на всех строящихся метановозах используют установки реконденсации.

Предлагается усовершенствовать способ перевозки сжиженного газа при давлении, близком к атмосферному, чтобы перевозить газ без использования установки реконденсации либо без потерь на его испарение [4]. Для этого необходимо перед погрузкой на судно охлаждать сжиженный газ до более низкой температуры, чем температура насыщения при давлении перевозки. Во время перевозки приток теплоты к газу из окружающей среды будет компенсироваться его медленным нагреванием до температуры насыщения.

Поэтому сжиженный газ не испаряется, и при его перевозке не нужна установка реконденсации.

Перед погрузкой газ сжижается и переохлаждается с помощью береговой холодильной установки, потребляющей более дешёвую электроэнергию, чем судовая холодильная установка. Кроме того, мощные береговые установки используют более эффективные, хотя и сложные технологические схемы (АР-Х, СЗ-MR, каскадную) [5,6], чем судовые установки. Поэтому береговые установки потребляют не более 70 % мощности, необходимой для судовых установок при одинаковой холодопроизводительности [6]. Удельные капитальные затраты на единицу холодопроизводительности также ниже для береговых установок (одна береговая установка сжижает такое количество природного газа, для перевозки которого необходимо 16 судов).

Судно перевозит большую массу сжиженного газа, поэтому переохлаждение газа от температуры насыщения до более низкой температуры, исключающее парообразование, будет незначительным. Например, по данным [5] на газозове грузоподъемностью 150000 м³, перевозящем сжиженный метан при давлении 0,103 МПа, за сутки испаряется примерно 0,15 % груза, т.е. $94,90 \cdot 103$ кг метана. Теплота парообразования метана при указанном давлении равна 509,9 кДж/кг [7], следовательно, приток теплоты в танки газозова за сутки составляет $48,39 \cdot 106$ кДж. Общая масса перевозимого метана равна $63,27 \cdot 106$ кг, его изобарная теплоёмкость в состоянии насыщения при указанном давлении — 3,424 кДж/(кг К) [7]. С учётом этого переохлаждение на 0,22 °С позволяет компенсировать весь суточный теплоприток. При длительности рейса судна 20 суток переохлаждение сжиженного газа, необходимое для противодействия испарению, должно составлять 4,4 °С. Такая величина переохлаждения вполне приемлема.

В связи с переохлаждением возрастёт перепад температур между окружающей средой и газом и увеличится теплоприток в танк. Для метана при давлении 0,103 МПа и температуре окружающей среды 15 °С перепад температур равен 176,3 °С. Из-за переохлаждения метана перепад температур возрастёт в среднем на 2,2 °С (на 1,2 %) и соответственно увеличится теплоприток. При этом изобарная теплоёмкость окажется меньше принятой при расчётах на 1,2 %. Отмеченный рост теплопритока и уменьшение теплоёмкости c_p могут быть компенсированы весьма незначительным увеличением переохлаждения на 2,4 °С (на 0,1 °С).

Плотность переохлаждённого на 4,4 °С метана на 1,5 % больше плотности насыщенной жидкости при давлении 0,103 МПа. При нагреве перевозимого метана его плотность уменьшится и соответственно возрастёт объём. Над жидким грузом нужно оставлять пространство, объём которого по опыту эксплуатации составляет 5 % от объёма жидкости. Поэтому объём сжиженного газа при погрузке должен быть уменьшен соответственно росту его плотности при переохлаждении.

В случае других газов при более высокой температуре в танках перепад температур между газом и окружающей средой будет меньше. Поэтому теплоприток в танки уменьшится либо не возрастет по сравнению с метановозами, несмотря на уменьшение толщины изоляции и соответствующий рост коэффициента теплопередачи. В таких случаях переохлаждение газа также не приведет к заметному росту теплопритока.

Например, при перевозке жидкого пропана при давлении 0,103 МПа и температуре окружающей среды 15 °С перепад температур составляет 56,7 °С. Коэффициент теплопередачи через изоляцию на судах для перевозки пропана в 2,5 раза больше, чем на метановозах [1]. В итоге для пропановоза грузоподъемностью 75000 м³, поверхность танков которого примерно в 1,6 раза меньше поверхности танков метановоза грузоподъемностью 150000 м³, суточный теплоприток будет равен $24,32 \cdot 10^6$ кДж. Масса перевозимого жидкого пропана составит $43,54 \cdot 10^6$ кг, а его изобарная теплоемкость при давлении 0,103 МПа в состоянии насыщения — 2,242 кДж/(кг К) [8]. Следовательно, для компенсации указанного теплопритока и предотвращения парообразования достаточно переохладить пропан на 0,25 °С, а при обычном для таких судов 10-суточном рейсе — на 2,5 °С.

Пары газа, находящиеся в танках судна над поверхностью сжиженного газа, придут в термодинамическое равновесие с жидкостью. Поскольку температура сжиженного газа ниже температуры насыщения при давлении 0,103 МПа, после окончания его погрузки в танки необходимо смешать пары газа с инертным газом (например, азотом) в такой пропорции, чтобы сумма парциальных давлений равнялась 0,103 МПа. Во время рейса сжиженный газ будет нагреваться, его парциальное давление — возрастать. Поэтому часть созданной смеси газов потребуется выпускать в атмосферу либо сжигать в судовой энергетической установке.

При переохлаждении метана на 4,4 °С (по сравнению с температурой насыщения при давлении 0,103 МПа) его парциальное давление составит 0,071 МПа, т.е. парциальное давление инертного газа должно равняться 0,032 МПа. При объеме газового пространства в танках после погрузки 6,5 % от первоначального объема жидкости необходимая масса азота составит $9,6 \cdot 10^3$ кг. Такое количество азота можно легко получить с помощью береговой установки для разделения воздуха.

Применение усовершенствованного способа при перевозке сжиженного природного газа на судне грузоподъемностью 150000 м³, на котором обычно имеется установка реконденсации, даёт следующие результаты:

- затраты энергии на поддержание 1 кг газа в жидком состоянии в процессе перевозки уменьшатся на 8 % (с 0,026 до 0,024 кВт·ч/кг);
- капитальные затраты вследствие увеличения холодопроизводительности береговой установки для сжижения газа составят $3,4 \cdot 10^6$ \$ США, но при этом можно отказаться от судовой установки реконденсации

стоимостью $20 \cdot 10^6$ \$ США.

Таким образом, в рассматриваемом случае применение способа на стадии строительства судна приведет к снижению капитальных затрат за счёт отказа от установки реконденсации, а также благодаря соответствующему уменьшению мощности судовой электростанции. Кроме того, снизятся эксплуатационные затраты, поскольку не потребуется поддерживать груз в жидком состоянии судовыми средствами в процессе перевозки. Для существующих судов с установками реконденсации применение способа экономически нецелесообразно.

Применение способа при перевозке сжиженного природного газа на судне грузоподъемностью 150000 м³, не имеющем установки реконденсации, даст следующие результаты:

- затраты на топливо для энергетической установки судна уменьшаются на $0,64 \cdot 10^6$ \$ США/год за счёт использования более дешёвого жидкого топлива вместо испаряющегося природного газа;
- доходы от перевозки дополнительного количества сжиженного газа составят $3,45 \cdot 10^6$ \$ США/год. Поскольку сжиженный газ не испаряется и не сжигается в процессе перевозки, в порт назначения будет доставлено большее количество груза, в то время как затраты на перевозку одной партии груза не зависят от количества сжиженного газа в танках судна;
- дополнительные затраты энергии, связанные с переохлаждением сжиженного природного газа с помощью береговой установки перед его погрузкой на судно, будут равняться $0,24 \cdot 10^6$ \$ США / год;
- капитальные затраты вследствие увеличения холодопроизводительности береговой установки для сжижения газа составят $3,4 \cdot 10^6$ \$ США.

Таким образом, для судов, не имеющих установок реконденсации, при ставке возврата на инвестиции 15 % годовых срок окупаемости нововведения составит 1 год, что делает его привлекательным для возможных инвесторов.

На судне без установки реконденсации при перевозке переохлажденного сжиженного газа отпадает необходимость использования испаряющегося газа как топлива в котле ПТУ. В этом случае можно заменить ПТУ, имеющую КПД 30 %, малооборотным дизелем с КПД 50 %. При внедрении способа на стадии строительства газовоза такая замена всегда целесообразна, так как почти все новые суда с установкой реконденсации оборудованы малооборотными дизелями. Для существующих газовозов вопрос о целесообразности их модернизации надо решать отдельно с учётом особенностей конкретного судна и соответствующих технико-экономических расчётов.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Процесс сжижения природного газа перед его морской перевозкой требует больших затрат энергии. Расход газа на обеспечение работы двигателей установки сжижения составляет 7...10 % от массы полу-

чаемой жидкости. Регазификация сжиженного газа после выгрузки в порту назначения перед подачей в газопровод осуществляется за счёт подвода теплоты от морской воды либо от атмосферного воздуха. При таком теплообмене не используется криогенный потенциал сжиженного газа, позволяющий охладить при его регазификации другую среду без применения холодильной установки.

Существуют предложения об использовании перепада температур между окружающей средой и сжиженным газом для генерации электрической (либо механической) энергии. Установка для генерации электроэнергии за счёт регазификации сжиженного газа фактически представляет собой обращённый вариант установки сжижения. Капитальные затраты на создание такой установки в 10 раз больше затрат на строительство тепловой электростанции равной же мощности. Естественно, электроэнергия, выработанная благодаря регазификации сжиженного газа, будет намного дороже энергии, генерированной на тепловой станции.

Использование криогенного потенциала сжиженного природного газа возможно при условии регазификации газа в порту доставки путём теплообмена с воздухом, который в дальнейшем сжижается [9]. Полученный жидкий воздух можно погрузить в пустые дегазированные танки судна-газовоза и транспортировать в порт погрузки газа. Там воздух регазифицируется в процессе теплообмена с газом, который при этом сжижается. Такая «регенерация холода» позволит уменьшить затраты энергии на сжижение новой партии газа. Однако перевозка сжиженного воздуха в обратном рейсе газовоза потребует решения ряда достаточно сложных технических проблем. В частности, при продолжительном рейсе в связи с преимущественным испарением азота содержание кислорода в жидком воздухе может превысить предел 23 %, допустимый по нормам техники безопасности.

Более эффективной является регазификация СПГ в порту выгрузки с помощью установки для разделения воздуха. Благодаря теплообмену с газом воздух можно охладить достаточно глубоко и после расширения в детандере разделить в ректификационной колонне на азот, кислород и аргон. Полученные при этом ценные продукты разделения воздуха необходимы для многих отраслей техники.

Возможны различные тепловые схемы, в которых осуществляется регазификация сжиженного газа в процессе теплообмена с воздухом. В частности, если жидкий метан сжать насосом до стандартного давления в трубопроводе природного газа (7 МПа) и затем при теплообмене с воздухом нагреть от 115 до 285 К, то разность значений энтальпии метана будет равна 781,6 кДж/кг [7]. В современных воздуходелительных установках среднего давления для получения жидких кислорода и азота воздух сжимают до давления 7 МПа при использовании поршневых компрессоров и до 3,5 МПа — центробежных компрессоров [10]. Разность значений энтальпий воздуха на изобаре

7 МПа в интервале температур 120...290 К равна 313,4 кДж/кг, а на изобаре 3,5 МПа в том же интервале температур 319,1 кДж/кг [11]. Следовательно, 1 кг метана при регазификации и теплообмене с воздухом, находящимся при указанных значениях давления, может охладить, соответственно, 2,49 и 2,45 кг воздуха от комнатной до криогенной температуры. Воздух с начальным давлением 7 МПа и температурой 120 К после расширения в турбодетандере до давления в нижней колонне 0,6 МПа будет иметь степень сухости 0,20, что позволит эффективно извлекать из него жидкие продукты разделения.

Воздухоразделительные установки средней производительности перерабатывают до 9000 м³ (11600 кг) воздуха в час [10]. Наиболее крупные воздуходелительные установки — до $3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ м³ ($3,88 \cdot 10^5 \dots 6,46 \cdot 10^5$ кг) воздуха в час [12]. Естественно, возникает задача согласования количества перерабатываемого воздуха с количеством сжиженного газа, подаваемого на регазификацию. Она решается благодаря наличию в инфраструктуре порта выгрузки ёмкостей для хранения сжиженного газа. Поскольку выгрузка сжиженного газа длится обычно 10...12 ч [1], он перекачивается в эти ёмкости, а уже оттуда по мере необходимости направляется потребителям в газообразном состоянии через установку для регазификации. В качестве такой установки можно использовать воздуходелительную.

Капитальные затраты на воздуходелительную установку, использующую регазификацию сжиженного природного газа для охлаждения прямого потока воздуха, не превысят капитальные затраты на традиционную установку, так как тепловая нагрузка теплообменных аппаратов одинакова, а производительность турбодетандеров при охлаждении воздуха с помощью газа может быть уменьшена.

Расход энергии на получение 1 м³ кислорода в воздуходелительных установках составляет в среднем 0,4 кВтч [12], т.е. 1440 кДж. Масса жидкого метана на газовозе грузоподъемностью 150000 м³ равна $63,27 \cdot 10^6$ кг. При регазификации 95 % массы перевозимого метана (5 % остаются в танках для поддержания низкой температуры при балластном переходе) от воздуха будет отведено $46980 \cdot 10^6$ кДж теплоты. Это количество теплоты соответствует энергии, затрачиваемой для получения $32625 \cdot 10^3$ м³ кислорода, которые могут быть выработаны в наиболее крупных воздуходелительных установках в течение 14...23 суток.

Таким образом, процесс регазификации сжиженного газа можно использовать как эффективный источник холода для работы воздуходелительной установки. Это позволит исключить предварительное охлаждение воздуха холодильными машинами перед его разделением, применяемое в настоящее время [10]. Особенно полезным может быть охлаждение с помощью сжиженного газа в установках, производящих жидкие кислород и азот, поскольку в таких установках расход вещества в обратном потоке существенно меньше, чем в прямом потоке.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящей работе результаты расчётов показали, что при охлаждении большой массы сжиженного газа до температуры, которая на несколько градусов Цельсия ниже температуры насыщения при давлении перевозки, теплоприток к газу из окружающей среды будет компенсирован медленным нагреванием газа. Это предотвратит испарение части сжиженного газа при перевозке и исключит необходимость её повторной конденсации с помощью судовой установки либо утилизации в качестве топлива в энергетической установке.

Можно также использовать криогенный потенциал сжиженного газа, если регазифицировать его в порту доставки с помощью воздухоразделительной установки за счёт теплообмена с воздухом. При этом 1 кг сжиженного метана может охладить около 2,5 кг воздуха от комнатной температуры до 120 К.

В принципе, предложенные усовершенствования процессов перевозки и регазификации сжиженных газов применимы не только при морских перевозках таких газов, но и при их перевозках таких газов речным, железнодорожным и автомобильным транспортом. Внедрение рассмотренных усовершенствований может дать значительный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загоруйко В.А., Голиков А.А. Судовая холодильная техника. — Киев: Наукова думка, 2000. — 607 с.
2. Зайцев В.В., Коробанов Ю.Н. Суда-газовозы. —

Л.: Судостроение, 1990. — 301 с.

3. Козырев В.К. Морская перевозка сжиженных газов. — М.: Транспорт, 1986. — 208 с.

4. Вассерман О.А., Шутенко М.А. Спосіб транспортування зріджених газів при температурі нижче температури насичення. Заява про видачу патента України а 2010 12221, дата подання 15.10.2010.

5. Tusiani M.D., Shearer G. LNG: A Nontechnical Guide. — Tulsa, Oklahoma, USA: PenWell Corporation, 2007. — 436 p.

6. Bronfenbrener J.C., Pillarella M., Solomon J. Review the process technology options available for the liquefaction of natural gas. Selecting a suitable process. — LNG Industry, summer 2009 issue. — Surrey, UK: Palladian Publications.

7. Термодинамические свойства метана/ В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко и др. — М.: Изд. стандартов, 1979. — 349 с.

8. Термодинамические свойства пропана/ В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко, В.А. Цымарный — М.: Изд. стандартов, 1989. — 266 с.

9. Вассерман О.А., Шутенко М.А. Спосіб зменшення витрат енергії на зрідження природного газу перед його морським перевезенням. Заява про видачу патента України а 2010 13103, дата подання 04.11.2010.

10. Разработка и освоение производства воздухоразделительных установок средней производительности/ Б.А. Скородумов, В.Н. Карпов, Ю.Г. Писарев, А.К. Головченко// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2003. — № 8. — С. 22-27.

11. Термодинамические свойства воздуха/ В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. — М.: Изд. стандартов, 1978. — 275 с.

12. Каталог ОАО «Криогенмаш»: www.cryogenmash.ru/upload/catalog_cryogenmash_2008.pdf.



ООО «НПО Мониторинг»

Высокоэффективные атмосферные испарители криогенных продуктов

Компания ООО «НПО Мониторинг» выпускает стандартные навесные и отдельностоящие, производственные и наддувные атмосферные испарители на базе алюминиевой или биметаллической оребренной трубы






- Атмосферные испарители среднего давления (4,0 МПа) для газификации продуктов разделения воздуха, диоксида углерода и СПГ
- Атмосферные испарители высокого давления (25,0 МПа) для использования в составе баллонных наполнительных станций и АГНКС
- Электрические испарители • Системы хранения и газификации криопродуктов, наполнительные станции «под ключ»
- Нестандартное криогенное оборудование • Газоразрядные и наполнительные рампы • Баллонные сборки

ООО «НПО Мониторинг»
105484, г. Москва, ул. 16-я Парковая, дом 26
105523, г. Москва, Щелковское шоссе, дом 100

Телефоны: +7 (495) 468-7503, +7 (499) 781-8875, +7 (495) 506-6802
Факс: +7 (495) 468-7503
e-mail: mail@monitoring-npo.ru
www.monitoring-npo.ru