

Топливо и энергетика

УДК 662.614.2:536.13:621.1

Повышение эффективности процессов регазификации сжиженного природного газа

Березовский В.Н., Пятничко А.И., Крушневич Т.К.

Институт газа НАН Украины, Киев

Исследованы процессы регазификации сжиженного природного газа. Разработаны технологические схемы, позволяющие существенно повысить технико-экономические характеристики этих процессов по всем основным показателям. Использование пароконденсационного силового цикла с турбодетандером позволяет получать одновременно тепловую энергию для регазификации и электрическую энергию для внутренних потребностей цикла (привод оборудования) или передачи к внешним потребителям.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, регазификация, энергетическая эффективность, турбодетандер.

Досліджено процеси регазифікації зрідженого природного газу. Розроблено технологічні схеми, що дозволяють істотно підвищити техніко-економічні характеристики цих процесів за всіма основними показниками. Використання пароконденсаційного силового циклу з турбодетандером дозволяє отримувати одночасно теплову енергію для регазифікації та електричну енергію для внутрішніх потреб циклу (привід обладнання) або передачі до зовнішніх споживачів.

Ключові слова: зріджений природний газ, регазифікація, енергетична ефективність, турбодетандер.

На протяжении многих лет во всем мире стабильно развивается рынок сжиженного природного газа (СПГ). В последнее время повышенный интерес к СПГ проявляют и страны бывшего СНГ. В Российской Федерации с 2008 г. СПГ производится и экспортируется в рамках проекта «Сахалин Энерджи». Правительство Литвы в 2010 г. приняло решение о строительстве терминала сжиженного газа в Клайпедском морском порту, что позволит обеспечить объемы поставок газа 3,53 млрд м³/год. Вопрос о возможности подключения к этому терминалу рассматривается и в Беларуси. До сегодняшнего

дня весь потребляемый газ Литва и Беларусь закупают в России. В 2005 г. в Эстонии было начато проектирование терминала сжиженного газа в порту Силламяэ, однако в связи с мировым кризисом оно приостановлено. В целом в 2010 г. Еврокомиссия выделяет на газовые проекты около 1 млрд долл.

Создание первого собственного комплекса-терминала приемки, хранения и регазификации СПГ, который будет поступать в Украину морским путем, является актуальным. Так как создание собственных комплексов производства СПГ пока невозможно, то наиболее оптималь-

ным вариантом является закупка СПГ в странах Северной Африки (Алжир, Египет и др.) и Ближнего Востока (прежде всего Катар). Этот вопрос уже давно обсуждается на государственном уровне, однако главной проблемой остается неопределенность в вопросах, связанных с инвестированием.

На первом этапе целесообразно рассматривать возможность поставок СПГ в количестве 5 млрд м³/год. В перспективе можно рассчитывать на 10 млрд м³/год. При выборе места расположения СПГ терминала необходимо учитывать объемы потребления газа и возможности инфраструктуры.

В качестве потенциально возможных рассмотрены порты Черного и Азовского морей. Выбрано три наиболее перспективных варианта: порто-пункты «Очаков» (приоритетный), «Южный» и «Феодосийский». Основными средствами для транспортировки СПГ в Украину морскими путями являются специальные танкеры.

Стоимость терминала приемки СПГ зависит от его типа, места расположения и мощности. Для Украины целесообразно выбрать наземный СПГ терминал мощностью 10 млрд м³/год. Его стоимость будет примерно 1 млрд долл. С учетом развития портовой инфраструктуры количество необходимых капиталовложений возрастет до 3 млрд долл. [1].

На специально оборудованных СПГ терминалах используются криогенные насосы для перекачки переохлажденного метана, который находится под избыточным давлением, и другое специализированное оборудование. Строительством терминалов приемки СПГ занимаются специальные компании.

Рассмотрим более подробно особенности процесса регазификации СПГ — процесса перехода криогенной жидкости в газообразное состояние.

Для регазификации СПГ широко используются испарители прямого и непрямого подогрева. В испарителях прямого подогрева поток газа получает тепло непосредственно от горячего теплоносителя. При непрямом подогреве тепло передается к газу от промежуточного теплоносителя (газа или жидкости), который нагревается от внешнего источника.

На СПГ терминалах чаще всего в качестве теплоносителя используется морская вода, а в теплообменниках типа «регазификатор с орошением» морская вода стекает вниз по вертикальным трубкам, внутри которых в противотоке испаряется СПГ.

С целью экономии энергии и оптимизации производства в процессе регазификации рассматриваются разные способы утилизации холода

СПГ в различных областях производства, где необходим холод.

Рассмотрим принципиальные решения технологического процесса регазификации СПГ с производством электрической энергии и холода на уровне от -10 до -20 °С. Затраты энергии на регазификацию природного газа можно компенсировать за счет производства работы в процессе регазификации СПГ [2].

На рис.1 в общем виде представлена технологическая схема процесса регазификации СПГ [3]. Для нагрева потока СПГ в данном случае используется морская вода и пропановый силовой цикл соответственно, однако возможны другие варианты при выборе рабочего тела.

Холод СПГ используется для конденсации пропана, который выступает в качестве рабочего тела для паротурбинной установки, а перепад давления природного газа после его регазификации используется для дополнительного производства электроэнергии.

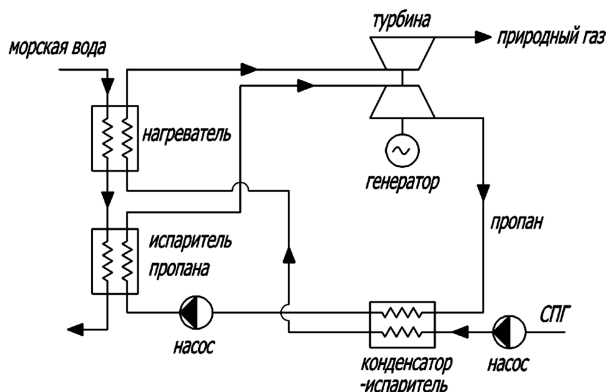


Рис.1. Криогенная энергетическая установка.

С целью повышения энергетической эффективности процесса регазификации СПГ и оптимизации энергетических затрат в Институте газа НАНУ разработана технологическая схема процесса регазификации СПГ при использовании парокompрессионного силового цикла для производства электрической энергии [4].

На рис.2 представлена схема установки регазификации СПГ с производством работы, которая реализуется по одно- и двухконтурному силовым циклам.

Процесс осуществляется следующим образом. СПГ с давлением около 1,0 ата и температурой -160 °С с помощью специального криогенного насоса (НК) подается на регазификацию в испаритель ТО-1, где нагревается потоком газа, который постоянно циркулирует в силовом цикле 1–2–3–4. В теплообменнике ТО-3 осуществляется дополнительный подогрев пото-

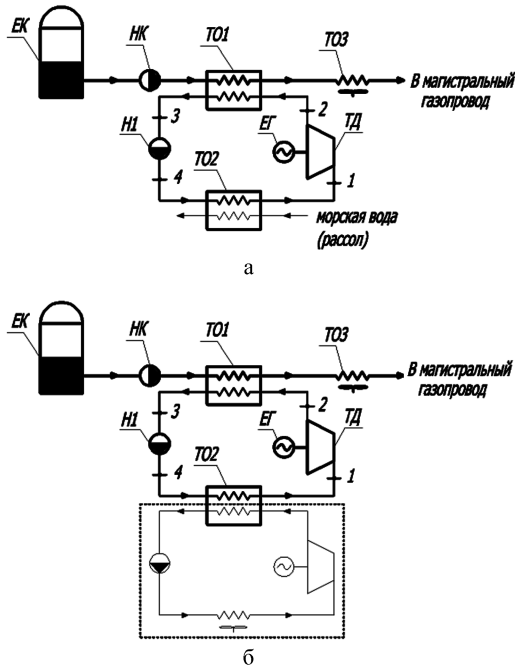


Рис.2. Принципиальная технологическая схема процесса регазификации СПГ и производства электрической энергии в одноконтурном (а) и бинарном (б) силовых циклах: ЕК – криогенная емкость для СПГ; НК – криогенный насос для перекачки СПГ; ТД – турбодетандер; ЭГ – электрогенератор; Н1 – циркуляционный насос; ТО-1 – теплообменник-испаритель; ТО-2 – рекуперативный теплообменник; ТО-3 – теплообменник для дополнительного подогрева газа перед подачей в магистральный газопровод. Потоки: 1–2 – процесс расширения рабочего тела (РТ) в турбодетандере с производством работы ($N_{отв}$); 2–3 – процесс охлаждения и конденсации РТ (условно равновесный и изобарный процесс, теплота отводится от РТ ($Q_{отв}$)); 3–4 – процесс сжатия РТ в насосе (условно изохорный процесс, работа отводится ($N_{подв}$)); 4–1 – процесс нагрева РТ в теплообменнике (условно изобарный процесс, теплота подводится к РТ ($Q_{подв}$)).

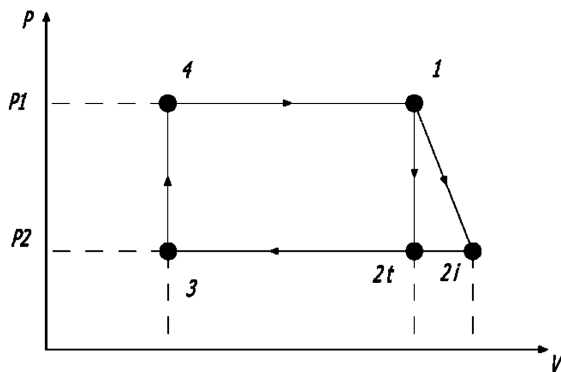


Рис.3. Силовой цикл в P-V координатах: 1–2t–3–4 – идеальный цикл; 1–2i–3–4 – реальный цикл.

ка газа перед подачей в магистральный газопровод. В качестве греющего теплоносителя тут может выступать воздух с температурой окружающей среды, морская вода либо другие тепловые источники. Газ поступает в магистраль-

ный газопровод с соответствующими параметрами по давлению и температуре. Силовой цикл 1–2–3–4 включает последовательность процессов: расширение рабочего тела (РТ) в детандере, в результате чего снижаются давление и температура; охлаждение в испарителе в результате передачи теплоты к СПГ; сжатие РТ насосом и подогрев в рекуператоре. В результате перепада давления в детандере можно получить полезную работу, которую используют для производства электрической энергии в электрогенераторе, установленном на одном валу с турбодетандером.

В силовом цикле 1–2–3–4 в качестве РТ может использоваться газовая смесь (метан-этан-пропан-бутан) в разных соотношениях. В мировой практике для этого широко используется этилен. По результатам анализа в качестве наиболее оптимального РТ выбрана смесь пропан : бутан = 90 : 10 (%).

Установлено также, что для увеличения производства электроэнергии целесообразно использовать дополнительный циркуляционный контур, который на рис.2,б условно изображается пунктирной линией. В дополнительном контуре используется другой теплоноситель, который нагревает газовую смесь в основном контуре. В этом контуре также обеспечивается производство электроэнергии, но в меньших количествах.

На рис.3 графически представлен силовой цикл 1–2–3–4 в P-V координатах.

Запишем уравнение энергобаланса силового цикла 1–2–3–4, исходя из первого закона термодинамики:

$$\sum E_{подв} = \sum E_{отв},$$

где $\sum E_{подв}$, $\sum E_{отв}$ – общая подведенная и отведенная энергия в цикле.

Тогда

$$Q_{подв} + N_{подв} = Q_{отв} + N_{отв}, \quad (1)$$

или можно записать:

$$Q_{подв} - |Q_{отв}| = N_{отв} - |N_{подв}| = N_{ц},$$

где работа цикла $N_{ц} > 1$ всегда.

Принимаем в нашем случае:

$$Q_{подв} = Q_{ТО-2};$$

$$Q_{отв} = Q_{ТО-1};$$

$$N_{отв} = N_{ТД};$$

$$N_{подв} = N_{Н};$$

$$Q_1 = Q_{ТО-2} = \Delta H_{4-1} = H_1 - H_4;$$

$$Q_2 = Q_{ТО-1} = \Delta H_{2-3} = H_3 - H_2;$$

$$N_1 = N_{Н} = -\Delta H_{3-4} = H_3 - H_4;$$

$$N_2 = N_{ТД} = -\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2. \quad (2)$$

Для оценки эффективности силового цикла вводится тепломеханический коэффициент η_t (польза/затрата):

$$\eta_t = N_{\text{ц}}/Q_1 = (Q_1 - |Q_2|)/Q_1 = (N_2 - |N_1|)/Q_1 = [(N_1 - H_2) - (H_4 - H_3)]/(H_1 - H_4), \quad (3)$$

где $\eta_t < 1$ всегда.

Для оценки величины работы насоса по отношению к работе, которая производится в детандере, вводится коэффициент ϕ_t :

$$\phi_t = N_1/N_2. \quad (4)$$

Пример. На регазификацию подается поток СПГ с давлением 1,2 ата и температурой -162 °С. В криогенном насосе поток СПГ сжимается до 41 ата и подается в испаритель, где подогревается до -30 °С за счет подвода теплоты от внешнего цикла и дополнительно подогревается до 10 °С перед подачей в магистральный газопровод. В силовом цикле 1–2–3–4 в качестве теплоносителя используется газовая смесь пропан : бутан = 90 : 10 (%).

В циркуляционном насосе жидкость сжимается до 12,0 ата, а ее температура при этом составляет $-37,4$ °С. Далее в рекуперативном теплообменнике она подогревается до 42 °С за счет подвода теплоты от дополнительного циркуляционного контура (см. рис.2,6). В детандере происходит процесс расширения газа, его давление понижается от 12,0 до 1,2 ата, и поток с температурой $27,5$ °С направляется в испаритель, в котором он нагревает поток СПГ, и происходит регазификация. В дополнительном циркуляционном контуре процесс происходит аналогично.

Параметры потоков

Физическая величина	Детандер	Насос	ТО-2
Абсолютная энтальпия, кДж	190487/ 97731	-278777/ -276718	-276718/ 190487
Температура, °С	42,0/-27,5	-38,0/-37,4	-37,4/42,0
Давление, МПа	1,20/0,12	0,12/1,20	1,20/1,20
Тепловая мощность, кВт	-	-	543,000
Работа, кВт	107,9	-2,400	-

Примечание. В числителе — на входе в аппарат, в знаменателе — на выходе из него.

В таблице представлены результаты расчетов основных параметров потоков силового цикла. Расчеты произведены на массовый объем 5 т/ч газовой смеси, которая постоянно циркулирует в контуре, и на 3 т/ч СПГ, который подается на регазификацию.

Из (2) тепловую мощность теплообменника-испарителя можно определить по заданным абсолютным энтальпиям следующим образом:

$$Q_{\text{ТО-1}} = \Delta H_{2-3} = H_3 - H_2 = (-278\,777 - 97\,731)/860 = -437,8 \text{ кВт},$$

или, исходя из (1):

$$|Q_{\text{ТО-1}}| = Q_{\text{ТО-2}} - N_{\text{т}} + |N_{\text{н}}| = 543 - 107,9 + 2,4 = 437,8 \text{ кВт}.$$

Согласно (4):

$$\phi_t = (2,4/108) \cdot 100 \% = 2,2 \%.$$

Ввиду малости работой насоса можно пренебречь.

Эффективность силового цикла, согласно (3):

$$\eta_t = [(108 - 2,4)/543] \cdot 100 \% = 19,5 \%.$$

При усовершенствовании цикла с учетом полезной работы, произведенной в детандере, в рассмотренном примере в обоих циркуляционных контурах реально достичь мощности в 160 кВт электрической энергии, а также дополнительно получить 224 кВт холода при температуре -16 °С.

Выводы

Разработка новых усовершенствованных методов регазификации СПГ позволяет существенно улучшить технико-экономические характеристики данного процесса по всем основным показателям. При разработке таких методов следует принимать во внимание необходимость оптимизации энергетических затрат, а именно: уменьшение затрат энергии на собственные технологические нужды процесса, а также возможности повышения термодинамической эффективности (КПД) процесса с промежуточным теплоносителем, который используется для испарения и нагрева потока СПГ.

Главной особенностью разработки является использование для испарения СПГ паро-конденсационного силового цикла с турбодетандером, что позволяет получать полезную работу у потребителя для частичного покрытия затрат энергии на регазификацию. Например, на терминале производительностью 5 млрд м³/год СПГ в процессе регазификации при использовании рассмотренных технологий можно получать до 186 млн кВт·ч электрической энергии в год при использовании детандерной установки мощностью 21,7 МВт.

Электрическая энергия, которая производится в электрогенераторе за счет перепада давления в детандере, может быть использована в следующих направлениях: на собственные нужды, в том числе на привод насосов; на поставку внешним потребителям; на дополнительный подогрев газа.

Холод теплообменника ТО-3 целесообразно утилизировать, например, в расположенных поблизости холодильных камерах для хранения продуктов.

Для повышения термодинамической эффективности силового детандерного цикла в каждом конкретном случае необходимо рассматривать следующие основные направления: повышение давления P_1 на входе в детандер; повышение начальной температуры цикла T_1 ; совместное повышение температуры и давления (P_1, T_1); рациональный покомпонентный подбор рабочего тела для минимизации потерь эксергии при конечных разностях температур в теплообменниках.

Список литературы

1. Уніговський Л.М., Частухін В.В., Лактіонов О.В., Куцан Н.В. Можливість постачання скрапленого природного газу в Україну // Нафт. і газова пром-сть. — 2009. — № 1. — С. 7–9.
2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. — М.: Энергия, 1968. — 280 с.
3. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Криогенные комплексы производства и отгрузки СПГ, его приема, хранения и регазификации в системе международной торговли // Техн. газы. — С. 2–19.
4. Пятничко А.И., Онопа Л.Р., Лавренченко Г.К. Анализ эффективности производства работы при регазификации СПГ // Там же. — 2010. — № 3. — С. 20–25.

Поступила в редакцию 13.10.10

The Efficiency of Liquefied Natural Gas Regasification Processes Increase

Berezovsky V.N., Pyatnichko A.I., Krushnevich T.K.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The processes of liquefied natural gas regasification are investigated. The technological circuits that allow significant increase of technological and economic parameters of the processes are developed. The application of steam and condensation power cycle with turbine expander can simultaneously obtain thermal energy for regasification and electrical energy for the cycle internal demands (equipment gears (pumps)) or for external consumers transfers.

Key words: regasification, liquefied natural gas, expander, electric power, energy efficiency, pipeline, evaporator, power cycle.

Received October 13, 2010

УДК 662.6

Исследование стабильности горения смесей углей марок Т и АШ

*Бесценный И.В., Бондзик Д.Л., Щудло Т.С.,
Нехамин М.М., Евтухов В.Я., Дунаевская Н.И.*

Институт угольных энерготехнологий НАНУ, Киев

Представлены результаты экспериментальных исследований стабильности факела при сжигании смесей антрацита и тощего угля. Проанализирована зависимость расхода газа для стабилизации горения от содержания тощего угля в смеси. При помощи программы Ansys Fluent уточнены особенности течения в тракте установки.

Ключевые слова: пылеугольное сжигание, угольные смеси, стабильность факела.