

УДК 621.6:620.9

М. А. ГОЦУЛЯК, Д. С. МИНЧЕВ, А. В. НАГОРНЫЙ, Н. С. БОНДАРЕНКО*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина***РАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСА РЕГАЗИФИКАЦИИ LNG-ТЕРМИНАЛА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ХАРАКТЕРЕ ОТПУСКА ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Рассмотрен выбор рациональной схемы комплекса регазификации LNG-терминала производительностью 5 млрд. м³/год при переменном характере отпуска природного газа потребителям. Предложено использование двух параллельных веток регазификации, в каждой из которых для генерации электроэнергии применяется турбодетандер с двухступенчатой осевой турбиной и обеспечивается возможность плавного изменения расхода газа в каждой из веток вплоть до полного отключения одной из них. Показано, что применение предлагаемой схемы позволяет увеличить количество вырабатываемой электроэнергии более чем в два раза при снижении расхода газа ниже 70 % номинального по сравнению с использованием одного турбодетандера, рассчитанного на номинальный режим.

Ключевые слова: LNG-терминал, сжиженный природный газ, регазификация, турбодетандер.

Введение

С 2010 г. доля сжиженного природного газа (СПГ) в общем объеме импортируемого газа составляет более 30% на мировом рынке первичной энергии. Это обусловлено рядом факторов: диверсификация источников поставок энергетического ресурса, либерализация условий торговли со стороны экспортера, снижение себестоимости на сжижение, транспортировку и регазификацию природного газа в результате технологического развития и роста спроса на топливо.

На сегодняшний день в мире введены в эксплуатацию 110 терминалов, 18 находятся в завершающей стадии и 23 строятся [1].

Постановка проблемы

Регазификационный LNG-терминал производительностью 5 млрд. м³/год, строительство которого планируется в Одесской области [2], может быть выполнен при различных энергетических схемах регазификации СПГ.

Наиболее энергоемким в работе терминала является процесс регазификации СПГ, требующий подвода большого количества тепла для испарения и нагрева природного газа от – 162 °С до 10 °С (свыше 12400 кДж тепла на 1000 м³). Возможность использовать природные ресурсы (воздух, морскую воду), в зависимости от географического месторасположения LNG-терминала, или генерировать электроэнергию для покрытия собственных нужд терминала, утилизируя энергию избыточного давления природного газа при использовании турбодетандера (ТД), а также утилизировать низкопотенциальную энергию

СПГ, затраченную на сжижение газа, способствует минимизации энергетических затрат терминала. В тоже время, необходимо учитывать, что отпуск газа потребителям на протяжении года характеризуется колебанием расхода 30...120% от номинального. Как следствие комплекс регазификации (КР), оптимально работающий на расчётном режиме, при уходе с него может существенно ухудшать свои параметры.

Таким образом, рассмотрение условий реализации энергетической схемы, обеспечивающих максимальную эффективность регазификации СПГ во всём диапазоне расходов отпускаемого газа с учётом изменения климатических условий, является актуальным.

Обзор литературы

На ряде приемных LNG-терминалов реализовано несколько параллельно работающих схем регазификации, в которых используются разные источники тепла и типы регазификационных установок. Это позволяет регулировать производительность комплекса регазификации при изменении характера потребления природного газа.

Например, LNG-терминал Dahej Индии производительностью 14 млрд. м³/год имеет три параллельно работающие ветки регазификации [3]. В каждой ветке используется свой источник тепла: окружающий воздух, продукты сгорания, уходящие газы электрогенерирующей газотурбинной установки (ГТУ) мощностью 37,5 МВт.

В КР Marmara Ereglisi (Турция) производительностью 4 млрд. м³/год в качестве теплоносителя в испарительных установках типа ORV (Open Rack

Vaporizer) использует морскую воду, но при снижении ее температуры до 6°C, включаются испарители типа SCV (Submerged Combustion Vaporizer) [4]. Условия работы комплекса регазификации в умеренном морском климате не позволяют использовать в качестве источника тепла морскую воду или воздух. Поэтому Zeebrugge LNG-терминал в Бельгии производительностью 9 млрд. м³/год газа работает совместно с когенерационной электростанцией мощностью 40 МВт [5]. Уходящими газами подогревается вода в испарителях типа SCV, что уменьшает расход топлива для регазификации СПГ.

Существуют способы снижения себестоимости отпускаемого газа, основанные на утилизации низкотемпературной энергии СПГ в химической промышленности (ожижение водорода, кислорода, азота, разделение воздуха), требующие расширенной инфраструктуры комплекса регазификации. Единичным примером является Senboku LNG-терминал в Японии производительностью 20 млрд. м³/год. На нем организована каскадная схема утилизации энергии холода СПГ до 77% от затраченной энергии на сжижение природного газа. Суммарная мощность генерируемой электроэнергии 1100 МВт. Кроме ПГТУ используется пропановая турбодетандерная установка [6].

Турбодетандеры или детандер-генераторы широко применяются на газораспределительных пунктах, с целью утилизации энергии избыточного давления природного газа. Отличаются конструкцией, производительностью, пропускной способностью, параметрами на входе и выходе в зависимости от места включения в систему газотранспортировки. На рынке представлены зарубежные производители Atlas Copco (Швеция), General Electric, L.A. Turbine (США), RMG by Honeywell (Германия) и отечественные «Турбогаз», «Зоря»-«Машпроект».

При выборе максимально эффективного способа регазификации СПГ с целью минимизации энергетических затрат, как видно, создаются индивидуальные проектные решения. В рассмотренных источниках не представлена информация или рекомендации по составу системы регазификации для рационального регулирования производительности КР при колебании расхода отпускаемого газа и использовании турбодетандеров для получения электроэнергии. Генерирование электроэнергии, покрывающей собственные нужды терминала, способствует снижению себестоимости отпускаемого газа, что определяет необходимость настоящей работы.

Цель работы

Определение рациональной схемы комплекса регазификации LNG-терминала для обеспечения

максимальной выработки электроэнергии при переменном характере отпуска газа потребителям.

Основной материал

Генерация электроэнергии в комплексе регазификации СПГ основана на использовании энергии избыточного давления газа в турбодетандерной установке. Исходными данными для проектирования турбодетандера на расчетном режиме (100% производительность КР) являются: расход природного газа, его параметры (температура, давление) на входе в ТД и на входе в магистральный трубопровод, конструкция ТД.

Принимается, что природный газ поступает в магистраль класса II, рабочее давление которой 1,4 МПа, с температурой выше 0 °С; давление в системе регазификации для получения максимальной работы расширения в ТД принимается близким к критическому, но не достигающем его (около 4 МПа).

Проанализировав климатические условия (среднемесячную температуру морской воды, воздуха, его влажность) северного Причерноморья в Одесской области, в качестве источника тепла в процессе регазификации СПГ принята морская вода, так как её температура на протяжении года не опускается ниже нуля, в отличие от температуры окружающего воздуха, а теплофизические свойства воды позволяют спроектировать более компактные и эффективные теплообменные аппараты [7].

На рис. 1 представлена тепловая схема комплекса регазификации с генерацией электроэнергии в турбодетандерной установке.

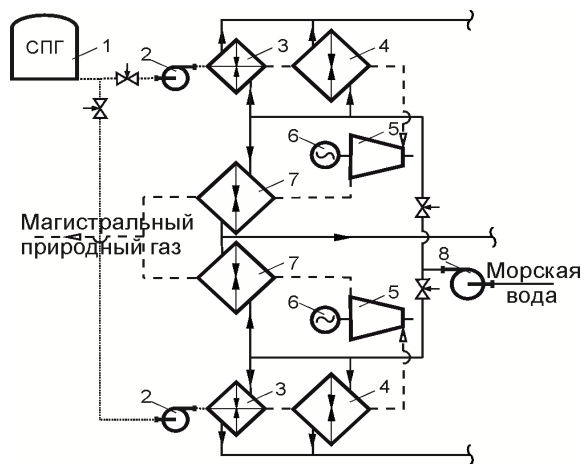


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема комплекса регазификации с генерацией электроэнергии в турбодетандерной установке: 1 – резервуар для хранения СПГ; 2, 8 – насосы соответственно для подачи СПГ и морской воды; 3 – испарители СПГ; 4 – перегреватель природного газа; 5 – ТД; 6 – электродвигатель; 7 – нагреватель природного газа

При выборе рациональной схемы регазификации ключевым вопросом является обеспечение эффективной работы турбодетандерной установки при переменном характере отпуска газа (годовое колебание расхода 30...120 %). Нами принято условие постоянства частоты вращения ротора ТД с целью упрощения электрической части турбодетандерной установки (генератора и его системы управления).

Для получения максимальной мощности вырабатываемой электроэнергии необходимо рациональное регулирование турбодетандера, которое может быть осуществлено следующими способами:

1. Перепуском части газа мимо ТД (в этом случае его пропускная способность проектируется для расхода газа 50...70% при номинальном давлении газа на входе).
2. Применением ТД с изменяемой геометрией соплового аппарата.
3. Применением нескольких параллельно работающих ТД с возможностью их подключения/отключения и независимого регулирования.
4. Разнообразная комбинация указанных выше способов.

Наиболее рациональным является применение нескольких параллельно работающих турбодетандеров с изменяемой геометрией соплового аппарата. Количество ТД определяется годовыми колебаниями потребления газа и гистограммой распределения режимов работы КР при различной производительности.

С этой точки зрения наиболее удачным является применение радиальных центробежных ТД, сочетающих высокий внутренний к.п.д. и относительную простоту выполнения поворотного соплового аппарата, что и предопределяет их подавляющее использование. В то же время по причине сложности обеспечения прочности рабочих колёс таких ТД при увеличении наружного диаметра их пропускная способность ограничена (160...200 тыс. м³/час).

В настоящей работе предлагается использование двух параллельно работающих веток комплекса регазификации, в каждой из которых применяется ТД осевого типа. Так как сопловое регулирование осевых ТД на современном этапе технологически затруднено, а перепусковое регулирование характеризуется значительными потерями энергии, то регулирование производительности КР обеспечивается плавным изменением производительности одной или одновременно двух веток регазификации. Применение двух параллельно работающих веток упрощает регулирование работы теплообменных аппаратов, для обеспечения целого ряда требований по температурам и давлениям теплоносителей [7].

Учёт особенностей работы турбодетандера при

переменном давлении, температуре и расходе газа рационально выполнять с использованием карт характеристик турбодетандера. Наиболее достоверные данные возможно получить используя экспериментальные характеристики или характеристики, построенные на основе опытных данных.

В настоящей работе была предпринята попытка выстроить расчетный комплекс таким образом, чтобы при необходимости его было удобно использовать для оценки параметров работы ТД в широком диапазоне возможных режимов работы при наличии некоторого количества экспериментальных данных. При этом принималось во внимание, что количество экспериментальных данных может быть ограниченным или неполным.

При построении и использовании характеристик ТД выполнялись следующие этапы:

1. Прямой расчёт турбодетандера для определения геометрии проточной части турбины.
2. Расчёт характеристик турбодетандера.
3. Преобразование характеристик в удобный для аппроксимации и интерполяции вид и их интеграция в общую расчётную методику.

Разработанные методики адаптированы для расчёта характеристик как радиальных центробежных, так и осевых турбодетандеров.

При прямом расчёте ТД использованы известные методики [8]. Так как состояние рабочего тела на входе в детандер может приближаться к критическому или быть сверхкритическим (критическое давление метана $p_{кр} = 4,64$ МПа, критическая температура $t_{кр} = -82,3$ °С), то использование уравнения состояния идеального газа для расчёта процесса расширения газа в турбине представляется невозможным. Для выполнения необходимых расчётов была произведена оцифровка табличных данных [9] следующих параметров состояния метана: истинной изобарной теплоёмкости c_p , удельной энтропии s , удельной энтальпии i и удельного объёма v при изменении температуры $T = 135...400$ К и давления $p = 4...60$ бар. Таким образом, при расчёте располагаемого теплоперепада, скоростей на входе и выходе в каждый элемент двух ступеней проточной части ТД используются результаты интерполяции табличных данных.

Расчётные геометрические параметры проточных частей ступеней и параметры работы ступеней на номинальном режиме приведены в таблице 1.

Для определения характеристик каждой ступени турбины использовалась методика, изложенная в [10], адаптированная для процесса расширения метана на основе использования табличных данных параметров состояния газа. В результате расчётов для каждой ступени были получены универсальные характеристики (рис. 2).

Таблица 1

Некоторые расчётные параметры проточных частей ступеней турбодетандеров

№	Наименование, размерность	Параметр	100% расхода		50% расхода	
			1 ст.	2 ст.	1 ст.	2 ст.
Геометрические параметры проточных частей						
1	Радиус рабочего колеса турбины на входе, м	r_{t1}	0,2595	0,2696	0,14285	0,153
2	Высота направляющего аппарата, м	$l_{н.а.}$	0,037	0,052	0,038	0,054
3	Радиус рабочего колеса турбины на выходе, м	r_{t2}	0,2595	0,2696	0,14285	0,153
4	Высота лопатки рабочего колеса, м	$l_{р.к.2}$	0,041	0,057	0,041	0,057
5	Количество лопаток соплового аппарата, шт	$Z_{пт}$	61	43	39	37
6	Угол выхода потока с направляющего аппарата, град	α_1	18,8	17,8	18	17
7	Угол входа потока на рабочие лопатки, град	β_1	47	56	76	73
8	Угол выхода потока с рабочего колеса, град	β_2	24	25	21	20
Параметры работы на расчётном режиме						
9	Внутренний к.п.д. ступени	η_i	0,809	0,806	0,821	0,819
10	Частота вращения, мин ⁻¹	n_t	7000	7000	14000	14000
11	Степень понижения давления	Π_t	1,55	1,63	1,55	1,63
12	Мощность ступени, кВт	$N_{ст}$	5066	5045	2544	2535
13	Приведенный расход газа, кг/с·К ^{0,5} /кПа	$G_{тпр}$	0,4984	0,7234	0,2492	0,3609

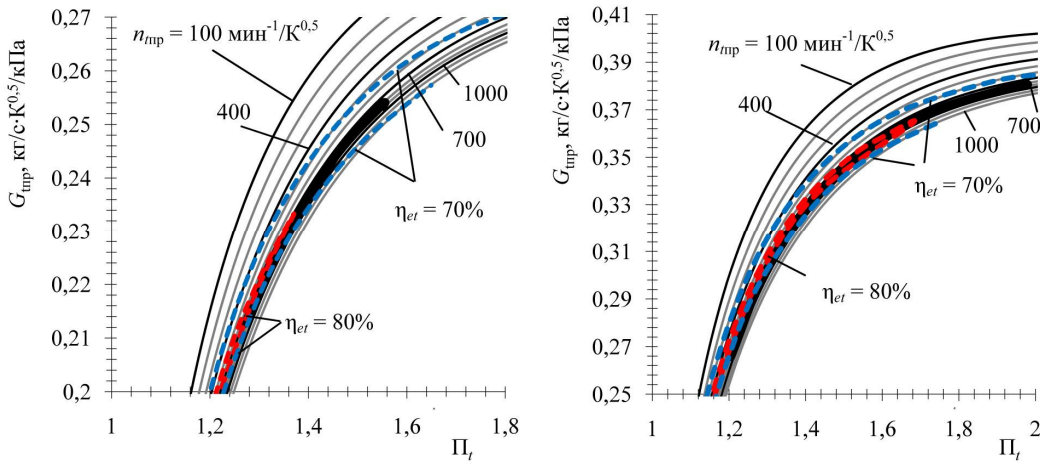


Рис. 2. Универсальные характеристики первой и второй ступеней турбодетандера совмещённые с характеристикой работы терминала при температуре ОС $t_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$

Расходная характеристика турбины (РХТ) и характеристика эффективности турбины (ХЭТ) представляются в приведенных параметрах совокупностью изотак вида:

$$\begin{aligned}
 \text{РХТ: } G_{тпр} &= f(\Pi_t) \Big|_{n_{тпр}=\text{idem}}; \\
 \text{ХЭТ: } \eta_t &= f(\Pi_t) \Big|_{n_{тпр}=\text{idem}}; \\
 G_{тпр} &= \frac{G_t \sqrt{T_t}}{p_t}; n_{тпр} = \frac{n_{ТК}}{\sqrt{T_t}},
 \end{aligned}$$

где G_t , $G_{тпр}$ – действительный и приведенный расход газов через ТД соответственно; T_t , p_t – температура и давление газов на входе в ТД; $n_{ТК}$, $n_{тпр}$ – действительная и приведенная частота вращения ротора ТД соответственно.

При работе многоступенчатой ТД на частичных режимах работы изменяется соотношение перепада давления газа по ступеням и условия работы каждой ступени. Для учета данных явлений разра-

ботан и реализован в виде программы алгоритм совместной интерполяции характеристик многоступенчатого турбодетандера. При этом обеспечиваются три варианта расчёта: 1) по заданным значениям приведенного расхода $G_{тпр}$ газа и давления газа на входе в турбодетандер p_t находится значение частоты вращения ротора турбодетандера n_t ; 2) по заданным значениям n_t и p_t находится значение $G_{тпр}$; 3) по заданным значениям n_t и $G_{тпр}$ находится значение p_t .

При выполнении итерационного поиска выполняется многократное интерполирование РХТ и ХЭТ для определения приведенного расхода газа через ступень и внутреннего к.п.д. ступени. При этом степень расширения Π_t для каждой ступени в ходе вычислений изменяется в очень широких пределах, что обуславливает высокие требования к качеству расчётных характеристик ступеней.

На основании совместного моделирования процессов испарения и нагрева газа в теплообмен-

ных аппаратах по расчётным методикам, приведенным в [10], а также процесса расширения газа в турбодетандере спроектированы элементы КР для двух вариантов: 1) при использовании одного ТД, рассчитанного на номинальный расход газа; 2) при использовании двух одинаковых ТД в составе параллельных веток регазификации (рис. 1), спроектированных на половинный расход газа. Количество и конструкция теплообменных аппаратов в обоих вариантах одинаково: 10 кожухотрубных испарителей, 10 кожухокоробчатых перегревателей и 10 кожухокоробчатых нагревателей. Во втором варианте теплообменники поровну поделены между двумя ветками регазификации. Все теплообменники подключены параллельно по морской воде.

На рис. 3 приведены результаты расчёта данных вариантов при минимальной и максимальной температуре морской воды. Как видно, вариант организации КР с двумя параллельными ветками обеспечивает более чем двукратное увеличение вырабатываемой электроэнергии при снижении производительности комплекса ниже 70 % от номинального значения. В то же время при расходе газа 70...120% от номинального наблюдается незначительное снижение мощности вырабатываемой электроэнергии главным образом по причине более низкого к.п.д. турбодетандера меньшего типоразмера. Следует отметить, что для получения максимального количества электроэнергии при работе КР в диапазоне 70...120 % номинального рационально выполнять неравномерное регулирование веток. Так, согласно расчётам, рациональны следующие соотношения относительного расхода по веткам регазификации: 60/60; 50/60; 60/40; 60/30; 50/30; 45/25.

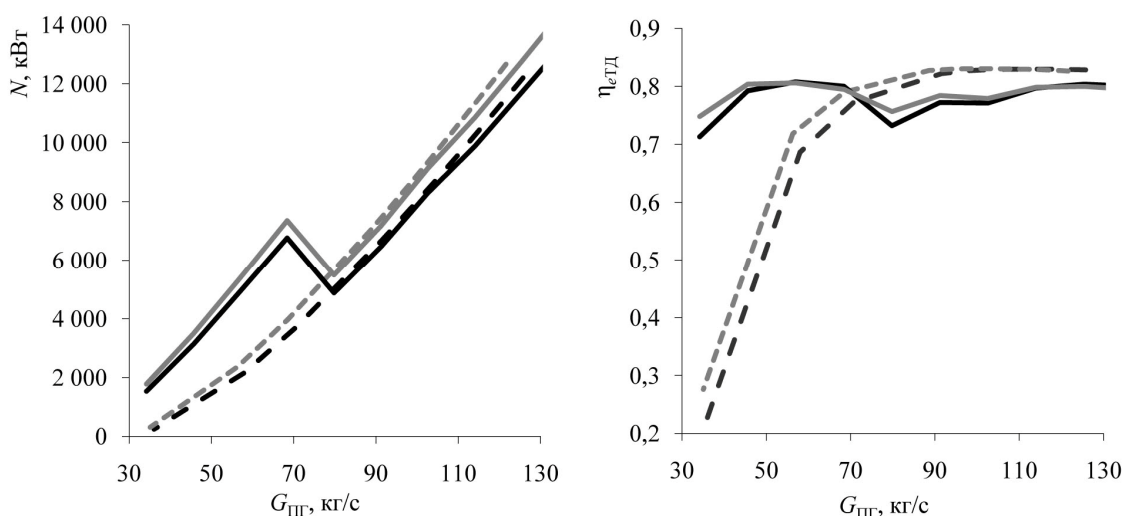


Рис. 3. Изменение мощности выработанной электроэнергии (N) и эффективного к.п.д. ТД ($\eta_{\text{ТД}}$) при изменении расхода природного газа $G_{\text{ПГ}}$ при температуре морской воды 23 °С (серые линии) и 3 °С (черные линии).

Сплошные линии – КР с одним детандер-генератором, пунктирные – КР с двумя детандер-генераторами

Заключение

Использование двух параллельных веток в составе КР LNG-терминала с детандер-генераторами в каждой ветке позволяет добиться более чем двукратного увеличения мощности вырабатываемой электроэнергии при снижении производительности терминала меньше 70% от номинального значения. В то же время наблюдается некоторое снижение мощности вырабатываемой электроэнергии при расходе газа свыше 70 % вследствие более низкой эффективности турбодетандеров малого типоразмера.

Добиться максимального значения мощности вырабатываемой электроэнергии во всём диапазоне расхода газа возможно использованием двух параллельно работающих турбодетандеров различного типоразмера в составе единой ветки регазификации. При этом один из турбодетандеров проектируется на 100 % расхода газа, а второй – на 50 %. Рассмотрение возможности реализации данной схемы, а также применения радиальных центростремительных ТД с регулируемым сопловым аппаратом представляет перспективу дальнейших исследований.

Литература

1. *World LNG plant & terminal [Electronic resource]. – Access: <http://www.globalng.info.com>. – 8.06.2015.*
2. *Національний проект «LNG Україна» - створення інфраструктури постачання скрапленого газу в Україну» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrproject.gov.ua/node/27>. – 8.06.2015.*

3. Maintenance and operation of Dahej LNG terminal [Electronic resource] / Petronet LNG Limited. – Access: http://petrofed.winwinhosting.net/upload/19-21_Oct_11/Session%20III_RSingh.pdf – 20.10.2011.

4. Terminal – Marmara Ereğlisi [Electronic resource]. – Access: <http://northmaritime.com/ports-info/marmare-gion/72-botas-terminal-marmara-ereglisi.html>. – 8.06.2015.

5. The LNG terminal of Zeebrugge: future developments [Electronic resource] / D. Nours, H. Verhaeghe, L. Van Damme, B. Deblauwe. – Access: http://www.dma.dk/themes/LNGinfrastructure/project/Documents/Infrastructure/Paper_LNGZeeb-rugge_Version5.pdf – 5.06.2014.

6. Evolution of an LNG Terminal: Senboku Terminal of Osaka Gas [Electronic resource] / Toshiro Otsuka. – Access: <http://members.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add11362pdf>. – 7.05.2013.

7. Визначення параметрів теплообмінних апаратів системи регазифікації LNG-терміналу про-

дуктивністю 5 млрд. м³ на рік [Текст] / М. О. Чеплюха, М. С. Бондаренко, Д. С. Мінчев, А. В. Нагірний // Холодильна техніка и технология. – 2014. – № 5 (151). – С. 43-50.

8. Романовський, Г. Ф. Теория и расчет паровых и газовых турбин [Текст] : учеб. пособие / Г. Ф. Романовский, А. Я. Ипатенко, В. Н. Патлайчук. – Николаев : УДМУ, 2000. – 292 с.

9. Загорученко, В. А. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана [Текст] / В. А. Загорученко, А. М. Журавлев. – М. : Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1969. – 236 с.

10. Мінчев, Д. С. Екстраполяція експериментальних характеристик радіальних центробежних турбін турбокомпресорів двигателів внутрішнього згорання [Текст] / Д. С. Мінчев, Ю. Л. Мошенцев, А. В. Нагорний // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 173-177.

Поступила в редакцію 8.06.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Кондиционирования и рефрижерации» Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

РАЦІОНАЛЬНА СХЕМА КОМПЛЕКСУ РЕГАЗИФІКАЦІЇ LNG-ТЕРМІНАЛУ ПРИ ЗМІННОМУ ХАРАКТЕРІ ВІДПУСКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М. О. Гоцуляк, Д. С. Мінчев, А. В. Нагірний, М. С. Бондаренко

Розглянуто вибір раціональної схеми комплексу регазифікації LNG-терміналу продуктивністю 5 млрд. м³/рік при змінному характері відпуску природного газу споживачам. Запропоновано використання двох паралельних гілок регазифікації, в кожній з яких для генерації електричної енергії використовується турбодетандер з двоступінчастою осьюовою турбіною та забезпечується можливість плавної зміни витрати природного газу в кожній з гілок до повного відключення однієї з них. Показано, що застосування запропонованої схеми дозволяє збільшити вироблення електроенергії більше ніж в два рази при зменшенні витрати газу нижче 70 % від номінального значення порівняно з використанням одного турбодетандера, розрахованого на номінальний режим.

Ключові слова: LNG-термінал, зріджений природний газ, регазифікація, турбодетандер.

REASONABLE LAYOUT FOR THE REGASIFICATION COMPLEX OF THE LNG TERMINAL AT VARIABLE NATURAL GAS DELIVERY CONDITIONS

M. O. Hozulyak, D. S. Minchev, A. V. Nagirnyi, M. S. Bandarenko

The results of the search for the reasonable layout of the regasification complex of the LNG terminal at variable natural gas delivery conditions due to consumers need are presented. The combination of two regasification branches with axial-flow two stage turboexpander for electricity generation together with the ability of smooth natural gas flow adjustment for each branch up to cutoff of one branch is proposed. Application of suggested layout provides more than two-times increment of the electricity generation if the total natural gas flow drops lower 70 % from the rated gas flow as it is shown.

Keywords: LNG terminal, liquefied natural gas, regasification, turboexpander.

Гоцуляк Марія Александрова – ассистент кафедры «Судовые и стационарные энергетические установки», НУК им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: marusichka.nik@mail.ru.

Мінчев Дмитрій Степанович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», НУК им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: misaidima@gmail.com.

Нагорний Антон Викторович – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», НУК им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: Nagorniy.A.W@yandex.ru.

Бондаренко Николай Степанович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Судовые и стационарные энергетические установки», НУК им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: nik_bond@ukr.net.