

## Топливо и энергетика

УДК 621.593

**Пятничко А.И., Онопа Л.Р., Жук Г.В.**

*Институт газа НАН Украины, Киев*

### Использование холода сжиженного природного газа для получения полезной энергии при его регазификации

Показана возможность регазификации сжиженного природного газа с производством полезной работы без затрат энергии от внешних источников. Рассмотрены две схемы процесса, основанные на цикле Ренкина, в которых верхним тепловым источником являются окружающая среда и отработавшие газы газотурбинной установки. Показано, что при использовании какого-либо бросового низкопотенциального источника теплоты значительно возрастает эффективность силового контура. В качестве рабочего тела применялись бинарные смеси на основе метана, этана, пропана и бутана. Исследовано влияние состава рабочего тела на эффективность силового цикла на разных температурных уровнях. КПД процесса производства энергии при утилизации отработавших газов газотурбинной установки и холода сжиженного природного газа при регазификации выше 80 %.

**Ключевые слова:** регазификация сжиженного природного газа, утилизация энергии холода, низкопотенциальное тепло, Q–T-диаграмма.

Показано можливість регазифікації зрідженого природного газу з виробництвом корисної роботи без витрат енергії від зовнішніх джерел. Розглянуто дві схеми процесу, засновані на циклі Ренкіна, в яких верхнім тепловим джерелом є навколишнє середовище та відпрацьовані газы газотурбінної установки. Показано, що при використанні будь-якого скидного низкопотенціального джерела тепла значно зростає ефективність силового контура. Як робоче тіло застосовувалися бінарні суміші на основі метану, етану, пропану та бутану. Досліджено вплив складу робочого тіла на ефективність силового циклу на різних температурних рівнях. ККД процесу виробництва енергії при утилізації відпрацьованих газів газотурбінної установки та холоду зрідженого природного газу при регазифікації вище 80 %.

**Ключові слова:** регазифікація зрідженого природного газу, утилізація енергії холода, низькопотенційне тепло, Q–T-діаграма.

В последние годы проблемы, связанные с производством и потреблением сжиженного природного газа (СПГ), приобрели для Украины особое значение, поскольку использование СПГ является одним из реальных путей диверсификации поставок природного газа в страну. Принятое решение о строительстве и ввод в действие СПГ-терминала производительностью 10 млрд м<sup>3</sup>/год может снизить зависимость Украины от импортного газа на 20–25 %.

Прогресс в отрасли СПГ привел к тому, что за последние 10 лет стоимость производства СПГ снизилась на 30–40 %. Примерно на 35–40 % вырос и экспорт сжиженного газа. Стоимость строительства новых заводов СПГ уменьшилась в 2 раза. Снизились расходы на транспортировку — использование так называемой мембранной технологии позволило увеличить вместимость газовых танкеров от 145 до 250 тыс. м<sup>3</sup> [1].

СПГ является уникальным по своим энергетическим и экологическим свойствам топливом, которое выгодно транспортировать на большие расстояния (более 4500 км). При газификации СПГ с давлением, близким к атмосферному, из 1 м<sup>3</sup> сжиженного газа получается около 600 м<sup>3</sup> природного газа. Кроме того, что СПГ вследствие высокой степени сжатия является калорически высокоэффективным топливом, он несет в себе огромный потенциал энергии холода, заложенный при сжижении природного газа: при производстве 1 т СПГ затрачивается около 380 кВт·ч электроэнергии.

В настоящее время большинство действующих терминалов по регазификации СПГ не используют этот криогенный потенциал, необратимо испаряя СПГ просто за счет тепла воздуха, морской воды или сжигания части природного газа. Однако мировые тенденции удорожания и возрастающего дефицита энергоносителей приводят к тому, что все больше внимания уделяется разработке криогенных систем утилизации энергии на новых терминалах. Пионером в этой области является Япония, которая, будучи самым крупным импортером СПГ в мире, с 1980 г. развивает инфраструктуру своих терминалов, связанную с полезным использованием холода для выработки электрической энергии и интегрирования процесса регазификации с другими потребляющими холод отраслями и производствами для снижения капитальных и операционных затрат. В табл.1 приведены данные о некоторых действующих производствах, связанных с использованием холода СПГ [2].

Наиболее значимым применением энергии холода СПГ при регазификации является генерация электроэнергии, которая экономически намного более эффективна, чем традиционный способ ее получения сжиганием топлива, и является экологически чистым производством. Используя установку регазификации СПГ производительностью 150 т/ч одновременно для получения электроэнергии, можно сократить выбросы CO<sub>2</sub> на 15000 т ежегодно [3].

Рассмотрим простую схему установки регазификации СПГ (рис.1), основанную на использовании термодинамического цикла Ренкина, в котором верхним тепловым источником является окружающая среда (морская вода), а нижним – сжиженный природный газ.

Для нагрева и испарения СПГ используется промежуточный теплоноситель – рабочее тело. Оно циркулирует в силовом контуре, приводя в движение турбо-

**Таблица 1. Направления использования энергии холода СПГ в процессе регазификации**

Применение	Страна
Производство электроэнергии	Япония
Разделение воздуха (получение жидких азота, кислорода, аргона)	Япония
Рефрижераторы и холодильники	Япония, Южная Корея
Охлаждение воздуха, подаваемого на газотурбинные установки	Индия, Япония, Испания
Производство сухого льда	Япония
Опреснение морской воды	США
Ожижение boiled-off-gas (BOG), образующегося при хранении СПГ	Япония, Южная Корея
Криозаморозка и разрушение пластмасс и отходов	Япония

детандер Д-1. Поступающий из емкости-хранилища под давлением 0,15 МПа СПГ сжимается до 3,94 МПа криогенным насосом Н-1 и подается в теплообменник ТО-1, где испаряется за счет теплообмена с рабочим телом силового цикла. Регазифицированный природный газ выходит из ТО-1 с температурой -50 °С, догревается дополнительно в теплообменнике ТО-4 морской водой до температуры -10 °С, после чего подается в магистральный трубопровод. Рабочее тело поступает в теплообменник ТО-1 в газообразном состоянии и конденсируется там за счет холода СПГ. Затем оно сжимается криогенным насосом Н-2 и подается в испаритель ТО-2, где за счет теплообмена с окружающей средой (морской водой, воздухом) нагревается и испаряется. Далее газообразное рабочее тело, расширяясь в детандере Д-1, приводит в действие электрогенератор Г-1, после чего опять направляется в теплообменник ТО-1.

Установка рассчитана на регазификацию 150 тыс. ст.м<sup>3</sup>/ч природного газа, при этом вырабатывается 1557 кВт полезной электроэнергии, которая может быть поставлена внешнему потреби-

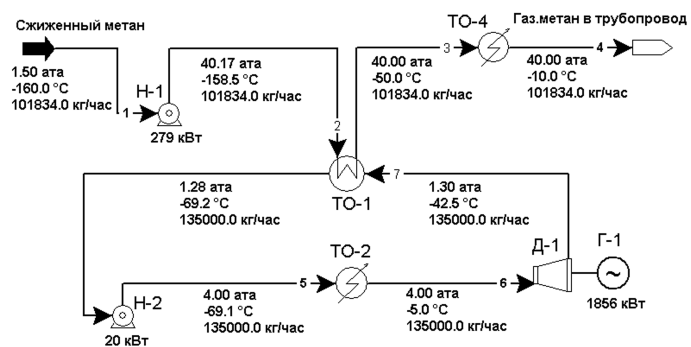


Рис.1. Схема 1 установки регазификации СПГ с получением полезной энергии. Рабочее тело: этан — 30 %, пропан — 70 %.

**Таблица 2. Характеристики установки регазификации при разных температурах рабочего тела на входе в турбодетандер Д-1**

Показатель	-5 °С	+5 °С	+15 °С
Давление рабочего тела на входе в детандер Д-1, МПа	0,39	0,50	0,66
Мощность насоса Н-2, кВт	20	28	39
Мощность детандера, кВт	1856	2263	2770
Полезная мощность установки, кВт	1557	1956	2452

тею или использована для обслуживания терминала. Полезная мощность представляет собой разность между мощностью турбодетандера Д-1 и мощностями, затрачиваемыми на привод насосов Н-1 и Н-2. Мощность насоса Н-1, сжимающего поступающий на регазификацию СПГ до давления 3,94 МПа (рабочего давления в магистральном трубопроводе), составляет 279 кВт.

Приведенные на рис.1 параметры рабочего тела относятся к зимним сезонным условиям, самым невыгодным с точки зрения энергетической эффективности работы детандера: температура потока 6 на выходе из теплообменника ТО-2 равна -5 °С.

В табл.2 приведены результаты расчетов схемы установки в зависимости от сезонного изменения температуры окружающей среды (морской воды). Видно, что мощность установки растет пропорционально росту температуры греющей среды.

В качестве рабочего тела в данной схеме рассматривались различные смеси предельных углеводородов (метана, этана, пропана, бутана).

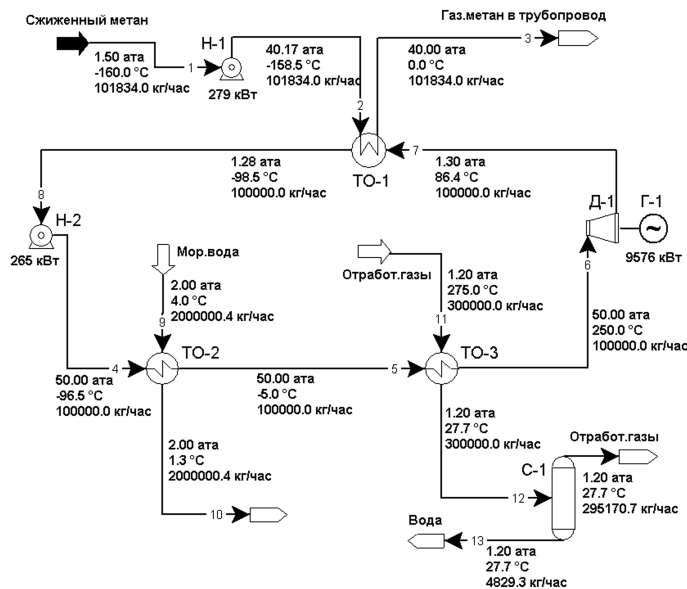


Рис.2. Схема 2 установки регазификации СПГ с использованием низкопотенциального теплового источника. Рабочее тело: этан – 80 %, пропан – 20 %.

Работа, производимая при расширении газа в детандере, определяется так:

$$l = \Delta i = i_{\text{вх}} - i_{\text{вых}},$$

где  $i_{\text{вх}}$ ,  $i_{\text{вых}}$  – энтальпии рабочего тела соответственно на входе и выходе детандера.

Исходя из этого, изучалось влияние состава рабочего тела и условий проведения процесса на получение максимальной возможной полезной работы. В работе [4] был сделан вывод о том, что при снижении на одну и ту же величину давления в детандере изменение энтальпии  $\Delta i$  больше для более тяжелых углеводородов (бутан, пропан). Однако, у таких смесей узок диапазон фазовых превращений, что ограничивает величину перепада давления в детандере и усложняет их использование в реальном технологическом процессе. Значительное влияние на величину  $\Delta i$  имеет также температура рабочего тела на выходе из детандера. При принятой в схеме 1 установки температуре -43 °С смеси с большим содержанием тяжелых углеводородов начинают конденсироваться в детандере и поэтому неприемлемы.

Таким образом, определено, что для данной схемы оптимальными в качестве рабочего тела являются смеси следующего состава: этан – 25–35 %; пропан – 75–65 %.

Расчеты схем проводились на основе программного комплекса ГазКондНефть [5], КПД детандера во всех расчетах был принят 0,9.

Значительно больший энергетический эффект при регазификации СПГ может быть получен при использовании какого-либо бросового низкопотенциального тепла для перегрева рабочего тела перед подачей в турбодетандер. Таким источником могут служить отходящие газы, например, газотурбинной установки, утилизирующей испарения сжиженного природного газа, неизбежные при эксплуатации терминалов.

Для исследования зависимости изменения полезной мощности установки от температуры рабочей смеси на входе в детандер Д-1 и от состава рабочего тела были проведены расчеты процесса, осуществляемого по схеме 2 (рис.2), в диапазоне температур рабочего тела на входе в детандер от +50 °С до +250 °С. При этом для каждой температуры проводилась серия расчетов разных составов рабочего тела и параметров процесса расширения на детандере (начального и конечного давления) и из

них выбиралось наибольшее значение мощности.

Расчеты выполнялись при следующих условиях: давление на входе в теплообменник ТО-1 — 0,13 МПа; давление на входе в детандер — 4,9 МПа; с целью интенсификации процесса теплообмена расход рабочего тела подбирался таким образом, чтобы в теплообменнике ТО-1 происходила конденсация рабочего тела; температура на входе в теплообменник ТО-1 — не ниже +10 °С; Q–T-диаграмма теплообменника ТО-1 должна соответствовать требованиям 2-го начала термодинамики: Q–T-кривые не пересекаются (при расчете разность температур потоков испаряемого СПГ и рабочего тела — не меньше 10 °С).

На рис.3 приведена полученная зависимость полезной мощности турбодетандера Д-1 от температуры рабочей смеси на входе.

Результаты исследования влияния состава рабочего тела на эффективность силового цикла при температурах выше температуры окружающей среды приведены на рис.4.

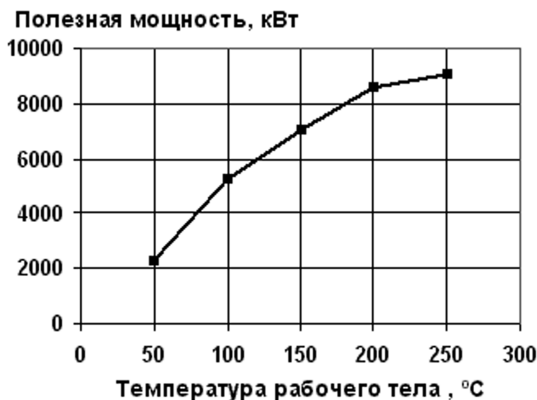


Рис.3. Зависимость полезной мощности от температуры рабочей смеси на входе в детандер Д-1.

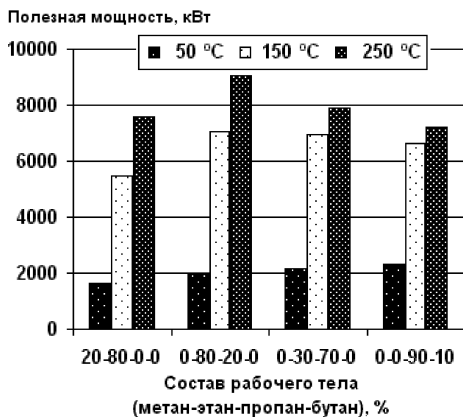


Рис.4. Зависимость полезной мощности установки от состава рабочей смеси при разных температурах на входе в детандер.

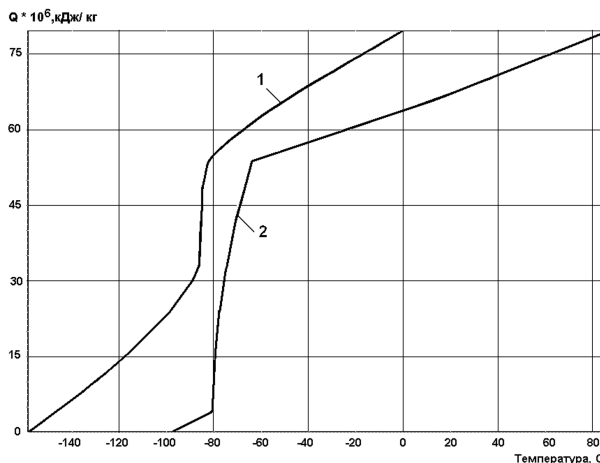


Рис.5. Q–T-диаграмма теплообменника ТО-1: 1 — испаряемый СПГ; 2 — рабочее тело: этан — 80 %, пропан — 20 %.

С ростом температуры рабочей смеси на входе в турбодетандер выше +50 °С большую эффективность дают смеси на основе этана с добавлением пропана до 20 %. Это связано с тем, что изменение энтальпии (при использовании перепада давления в детандере) этана в этом диапазоне температур выше, чем пропана. В случае применения метана требуется повышение давления для конденсации рабочего тела в теплообменнике ТО-1, что приводит к уменьшению перепада давления в детандере и уменьшению получаемой мощности.

На рис.2 для примера приведена схема 2 установки, в которой нагрев и испарение рабочего тела после сжатия насосом Н-2 происходит в два этапа: сначала нагрев в теплообменнике ТО-2 морской водой до температуры –5 °С, затем нагрев и испарение отработавшими газами регенеративной газотурбинной установки в теплообменнике ТО-3 до температуры +250 °С.

Более высокая температура рабочего тела на входе в теплообменник ТО-1 позволяет получать регазифицированный метан на выходе с более высокой температурой (0 °С и выше), поэтому не требуется дополнительного подогрева его перед подачей в магистральный трубопровод.

На рис.5 приведена Q–T-диаграмма теплообменника ТО-1, где происходит нагрев, испарение и перегрев СПГ, а в противотоке — охлаждение и конденсация рабочего тела.

В расчетах схемы 2 установки в качестве источника низкопотенциального тепла были применены отработавшие газы газотурбинных установок (ГТУ) простого и регенеративного циклов стандартной мощностью 10 МВт.

В табл.3 приведены некоторые их характеристики (в расчете на установку регазификации СПГ производительностью 150 тыс. ст.м<sup>3</sup>/ч).

**Таблица 3. Характеристики потока отработавших газов ГТУ как теплового агента в теплообменнике ТО-3**

Показатель	ГТУ простого цикла	ГТУ регенеративного цикла
Входная температура отработавших газов, °С	550	275
Расход отработавших газов, кг/ч	130000	300000
Выходная температура отработавших газов, °С	24	27,7
Количество воды на выходе из С-1, кг/ч	5760	4829

При охлаждении отработавших газов ниже +40 °С начинает конденсироваться вода, имеющаяся в их составе (поток 12), это видно на Q–T-диаграмме противоточного рекуперативного теплообменника ТО-3 (рис.6). Сепаратор С-1 служит для отвода сконденсировавшейся воды.

Таким образом, предложенная силовая установка, использующая тепло отработавших газов ГТУ, мощностью 10 МВт (см. рис.4) способна вырабатывать дополнительно полезную электроэнергию свыше 9 МВт при регазификации СПГ объемом 150 тыс. ст.м<sup>3</sup>/ч.

В табл.4 приведены для сравнения энергетические характеристики двух предложенных схем установок регазификации СПГ. Для схемы 1 в табл.4 приведены значения энергетических характеристик при среднегодовой температуре окружающей среды около +10 °С, позволяющей нагреть рабочее тело перед детандером до +5 °С, а для схемы 2 представлены результаты для зимних условий (температура рабочего тела перед детандером –5 °С).

Рассчитаем КПД силового цикла схемы 2, утилизирующего тепло отработавших газов регенеративной газотурбинной установки.

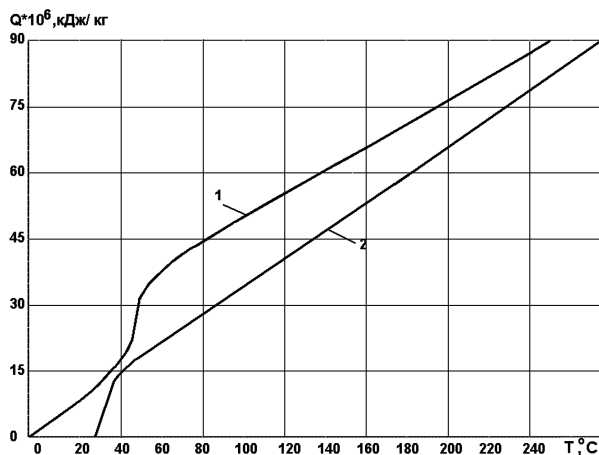


Рис.6. Q–T-диаграмма теплообменника ТО-3: 1 – рабочее тело (этан – 80 %, пропан – 20 %); 2 – отработавшие газы регенеративной ГТУ.

**Таблица 4. Энергетические характеристики предложенных схем установок регазификации СПГ**

Показатель	Схема 1	Схема 2
Тепловая нагрузка теплообменников, кВт:		
ТО-1	18324	22113
ТО-2	20559	6379
ТО-3		25046
ТО-4	3065	
Мощность турбодетандера Д-1, кВт	2263	9576
Мощность, расходуемая на привод насосов, кВт:		
Н1	279	279
Н2	28	265
Полезная мощность установки, кВт	1956	9032

Коэффициент превращения тепловой энергии в работу в идеальном цикле Карно, в котором верхний тепловой источник – отработавшие газы газовой турбины с температурой +275 °С (548 К), а нижний – те же газы на выходе из теплообменника ТО-3 с температурой +28 °С (301 К), равен

$$\eta_K = (T_6 - T_M) / T_6 = (548 - 301) / 548 = 0,451.$$

Теплота, подводимая от отработавших газов к рабочему телу в теплообменнике ТО-3, составляет 25046 кВт. Тогда максимальная работа, возможная в идеальном цикле:

$$l_{ид} = q_{ТО-3} \cdot \eta_K = 25046 \cdot 0,451 = 11289 \text{ кВт.}$$

Работа, производимая при расширении рабочим телом в Д-1, равна 9576 кВт. Откуда КПД исследованного силового цикла установки (без учета энергии, подведенной в ТО-2):

$$\eta = l_D / l_{ид} = 9576 / 11289 = 84,8 \text{ \%}.$$

Оценим суммарную эффективность процесса производства энергии при регазификации СПГ в комбинированной тепловой схеме со стандартной газотурбинной установкой ГТК-10Р, имеющей следующие характеристики [6]: мощность  $l_{ГТУ} = 10000$  кВт; расход топливного газа  $V_{Т,Г} = 3113$  нм<sup>3</sup>/ч; температура на входе в турбину  $T_6 = 810$  °С (1083 К).

Коэффициент превращения тепловой энергии в работу в идеальном процессе:

$$\eta_K = (T_6 - T_M) / T_6 = (1083 - 301) / 1083 = 0,722.$$

Количество подведенного в газотурбинную установку тепла:

$$q_{ГТУ} = q_p \cdot V_{Т,Г} = 35600 \cdot 3113 / 3600 = 30784 \text{ кВт,}$$

где  $q_p^H$  — низшая теплотворная способность метана,  $q_p^H = 35600$  кДж/м<sup>3</sup>.

Тогда максимальная работа в идеальном цикле составит:

$$I_{ид} = q_{ГТУ} \eta_K = 30784 \cdot 0,722 = 22226 \text{ кВт.}$$

Следовательно, КПД процесса производства энергии в комбинированной тепловой схеме:

$$\eta = (I_D + I_{ГТУ}) / I_{ид} = \\ = (9576 + 10000) / 22226 = 88,1 \%,$$

что более чем в 2 раза превышает КПД собственно газовой турбины.

### Выводы

Результаты проведенных расчетных исследований показали, что процесс регазификации СПГ можно осуществлять одновременно с производством полезной работы без дополнительных затрат топлива.

Реализация рассмотренной технологии в Украине для терминала СПГ 5 млрд м<sup>3</sup>/год может дать годовую выработку электроэнергии от 66 ГВт·ч (схема 1) до 301 ГВт·ч (схема 2).

Такая криогенная энергогенерирующая система является экономически привлекательной и оказывает минимальное влияние на окружающую

среду, в том числе за счет выработки электроэнергии без дополнительной эмиссии CO<sub>2</sub>.

### Список литературы

1. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Криогенные комплексы производства и отгрузки СПГ, его приема, хранения и регазификации в системе международной торговли // Техн. газы. — 2010. — № 3. — С. 2–19.
2. Похил Ю.А., Архипов В.Т., Гамуля Г.Д., Левин А.Я. Инфраструктура использования сжиженного природного газа : Проблемы и перспективы // Там же. — 2006. — № 4. — С. 45–54.
3. LNG Cold Utilizing Power Generation System. — <http://www.osakagas.co.jp/rd/use/098e.html>
4. Лавренченко Г.К., Пятничко А.И., Онопа Л.Р. Анализ эффективности производства работы при регазификации СПГ // Техн. газы. — 2010. — № 3. — С. 23–28.
5. Калашников О.В., Иванов Ю.В., Будняк С.В. Вопросы адекватности теплофизической базы программных систем HYSYS, PRO-2 и ГазКонд-Нефть. 1. Углеводородные смеси // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 1999. — № 6. — С. 13–18.
6. Технико-коммерческое предложение на ремонт с восстановлением технических характеристик турболовок газоперекачивающих агрегатов ГТК-10. — СПб. : Невский завод. — [http://www.nzl.spb.ru/production/turbines/tkp\\_gtk-doc](http://www.nzl.spb.ru/production/turbines/tkp_gtk-doc).

Поступила в редакцию 23.01.12

***Pyatnichko A.I., Onopa L.R., Zhuk G.V.***

*The Gas Institute of NASU, Kiev*

## **The Utilization of Liquefied Natural Gas Cold for Useful Energy Production during Regasification Process**

The possibility of liquefied natural gas regasification with useful work production without power inputs from external sources is displayed. Two schemes based on the Rankine cycle in which the upper heat source is surrounding environment and waste gas turbine exhaust gases are considered. It is displayed that the efficiency of the power circuit is greatly increased by application of a low-temperature waste heat source. As the working fluid binary mixtures on the basis of methane, ethane, propane and butane are used. The influence of the working fluid composition on power cycle efficiency at different temperature levels is investigated. The efficiency index of power generation process by utilization of gas turbine exhaust heat and liquefied natural gas cold at regasification utilization is above 80 %.

**Keywords:** liquefied natural gas regasification, energy of cold utilization, low-potential heat, Q–T-diagram.

Received January 23, 2012