

УДК 621.438.004.68:621.31:536+621.51

О. С. Кучеренко
Е. Н. Пожидаева

ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА КОНДЕНСАЦИОННОЙ ГАЗО-ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ «ВОДОЛЕЙ» ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ УКРАИНЫ

Представлены результаты параметрического анализа энергетической установки (ЭУ), содержащие в своем составе конденсационную газо-паротурбинную установку (КГПТУ) «Водолей». В камеру сгорания КГПТУ «Водолей» подается пар от утилизируемых парогенераторов, использующих бросовое тепло уходящих газов газотурбинных приводов нагнетателей природного газа компрессорной станции. ЭУ позволяет производить экологически чистую электрическую энергию с высоким КПД.

Наведені результати параметричного аналізу енергетичної установки (ЕУ) «Водолій-УПГ», що містять в своєму складі конденсаційну газо-паротурбінну установку (КГПТУ) «Водолій». До камери згоряння КГПТУ «Водолій» подається пар від утилізаційних парогенераторів, що застосовують викидне тепло відхідних газів газотурбінних приводів нагнітачів природного газу компресорної станції. ЕУ дозволяє виробляти екологічно чисту електричну енергію з високим ККД.

Постановка проблемы

На существующих компрессорных станциях (КС), как правило, полезно используется только механическая энергия газовых турбинных двигателей (ГТД), затрачиваемая на привод нагнетателей газа. Поэтому коэффициент использования топлива (КИТТ) КС можно считать равным КПД ГТД, входящим в их состав. КС на базе ГТД ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» имеют следующие значения КИТТ:

КС на базе ГТД	ДН80	ДГ90	ДЖ59	ДР59	ДТ71
КИТТ, %	35,3	34,0	29,0	25,7	31,7

Кардинальным путем улучшения КИТТ КС является дальнейшее увеличение КПД ГТД простой схемы за счет повышения параметров термодинамического цикла. Однако даже по самым оптимистическим оценкам КПД ГТД простой схемы в ближайшей перспективе не превысят 38–39%.

Улучшение КИТТ КС возможно за счет создания нового высокоэкономичного ГТД усложненной схемы. ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» считает, что таковым может быть ГТД с однокаскадным компрессором и регенератором. Расчеты показывают, что КПД такого ГТД и соответственно КИТТ может достигать значений 41–42% [1].

Из вышеприведенного видно, что на существующих и вновь проектируемых КС магистральных газопроводов около 60% тепла выбрасывается в атмосферу с уходящими из ГТД газами. Очевидна актуальность задачи улучшения термодинамического цикла КС за счет использования энергосберегающих технологий.

Наиболее изученной и убедительно проверенной практикой является энергосберегающая технология, базирующаяся на утилизации тепла уходящих из ГТД газов в теплоутилизационном контуре (ТУК), где в качестве рабочего тела используется вода (водяной пар), а привод потребителя мощности осуществляется утилизационной паровой турбиной.

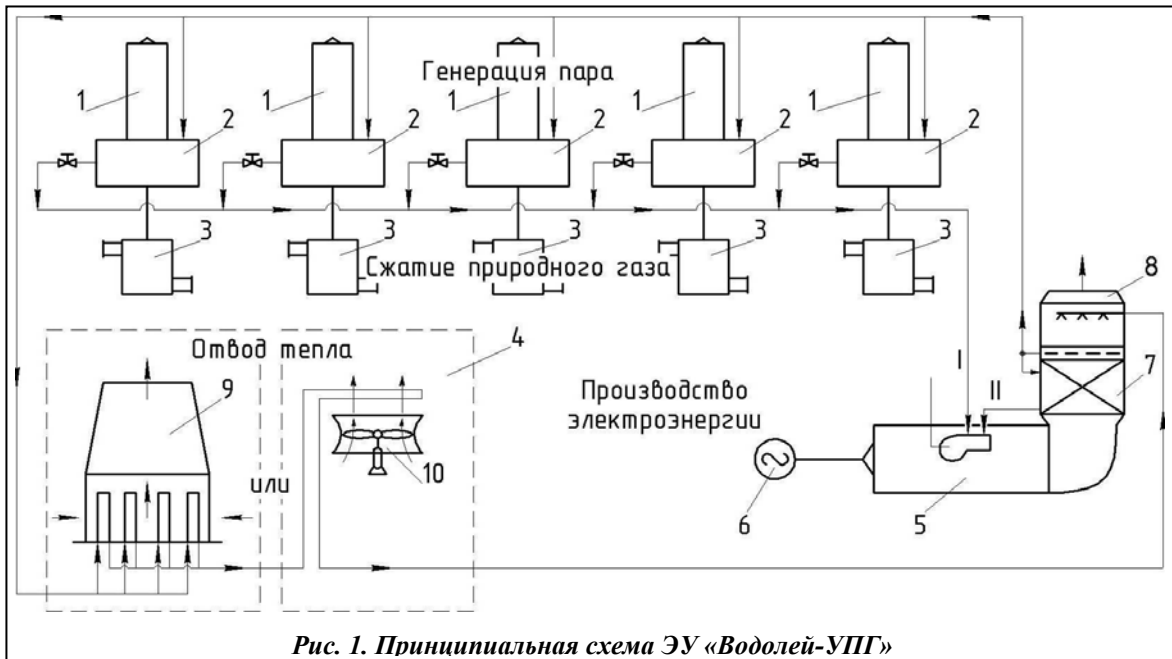


Рис. 1. Принципиальная схема ЭУ «Водолей-УПГ»

Одной из технологий энергосбережения является надстройка ГТД КС утилизационными парогенераторами, пар от которых подается в паровую турбину, приводящую электрогенератор [2]. Профессором Киевского политехнического института, д. т. н. Н. А. Диким предложена новая технология, суть которой заключается в использовании водяного пара утилизационных парогенераторов ГТД КС в качестве дополнительного рабочего тела, подаваемого в камеру сгорания специально спроектированного КППТУ «Водолей» (в дальнейшем – «Водолей-УПГ»), приводящего электрогенератор. Таким образом, обеспечивается возможность создания на территории КС Украины электростанций с электрическим КПД мирового уровня.

Энергосберегающая технология на основе ЭУ «Водолей-УПГ» оригинальна тем, что пар утилизационных парогенераторов подается не на утилизационную паровую турбину, а впрыскивается в камеру сгорания газопаротурбинного двигателя КППТУ «Водолей». Публикаций, посвященных исследованию термодинамических циклов ЭУ «Водолей-УПГ», в открытой печати не обнаружено.

Целью настоящей статьи является термодинамический анализ ЭУ «Водолей-УПГ» с позиций современного уровня знаний и технологий ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» [3].

Основная часть

Принципиальная схема ЭУ «Водолей-УПГ» для производства электрической энергии на КС магистральных газопроводов представлена на рис. 1. КС включает в себя несколько ГПА. Каждый из них состоит из ГТД 1 и приводимого им нагнетателя природного газа 3. На выхлопе каждого ГТД установлен утилизационный парогенератор (УПГ) 2, где тепло уходящих газов из ГТД используется на генерацию водяного пара. Водяной пар, полученный в УПГ, объединяется системой паропроводов и потоком I подается в камеру сгорания газопаротурбинного двигателя (ГПТД) 5, который приводит во вращение электрогенератор 6.

На выходе из ГПТД установлен парогенератор 7, который по газу соединен с контактным конденсатором (КК) 8. Пар из парогенератора 7 подается потоком II в камеру сгорания ГПТД 5. Газопаровая смесь из парогенератора 7 поступает в КК 8. Туда же, через систему распыла подается охлаждающая вода. В результате контакта охлаждающей воды и газопаровой смеси происходит конденсация в воду водяного пара, содержащегося в газопаровой смеси. Часть воды после КК поступает на питание УПГ 2, другая – в парогенератор ГПТД, третья – в систему отвода тепла в окружающую среду 4. В качестве системы от-

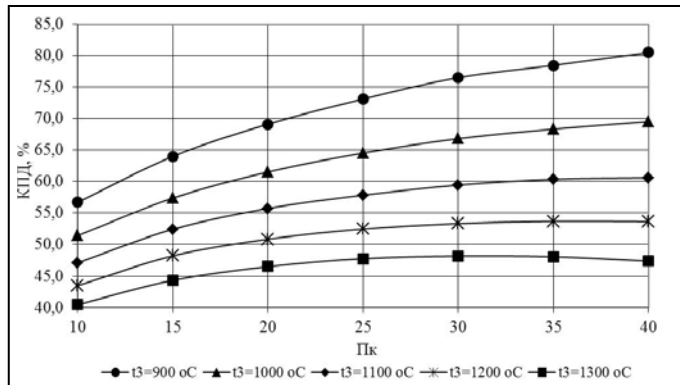


Рис. 2. Зависимость КПД от Pк и T3 ЭУ «Водолей-УПГ»

вода тепла 4 могут использоваться градирни 9 или аппараты воздушного охлаждения (АВО). После системы отвода тепла 4 вода приобретает статус охлаждающей воды и подается через систему распыла в КК 8.

В реальных условиях эксплуатации в ЭУ «Водолей-УПГ» могут иметь место утечки котловой воды и водяного пара. Кроме того, для обеспечения надежной работы парогенераторов требуется непрерывная их продувка. Продувка заключается

в безвозвратном удалении из парогенераторов загрязненной воды.

Результаты расчетов термодинамических циклов ЭУ «Водолей-УПГ» представлены на рис. 2 – 6. Анализ показывает следующее. Зависимости КПД от Pк для разных T3 имеют экстремумы (рис. 2). Значения Pк, соответствующие экстремуму КПД, зависят от T3. Чем меньше значения T3, тем больше значения Pк.экстр. Максимальные значения КПД «Водолей-УПГ» и соответствующие им Pк.экстр. для разных T3 имеют значения: для T3 = 1173 К, Pк.экстр. > 40, КПД = 81,5 %, T3 = 1273 К, Pк.экстр. > 40, КПД = 69,5%, T3 = 1373 К, Pк.экстр. = 40, КПД = 60,6%, T3 = 1473 К, Pк.экстр. = 35, КПД = 53,7%, T3 = 1573 К, Pк.экстр. = 30, КПД = 48,2%. Зависимости КПД для разных T3 в окрестности Pк.экстр. довольно пологие. Так, для T3 = 1473 К при Pк = 35 КПД = 53,70% , при Pк = 30 КПД = 53,33% , при Pк = 40 КПД = 53,65%. Для заданного Pк КПД тем больше, чем меньше T3.

Зависимости Nуд от Pк для разных T3 имеют экстремумы (рис. 3). Значения Pк, соответствующие экстремуму Nуд, зависят от T3. Чем меньше значения T3, тем больше значения Pк.Максимальные значения Nуд «Водолей-УПГ» и соответствующие Pк.Нуд, для разных T3 имеют значения: для T3 = 1173 К, Pк.Нуд = 40, Nуд = 1304,2 кВт, T3 = 1273 К, Pк.Нуд = 30, Nуд = 1034,3 кВт, T3 = 1373 К, Pк.Нуд = 25, Nуд = 835,2 кВт, T3 = 1473 К, Pк.Нуд = 25, Nуд = 694,7 кВт, T3 = 1573 К, Pк.Нуд = 25, Nуд = 582,9 кВт. Зависимости Nуд для разных T3 в окрестности Pк.Нуд довольно пологие. Так, для T3 = 1273 К при Pк = 30 Nуд = 1034,3 кВт, при Pк = 25 Nуд = 1026,4 кВт, при Pк = 40 Nуд = 1018,3 кВт. Для заданного Pк Nуд тем больше, чем меньше T3.

Зависимости удельного массового расхода пара, поданного в камеру сгорания ГПТД от утилизационных парогенераторов ГТД компрессорной станции, Dуд.упг от Pк для разных значений T3 экстремума не имеют (рис. 4). На рассматриваемом участке изменений Pк зависимости монотонно возрастающие. Значение Dуд.упг тем больше, чем меньше T3 и больше значения Pк. Максимальные значения Dуд.упг при Pк = 40 для T3 = 1173, 1273, 1373, 1473, 1573 К значения Dуд.упг, соответственно равны: 0,95, 0,58, 0,35, 0,21, 0,11 кг/(кг/с).

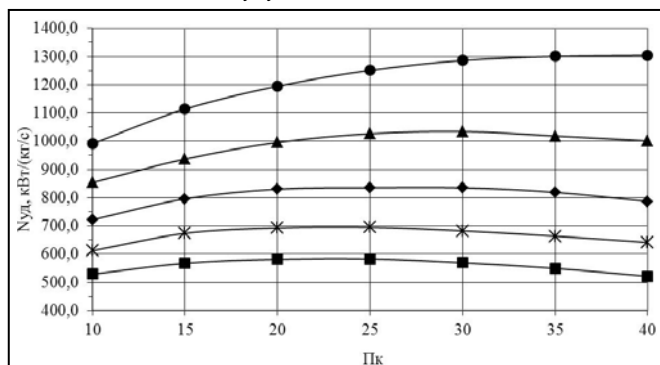


Рис. 3. Зависимость Nуд от Pк и T3 ЭУ «Водолей-УПГ»

Зависимости удельного массового расхода пара, поданного в камеру сгорания от парогенератора ГПТД, dвпр от Pк для разных значений T3 экстремума не имеют (рис. 5). На рассматриваемом участке изменений Pк зависимости монотонно убывающие. Скорость убывания dвпр по Pк тем больше, чем меньше T3. При Pк = 10 наибольшие значения dвпр соответствуют T3 = 1173 К. При Pк = 40 наибольшие значения dвпр соответствуют T3 = 1573 К.

Зависимости относительных затрат мощности на привод обеспечивающих механизмов ЭУ $N_{мех}$ от P_k для разных T_3 имеют экстремумы (рис. 6). Значения P_k , соответствующие экстремуму $N_{мех}$, зависят от T_3 . Чем меньше значения T_3 , тем больше значения $P_{k.N_{мех}}$.

Следует обратить внимание на такую особенность ЭУ «Водолей-УПГ», как способность повышения КПД и удельной мощности при понижении температуры газа за камерой сгорания. Объясняется это следующим образом. КПД и удельная мощность ЭУ «Водолей-УПГ» растет тем больше, чем больше подается в камеру сгорания ГПТД бросового рабочего тела, в частности водяного пара, генерируемого утилизационными парогенераторами КС. Ограничением по количеству поданного в камеру сгорания ГПТД водяного пара $D_{уд.упг}$ является значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания $\alpha_{кс} = 1,4$. Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания зависит в большой степени

от температуры газопаровой смеси на выходе из камеры сгорания T_3 . Чем меньше значение T_3 , при прочих равных условиях, тем больше значение $\alpha_{кс}$. Из теплового баланса в камере сгорания следует, что при условии $\alpha_{кс} = 1,4$ можно увеличивать массовый расход бросового пара, подаваемого в камеру сгорания $D_{уд.упг}$ за счет уменьшения температуры газопаровой смеси на выходе из камеры сгорания T_3 .

В таблице приведены основные параметры пара, сгенерированного в утилизационном парогенераторе КС.

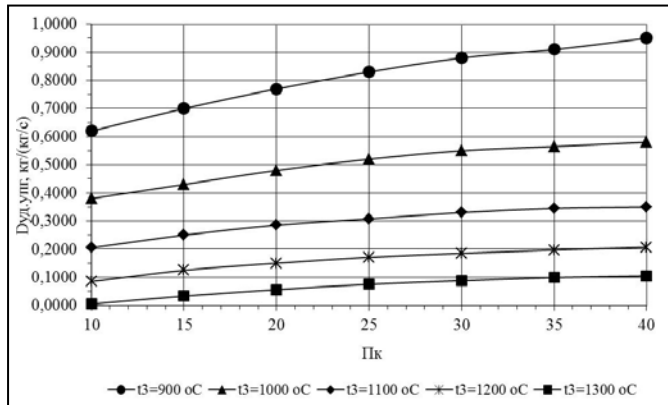


Рис. 4. Зависимость $D_{уд}$ от P_k и t_3 ЭУ «Водолей-УПГ»

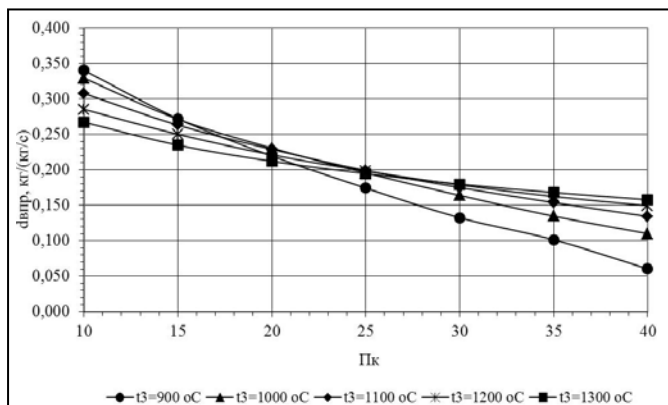


Рис. 5. Зависимость $d_{впр}$ от P_k и t_3 ЭУ «Водолей-УПГ»

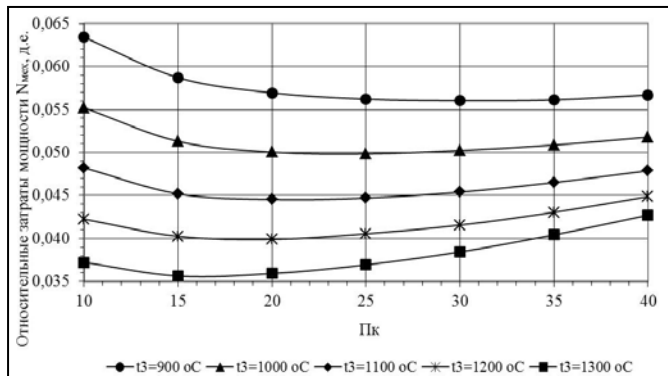


Рис. 6. Зависимость относительных затрат мощности на привод обеспечивающих механизмов от P_k и t_3 ЭУ «Водолей-УПГ»

Основные параметры УПГ ГТД компрессорных станций

Тип ГТД	Паропроизводительность, т/ч	Температура пара, °С	Давление пара, МПа
ДН80	34,5	395	2,26
ДГ90	23,0	364	2,26
ДЖ59	26,0	352	2,26
ДР59	16,0	300	2,26
ДТ71	9,5	360	2,26

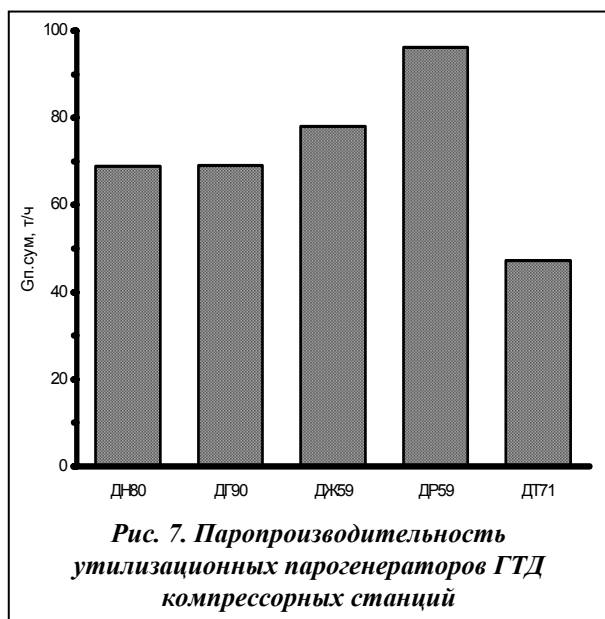


Рис. 7. Паропроизводительность утилизационных парогенераторов ГТД компрессорных станций

Суммарные паропроизводительности утилизационных парогенераторов КС на базе ГТД производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» иллюстрируются на рис. 7. Так, суммарная паропроизводительность утилизационных парогенераторов КС на базе ГТД ДН80. равняется 68,9 т/ч (при непрерывном функционировании двух ГТД), на базе ГТД ДГ90 – 69,0 т/ч (при непрерывном функционировании трех ГТД), на базе ГТД ДЖ59 – 78,1 т/ч (при непрерывном функционировании трех ГТД), на базе ГТД ДР59 – 92,2 т/ч (при непрерывном функционировании шести ГТД), на базе ГТД ДТ71 – 47,9 т/ч (при непрерывном функционировании пяти ГТД). Учитывая, что в настоящее время в качестве приводов нагнетателей природного газа наиболее

распространенными являются ГТД ДН80 и ГТД ДГ90, то в дальнейшем рассмотрении было принято, что на КС утилизационными парогенераторами можно сгенерировать 68,9 т/ч (19,15 кг/с) водяного пара.

При выборе параметров перспективной ЭУ «Водолей–УПГ» для производства электроэнергии на КС магистральных газопроводов предполагалось, что ЭУ «Водолей–УПГ» будет создаваться на базе компрессоров линейки ГТД производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект». Из условия максимума КПД для ЭУ «Водолей–УПГ» наиболее подходят компрессоры ГТД ДН70 с расходом воздуха $G_k = 37,5$ кг/с и суммарной степенью повышения давления $P_k = 19,5$.

Исследования показали, что основные параметры перспективной энергетической установки «Водолей–УПГ» для КС, использующих в качестве привода нагнетателей природного газа ГТД ДН80 и ДГ90, могут быть следующими:

Электрическая мощность, отпускаемая потребителю	36856 кВт;
КПД	60,5 %;
Степень повышения давления	19,5;
Расход воздуха через компрессор	37,5 кг/с;
Температура за камерой сгорания	1258 К;
Расход пара, поданного в камеру ГПТД сгорания от утилизационных парогенераторов ГТД КС	19,15 кг/с;
Расход пара, поданного в камеру сгорания от парогенератора ГПТД	8,76 кг/с;
Расход сгенерированной воды котельного качества	1,30 кг/с;
Затраты мощности на привод водяных насосов	247 кВт;
Затраты мощности на привод АВО	1758 кВт.

Оценка коэффициента использования тепла топлива (КИТТ) КС с ЭУ «Водолей–УПГ» производилась по зависимости

$$\text{КИТТ} = (N_{\text{нагн}} + N_{\text{эл}}) / Q_{\text{подв}},$$

где $N_{\text{нагн}}$ – механическая энергия ГТД, затрачиваемая на привод нагнетателей природного газа, кВт; $N_{\text{эл}}$ – электрическая энергия, вырабатываемая ЭУ «Водолей–УПГ», кВт; $Q_{\text{подв}}$ – тепло, образующееся от сжигания топлива в камерах сгорания ГТД и ЭУ «Водолей–УПГ», кВт.

Оценки показывают, что для КС на базе ГТД ДН80 КИТТ = 42,6 %, для КС на базе ГТД ДГ90 КИТТ = 41,8%.

Функционирование утилизационных парогенераторов ГТД КС и ЭУ «Водолей–УПГ» сопровождается потерями пара и конденсата. Согласно литературным источникам потери пара и конденсата для мощных тепловых конденсационных электрических станций должны быть не больше 1%, а для судовых паровых энергетических установок они находятся в диапазоне от 2 до 5% от их паропроизводительности. Так как утилизационные парогенераторы ГТД КС и ЭУ «Водолей–УПГ» по своим конструктивным параметрам наиболее похожи на судовую утилизационную паротурбинную установку, то в качестве оценки потерь пара и конденсата принимаем наименьшее рекомендуемое значение, т. е. 2% от паропроизводительности. Оценки потерь пара и конденсата для КС следующие:

Компрессорная станция	ДН80	ДГ90
Потери пара и конденсата, т/сутки	48	48

Одной из особенностей КГПТУ «Водолей» является возможность наряду с производством электрической энергии производить воду котельного качества. Рассматриваемая ЭУ «Водолей–УПГ» производит 1,3 кг/с или 112 т/сутки воды котельного качества. Сопоставляя потери и производство воды котельного качества можно утверждать, что массового расхода воды, генерируемого ЭУ «Водолей-УПГ», вполне достаточно для обеспечения работы утилизационных парогенераторов ГТД КС и ГПТД.

Выводы

С позиций термодинамики на КС магистральных газопроводов с использованием ЭУ «Водолей–УПГ» возможно создание электростанций с электрическим КПД = 50% и более за счет использования бросового тепла ГТД, приводящих нагнетатели природного газа.

Усложнение термодинамического цикла КС ЭУ «Водолей–УПГ» позволяет повысить коэффициент использования тепла топлива на КС на 21 - 23 %.

Проблема восполнения потерь котельной воды утилизационных парогенераторов в безводных или маловодных климатических районах земного шара полностью может быть решена за счет сгенерированной в ЭУ «Водолей–УПГ» воды котельного качества.

Литература

1. Романов В. И. Газотурбинный двигатель для газовой промышленности / В. И. Романов, О. С. Кучеренко // Территория Нефтегаз. – 2007. – № 8. – С. 92–95.
2. Производство электрической энергии на компрессорных станциях в паровом теплоутилизационном контуре / А. А. Филоненко, Б. С. Берестнев, О. С. Кучеренко, И. Н. Дудкина // Двигатель. – 2003. – № 1 (25). – С. 10–11.
3. Контактные газопаротурбинные установки «Водолей» – состояние и перспективы / О. С. Кучеренко, С. Н. Мовчан, В.В. Романов и др. – Харків: НТУ «ХП». Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. наук. пр. – 2008. – Вип. 2. – С. 197–209.

Поступила в редакцию
08.08.12