

УДК 621.643

**Б.Д. БИЛЕКА, Е.П. ВАСИЛЬЕВ***Институт технической теплофизики НАН Украины*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗИРУЮЩИХ ЭНЕРГОХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ**

Рассмотрены результаты расчетных исследований теплоутилизующих энергохолодильных установок на низкокипящих рабочих телах, работающих на основе использования теплоты отработанных газов газотурбинных установок приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций. Определена возможная глубина дополнительного охлаждения перекачиваемого газа с помощью таких установок и увеличение за счет этого производительности газопровода.

**теплоутилизующая энергоустановка, теплоутилизующая холодильная установка, газотурбинная установка, отработанные газы, низкокипящее рабочее тело, глубина охлаждения компримируемого газа, компрессорная станция**

### **Введение**

На компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов для транспортировки газа используются газоперекачивающие агрегаты (ГПА), приводными двигателями которых являются в основном газотурбинные установки (ГТУ). Температура сбрасываемых отработанных газов после ГТУ составляет 280 – 550 °С. Одним из направлений энергосбережения на КС является утилизация теплоты сбрасываемых газов и выработка на ее основе электроэнергии или холода. Электроэнергия может использоваться для обеспечения собственных нужд КС или продаваться на сторону, а холод для дополнительного охлаждения компримированного газа. В зависимости от технологических особенностей КС могут быть разработаны различные комбинированные теплоутилизующие энерго- и холодильные установки с превалирующей выработкой электроэнергии или холода.

### **1. Технологии утилизации теплоты отработанных газов ГТУ на КС**

Уровень температур отработанных газов ГТУ на КС, особенно на их нижней границе, не позволяет с достаточной эффективностью осуществлять на их

основе термодинамический паросиловой цикл Ренкина на наиболее доступном и дешевом рабочем теле – воде. Поэтому за рубежом широко используются теплоутилизующие энергоустановки для выработки электроэнергии за счет утилизации средне- и низкпотенциальной теплоты (геотермальных месторождений, промышленных сбросных вод) с использованием в качестве рабочих тел низкокипящих веществ различного происхождения. В качестве низкокипящих рабочих тел (НРТ) используются в основном природные жидкие углеводороды (пропан, бутан, пентан, изобутан и их смеси). Например, с 1999 г. работает теплоутилизующая энергоустановка на КС трансканадского магистрального газопровода [1] мощностью 7 МВт, в которой в качестве НРТ используется н-пентан. Для предотвращения самовоспламенения низкокипящих веществ уровень температур греющего теплоносителя поддерживается ниже температуры самовоспламенения НРТ путем подмешивания в отработанные газы ГТУ воздуха, впрыска воды или используется промежуточный контур с высокотемпературным теплоносителем. Если использовать теплоту отработанных газов от всех ГТУ, работающих на КС для выработки элек-

троэнергии с помощью теплоутилизирующих энергоустановок на НРТ, то этой электроэнергии может оказаться больше, чем необходимо для собственных нужд КС. При отсутствии возможности продажи ее во внешнюю сеть избыток мощности теплоутилизирующей энергоустановки можно использовать для привода холодильной машины и с ее помощью дополнительно охлаждать компримированный газ после его охлаждения в аппаратах воздушного охлаждения (АВО). Как показали исследования ВНИИгаза и Союзэнергогаза, экономия мощности КС на перекачку газа в зависимости от глубины охлаждения газа может в 5 – 6 раз превышать затраты мощности на его охлаждение.

В качестве холодильных машин могут использоваться турбодетандерные, абсорбционные, парожеторные, парокompрессионные машины, а также холодильные машины с дросселированием воздуха или других газов. Как показали предварительные расчеты, холодильные машины с дросселированием воздуха обладают очень низкой удельной холодопроизводительностью. Абсорбционные холодильные машины для условий работы КС слишком сложны в изготовлении и эксплуатации и, следовательно, дороги. Наиболее перспективными оказались турбодетандерные, парожеторные и турбокомпрессионные холодильные машины на НРТ. Специфические особенности КС: удаленность от водных источников, ограниченность территории и рабочего персонала требуют максимальной простоты технологических схем. Вода, которая замерзает при отрицательных температурах, усложняет условия эксплуатации таких систем. Использование НРТ в паросиловых циклах теплоутилизирующих энергетических и холодильных машин в совокупности с применением воздушного охлаждения конденсаторов и других охлаждающих устройств позволяет перейти к практически безводным технологиям работы и эксплуатации КС, а в связи с обеспечением собственных нужд в электроэнер-

гии и холоде теплоутилизирующими энергохолодильными установками обеспечить при необходимости автономный режим работы КС. При выборе низкокипящего вещества для работы в качестве НРТ в холодильных машинах предусматривалось, чтобы давление НРТ в конденсационной части тепловой схемы было по возможности приближено к атмосферному.

## **2. Исходные данные для расчета теплоутилизирующих энергохолодильных машин на НРТ на КС**

Основные характеристики базовых энергоустановок – приводных ГТУ ГПА, установленных на КС, предоставлены ВНИИПИТРАНСГАЗ Украины. Характеристики НРТ взяты из справочной литературы [2, 3]. Температура воздуха на входе в охлаждающие устройства принята равной максимальной температуре наиболее жарких месяцев года в центральной части Украины  $t_{в.вх} = 30$  °С. Температура холодильного агента в испарителе принята равной  $t_{х.а} = 5$  °С. Силовые части турбокомпрессионных и турбодетандерных теплоутилизирующих энергетических и холодильных машин работают на н-пентане. Парожеторная теплоутилизирующая холодильная машина работает на н-бутане. Так как н-пентан термостоек до температуры порядка 300 °С, то отработанные газы после базовых двигателей ДН-70, ДГ-90, ДН-80 охлаждаются до 300 °С подмешиванием воздуха. После ГТНР-10 отработанные газы не охлаждаются, а сразу направляются в парогенератор теплоутилизирующей энергоустановки. Температура отработанных газов на выходе из теплоутилизирующей энергоустановки принята равной  $t_{г.ых} = 70$  °С. По данным ВНИИПИТРАНСГАЗа температура компримированного газа после аппаратов воздушного охлаждения (АВО)  $t_{кг} = 40$  °С, давление  $P_{кг} \approx 75$  атм. При этих условиях по данным [3] удельный объем газа  $v_{кг} = 0,02485$  м<sup>3</sup>/кг, плотность газа  $\rho_{кг} = 40,241$  кг/м<sup>3</sup>, массовая теплоемкость газа  $C_p = 2,623$

кДж/кг.гр. Максимальная температура НРТ в цикле теплоутилизирующей энергоустановки принята  $t_1 = 170$  °С, температура конденсата в конденсаторе  $t_k = 40$  °С. Приняты значения КПД [4]: относительный внутренний КПД турбины на НРТ  $\eta_r = 0,72$ , механический КПД турбины  $\eta_m = 0,98$ , КПД генератора  $\eta_g = 0,96$ , КПД насоса НРТ  $\eta_n = 0,6$ , КПД компрессора НРТ  $\eta_k = 0,72$ . Значения параметров НРТ в характерных точках цикла находим из P-i диаграммы [2]. Удельные работы и КПД циклов энергетических и холодильных машин рассчитывались по известным термодинамическим соотношениям [5]. Охлаждение конденсаторов осуществляется с помощью аппаратов воздушного охлаждения типа АВЗ рас-

четной тепловой мощностью 1 413 кВт, с расчетной мощностью привода вентилятора на номинальной нагрузке  $N_{пр} = 21,21$  кВт.

### 3. Теплоутилизирующая энергоустановка на НРТ н-пентане

Силовой частью турбодетандерной и турбокомпрессорной холодильной машины является теплоутилизирующая энергоустановка на НРТ н-пентане. Схема такой установки приведена в [6]. Результаты расчетов теплоутилизирующих энергоустановок на н-пентане, использующих теплоту отработанных газов базовых энергоустановок, установленных на КС, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики теплоутилизирующих энергоустановок на н-пентане, работающих за счет использования теплоты отработанных газов приводных двигателей ГПА, установленных на КС

Параметр	Базовая ГТУ			
	ГТНР-10	ДН-70	ДГ-90	ДН-80
Расход НРТ $G_p$ , кг/с	39,05	26,74	47,48	66,38
Тепловая мощность турбины брутто $N_T^b$ , кВт	3289	2252	3999	5590
Электрическая мощность энергоустановки нетто $N_T^n$ , кВт	2574	1728	3069	4290
Мощность насоса НРТ $N_n$ , кВт	328,9	225,2	399,9	559,0
Мощность, затраченная на охлаждение конденсаторов $N_{охл}$ , кВт	277,0	189,6	336,8	470,9
Тепловая мощность парогенератора $Q_T$ , кВт	20927	14330	25445	35573
Тепловая мощность конденсатора $Q_k$ , кВт	18456	12638	22440	31373
Мощность базовой энергоустановки $N_b$ , МВт	10	10	16	25
Относительный прирост электрической мощности комплексной энергоустановки за счет теплоутилизирующей энергоустановки $\Delta N$ , %	25,24	17,28	19,18	17,16
Количество установленных воздушных конденсаторов типа АВЗ	14	9	16	23
Суммарная масса установленных конденсаторов типа АВЗ $G_{КС}$ , т	686	441	784	1127

### 4. Теплоутилизирующие турбодетандерные холодильные машины на НРТ

Схема и цикл такой холодильной машины приведены в [7]. В качестве силового привода турбодетандерных холодильных машин используется теплоутилизирующая энергоустановка механической мощностью нетто  $(N_T^n)_m = 3197$  кВт, которая работает за счет утилизации теплоты отработанных газов базовой ГТУ типа ДГ-90 номинальной мощностью 16 МВт. Были рассчитаны холодильные машины на

четырёх рабочих телах. Температура рабочих тел на входе в компрессор принята  $t_1 = 30$  °С. Основные характеристики таких машин приведены в табл. 2 при КПД компрессора  $\eta_k = 0,8$ . Там же приведены достижимые глубины охлаждения компримированного газа  $\Delta t_{кт}$  с помощью этих машин. Расход компримированного газа при этом составляет 272,6 кг/с. Как видно из табл. 2, достижимая глубина охлаждения компримированного газа  $\Delta t_{кт}$  составляет в зависимости от вида рабочего тела порядка 4 – 7

°С. При этом учтены все затраты энергии на собственные нужды за счет теплоутилизирующей энергоустановки.

### 5. Теплоутилизирующая парэжекторная энергохолодильная установка на н-бутане

Схема и цикл такой машины приведены в [8], а основные характеристики рассчитанных машин в табл. 3.

Достижимая глубина охлаждения компримированного газа с помощью таких теплоутилизирующих холодильных машин составляет порядка 5,6 – 8,5 °С. При этом учтены затраты мощности парогенера-

тора на собственные нужды машины: привод насосов НРТ и вентиляторов воздушных конденсаторов.

### 6. Теплоутилизирующая турбокомпрессорная энергохолодильная установка на н-пентане

Схема и цикл такой установки приведены в [4], а основные результаты расчетов – в табл. 4.

Как видно из табл. 4, глубина охлаждения компримированного газа с помощью турбокомпрессорной холодильной машины составляет порядка 16,5 – 25 °С в зависимости от типа базовой ГТУ, т.е. примерно втрое превышает соответствующую величину

Таблица 2

Основные характеристики теплоутилизирующих турбодетандерных холодильных машин на различных рабочих телах

Параметр	Рабочее тело			
	воздух	н-пентан	метан	пропан
Давление рабочего тела, бар: перед компрессором P <sub>1</sub> за компрессором P <sub>2</sub>	1,0 2,0	0,26 0,98	5,0 10,0	3,0 10,0
Температура рабочего тела за детандером t <sub>4д</sub> , °С	-5,1	8,0	1,43	-1,5
Холодильный коэффициент действительный ε <sub>д</sub>	0,892	1,634	1,357	1,568
Коэффициент теплоиспользования действительный ζ <sub>д</sub>	0,112	0,205	0,170	0,197
Холодильная мощность машины Q <sub>0<sup>л</sup></sub> , кВт	2853	5226	4339	5015
Тепловая мощность проохладителя Q <sub>охл</sub> , кВт	7078	8795	7697	8417
Глубина охлаждения компримированного газа Δt <sub>кг</sub> , °С	3,94	7,31	6,07	7,01
Установленное количество охладителей (типа АВЗ) проохладителя, шт.	6	7	6	6
Суммарная масса воздушных охладителей G <sub>квзΣ</sub> , т	294	343	294	294

Таблица 3

Теплоутилизирующие парэжекторные холодильные машины на н-бутане

Параметр	Базовая энергоустановка			
	ГТНР-10	ДН-70	ДГ-90	ДН-80
Расход НРТ в рабочем контуре G <sub>р</sub> , кг/с	48,044	32,913	58,383	81,63
Расход НРТ в холодильном контуре G <sub>о</sub> , кг/с	11,050	7,570	13,428	18,776
Коэффициент инжекции U	0,23	0,23	0,23	0,23
Холодильный коэффициент ε	1,293	1,293	1,293	1,293
Коэффициент теплоиспользования действительный ζ <sub>д</sub>	0,159	0,159	0,159	0,159
Мощность парогенератора Q <sub>г</sub> , кВт	20928	14337	25432	35557
Холодильная мощность Q <sub>о</sub> , кВт	3786	2594	4601	6434
Расход компримированного газа G <sub>кг</sub> , кг/с	150	150	272,6	385,3
Глубина охлаждения компримированного газа Δt <sub>кг</sub> , °С	8,45	5,79	5,64	5,59
Тепловая мощность конденсатора Q <sub>к</sub> , кВт	23856	16343	28990	40534
Количество установленных воздушных конденсаторов типа АВЗ, шт.	17	12	21	29
Суммарная масса установленных конденсаторов G <sub>кΣ</sub> , т	833	588	1029	1421

при использовании турбодетандерных и парозежкторных теплоутилизирующих энергохолодильных машин. При охлаждении компримированного газа на 16,5 – 25 оС производительность газопровода без дополнительной затраты мощности на перекачку возрастает на 3,5 ... 6%. Соответственно при использовании других холодильных машин производительность газопровода будет увеличена не более чем на 1,3%.

### Заключение

В случае невозможности реализации дополни-

тельно вырабатываемой электрической мощности теплоутилизирующими энергоустановками на НРТ на собственные нужды КС или продажи ее во внешнюю сеть, можно использовать эту мощность непосредственно в виде теплоты для привода теплоутилизирующей турбокомпрессорной энергохолодильной установки на НРТ. Полученный холод может использоваться для дополнительного охлаждения компримированного газа и соответствующего увеличения производительности газопровода или для холодильников местной промышленности.

Таблица 4

Теплоутилизирующие турбокомпрессорные холодильные машины на н-пентане

Параметр	Базовая энергоустановка			
	ГТНР-10	ДН-70	ДГ-90	ДН-80
Механическая мощность энергоустановки нетто ( $N_T^H$ ) <sub>м</sub> , кВт	2629	1800	3197	4469
Расход НРТ в холодильном контуре $G_o$ , кг/с	32,1	22,0	39,0	54,5
Тепловая мощность конденсаторов холодильного контура $Q_k$ , кВт	12238	8379	14882	20803
Холодильная мощность машины $Q_o$ , кВт	9811	6718	11931	16678
Действительный холодильный коэффициент $\epsilon_d$	4,037	4,037	4,037	4,037
Действительный коэффициент теплоиспользования $\zeta_d$	0,469	0,469	0,469	0,469
Расход компримированного газа $G_{кг}$ , кг/с	150	150	272,6	385,3
Глубина охлаждения компримированного газа $\Delta t_{кг}$ , °С	24,9	17,1	16,7	16,5
Количество установленных воздушных конденсаторов типа АВЗ, шт.	10	7	12	16
Суммарная масса установленных конденсаторов $G_{к\sum}$ , т	490	343	588	784

### Литература

1. Leibowitz H., Schochet D.N. Gluerating Electric Power from Compressor Station Residual Heat // Pipeline and Gas journal. – 2001. – № 11. – Р. 24 – 26.
2. Клименко А.П., Петрушенко А.А., Васенцов Ю.А., Высоцкий Г.И. Термодинамические свойства легких углеводородов парафинового ряда. – К.: АН УССР. – 1960. – 96 с.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. – 720 с.
4. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – СПб.: Справочник, 1994. – 504 с.
5. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974. –

447 с.

6. Комплексне використання утилізаційних енергоустановок на КС для підвищення ефективності ГПА / Б.Д. Білека, Є.П. Васильєв, В.М. Клименко, В.М. Коломеєв, В.І. Избаш, Д.А. Костенко, В.А. Кривуца // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 4 (197). – С. 40 – 43.
7. Холодильные машины / Н.Н. Кошкин, И.А. Сакун, Е.М. Бамбушек и др. – Л.: Машиностроение, 1985. – 511 с.
8. Соколов Е.Я., Зингер И.М. Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1979. – 287 с.

Поступила в редакцию 12.04.2004

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.К. Безродный, Национальный технический университет (КПИ), Киев.