

НИЗКОКИПАЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ РАБОТЫ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧИХ ТЕЛ В ТЕПЛОУТИЛИЗИРУЮЩИХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Б.Д. Билека, д-р техн. наук, Е.П. Васильев, канд. техн. наук,

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина

За счет утилизации теплоты отработанных газов газотурбинных установок (ГТУ) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов с помощью двухконтурных энергоустановок на низкокипящих рабочих телах (НРТ) можно выработать дополнительно к мощности базовой ГТУ 18...30 % электрической мощности [1]. Технологическая схема, сложность конструкции, эксплуатации и ремонта, эффективность, надежность, безопасность работы и удельная стоимость теплоутилизующей энергоустановки в большой степени зависят от вида низкокипящего вещества, выбранного для работы в качестве НРТ во втором контуре теплоутилизующей энергоустановки. Опыт производства и строительства теплоутилизующих энергоустановок на НРТ накоплен в основном в геотермальной энергетике и в промышленности для утилизации относительно низкопотенциальной теплоты термальных и сбросных вод при их температуре 90...150°C, где в качестве НРТ используются вещества с относительно низкой критической температурой ($\leq 150^\circ\text{C}$) и отрицательными значениями нормальной температуры кипения ($< -5^\circ\text{C}$). В настоящее время за рубежом (Канада) на компрессорных станциях магистральных газопроводов начали устанавливаться теплоутилизующие энергоустановки для выработки электроэнергии, в которых утилизируется высокопотенциальная теплота отработанных газов ГТУ приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов с использованием в качестве рабочего тела более высококипящего тела (Н-пентана) и с более высокой критической температурой, чем у низкокипящих веществ, используемых в геотермальной энергетике [2]. Температура отработанных газов после ГТУ ГПА КС значительно выше –

достигает 550 °С и выше. Кроме того, на КС желательно использование безводных технологий, и поэтому для охлаждения конденсата НРТ должны применяться воздушные конденсаторы желательного атмосферного типа. Таким образом, вещество, выбранное для работы в качестве НРТ в рассматриваемых условиях должно характеризоваться значительно более высокой критической температурой и температурой нормального кипения, приближающейся к 40 °С. Например, на теплоутилизующей энергоустановке мощностью 7 МВт на базе приводной ГТУ ГПА RB-211 на канадской КС Gold Green даже при применении промежуточного высокотемпературного теплоносителя Dawtherm J или Therminol LT для передачи теплоты от отработанных газов ГТУ НРТ в качестве НРТ используется Н-пентан с критической температурой 197 °С и температурой нормального кипения 35 °С. В настоящей работе приведены результаты расчетных исследований эффективности термодинамических циклов в зависимости от максимальной температуры цикла на шести низкокипящих веществах: четырех видах углеводородов и двух видах фреонов, которые

потенциально могут быть использованы в рассматриваемых условиях (таблица, рис. 1, 2).

Эти вещества термодинамически эффективны, неагрессивны к конструкционным материалам, неядовиты, доступны, дешевы, разрешены к использованию международными соглашениями, для них имеются опубликованные данные по термодинамическим характеристикам или программы для расчета таких характеристик [3 - 5].

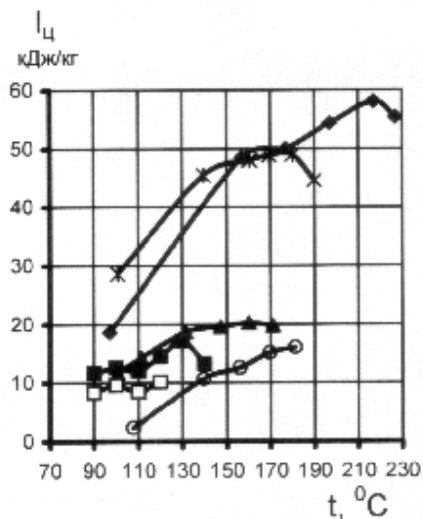


Рис. 1. Зависимости удельной работы цикла I_c от температуры НРТ в цикле:

- * -н-пентан,
- ◆ -гексан,
- - н-бутан,
- - изобутан,
- - R141b,
- ▲ - R123

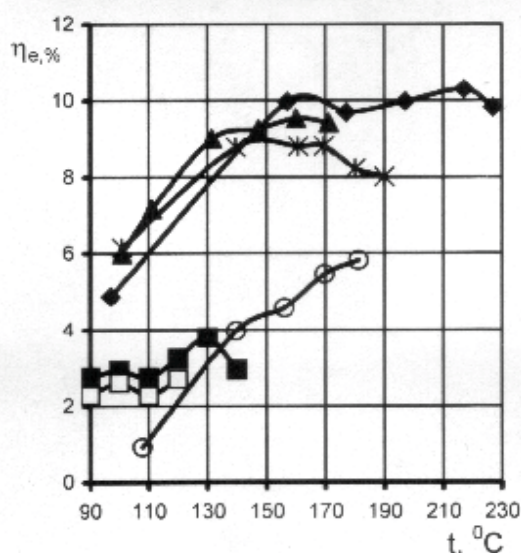


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД η_e от температуры НРТ в цикле t .

- * -н-пентан,
- ◆ -гексан,
- - н-бутан,
- - изобутан,
- - R141b,
- ▲ - R123

Таблица.

Основные характеристики веществ,
перспективных для использования в качестве низкокипящих рабочих тел
в циклах теплоутилизирующих энергоустановок

	Углеводороды					Фреоны	
	Изобутан	Н-бутан	Н-пентан	Цикло-пентан	Гексан	R123	R141в
	C_4H_{10}	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_5H_{10}	C_6H_{14}	$CHCl_2CF_3$	CCl_2FCH_3
$P_{кр}, \text{МПа}$	3.71	3.747	3.414	4.61	3.05	3.67	4.12
$t_{кр}, ^\circ\text{C}$	134.98	151.93	196.65	238.	234.	183.	204.
$t_{нк}, ^\circ\text{C}$	-12.55	-0.5	35.27	49.2	68.3	27.8	32.1
$t_{св}, ^\circ\text{C}$	431 (бутан)	431 (бутан)	284(пе-нтан)	385	261	Негорюч	Негорюч
$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	-145	-135	-129.7	-93.7	-95.3	< -100	< -100
Параметры НРТ в конденсаторе, принятые при расчете термодинамических циклов							
$t_k, ^\circ\text{C}$	40.0	35.38	35.27	-	68.3	40.0	40.0
$P_k, \text{МПа}$	0.53	0.33	0.10	-	0.10	0.15	0.14
Основные расчетные параметры цикла при $I_{ц, \max}$							
$t_{(I_{ц, \max})}, ^\circ\text{C}$	120	130	179	-	217	160.	181.
$P_{(I_{ц, \max})}, \text{МПа}$	2.8	2.6	2.65	-	2.17	2.5	3.0
$I_{ц, \max}, \text{кДж/кг}$	10.18	17.22	48.9	-	58.1	20.3	16.1
$I_{сж.д (I_{ц, \max})}, \text{кДж/кг}$	25.42	23.38	25.5	-	16.2	7.29	25.7
$I_{охл (I_{ц, \max})}, \text{кДж/кг}$	13.43	19.10	24.8	-	7.08	7.17	9.51
$\eta_t (I_{ц, \max}), \%$	13.2	14.5	20.2	-	17.5	19.7	19.1
$\eta_e (I_{ц, \max}), \%$	2.71	3.8	8.23	-	10.3	9.54	5.81

Из анализа результатов исследований следует:

– использование в качестве НРТ изобутана и Н-бутана нецелесообразно, так как давление в конденсаторе достигает 0,33...0,53 МПа – более чем в 2 - 5 раз выше, чем при использовании других исследованных веществ. С этим же связаны значительная потеря работоспособности цикла и относительно низкие значения термического и эффективного КПД цикла;

– зависимость удельной работы цикла от температуры носит экстремальный характер (рис. 1). Разность между критической температурой вещества и температурой, соответствующей максимальной удельной работе цикла составляет 15...24°C. Связано это с резкими возрастаниями удельной работы сжатия при приближении температуры цикла к критической температуре НРТ. Абсолютные значения максимальной удельной работы цикла в зависимости от НРТ отличаются более чем в 5 раз: максимальные – у гексана, минимальные – у изобутана;

– удельная работа охлаждения слабо зависит от температуры цикла и в большой степени определяется видом НРТ: у Н-пентана она вчетверо выше, чем у гексана, при одинаковой температуре цикла;

– термодинамический КПД цикла у всех веществ растет с увеличением температуры цикла. При 160°C значения этого КПД находятся в пределах 15 (гексан)...20% (Н-пентан);

– изменение эффективного КПД в зависимости от температуры носит экстремальный характер (рис. 2). При 160°C его значение у исследованных НРТ примерно равно 5 (гексан, R141V)...10% (Н-пентан, R-123);

– из анализа исследованных циклов на различных низкокипящих рабочих телах нельзя сделать окончательных выводов о целесообразности выбора того или иного НРТ только исходя из термодинамических характеристик цикла. Важно учитывать и другие физико-химические свойства вещества: неагрессивность по отношению к конструкционным материалам, тепломассообменные характеристики, пожаровзрывобезопасность, неядовитость, доступность, стоимость, значения температур самовоспламенения и плавления;

– наиболее эффективным веществом по термодинамическим характеристикам является гексан, с использованием которого можно работать при максимальной температуре цикла 200...210°C. Но у гексана слишком низкая температура самовоспламенения (261°C). По-этому целесообразнее использовать Н-пентан при максимальной температуре цикла 170°C, так как у него температура самовоспламенения выше (284°C) и, следовательно, промежуточный теплоноситель можно использовать при более высокой температуре (~270°C). В теплоутилизирующих энергоустановках на перспективных КС может быть использован в качестве НРТ циклопентан.

Литература

1. Билека Б.Д., Васильев Е.П. Автономное электроснабжение компрессорных станций с газотурбинным приводом ГПА на основе теплоутилизирующих энергоустановок на низкокипящих рабочих телах // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.*- Харків: ХАІ.- 2002.- Вип. 31. Двигуни та енергоустановки.- С.14-16.
2. Leibowitz H., Schochet D.N. Generating Electric Power From Compressor Station Residual Heat // *Pipeline and Gas Journal.*- 2001.- № 11.- P. 24-26.
3. Клименко А.П., Петрушенко А.А. Термодинамические свойства легких углеводородов парафинового ряда.- К.: Изд-во АН УССР. Ин-т использования газа, 1969.- кн. 8.- 96 с. (Тр. АН УССР).
4. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания.- М.-Л.: Госэнерго-издат, 1962.- 288 с.
5. Вассерман О.А., Фомінський Д.В. Термодинамічні властивості альтернативних холодоагентів R32 і 125 / Под ред. О.А. Вассермана.- Одесса, 2002.- 256 с.

Поступила в редакцию 02.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, зав. отделом Института технической теплофизики НАН Украины Е.Д. Домашев, г. Киев; д-р техн. наук, профессор Б.С. Сорока, Институт газа НАН Украины, г. Киев.