

Е. А. Фетисова, А. А. Жердев,  
А. И. Смородин

## РАЗРАБОТКА ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ НАГРЕВА РЕГЕНЕРИРУЮЩЕГО ГАЗА В ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

*Разработан тепловой насос, использующий для получения высокотемпературного потока азота теплоту охлаждающей воды воздушных компрессоров. Показано, что использование низкопотенциальной теплоты в промышленных установках оправдывает себя, а дальнейший положительный эффект определяется применением более совершенного компрессорного оборудования и затратами на электроэнергию, стоимость которой непрерывно повышается.*

**E-mail:** zherdev@power.bmstu.ru

**Ключевые слова:** воздухоразделительная установка, блок комплексной очистки, тепловой насос, электронагреватель, регенерация, схемы.

Одним из перспективных направлений энергосбережения является освоение низкопотенциальной теплоты, получаемой за счет работы промышленного оборудования (теплоэлектроцентралей, печей различного назначения, компрессоров и т.д.).

Наиболее предпочтительными областями промышленного внедрения тепловых насосов являются те, где напрямую используется электрическая энергия для нагрева теплоносителей, что позволяет получить значительную экономию электроэнергии.

Так, в воздухоразделительных установках используются три варианта нагрева регенерирующего газа: с помощью только электронагревателя, электронагревателя и накопителя теплоты, а также теплообменника с паровым обогревом. В последние годы наиболее предпочтительным способом является нагрев регенерирующего газа с помощью электронагревателя и накопителя теплоты. Этот способ нагрева позволяет снизить установленную электрическую мощность почти в 3 раза на крупных и средних воздухоразделительных установках. Дальнейшее совершенствование узла нагрева регенерирующего газа возможно за счет замены существующего электронагревателя тепловым насосом, что позволит снизить потребляемую мощность.

Цель настоящей работы — разработка теплового насоса, использующего теплоту охлаждающей воды воздушных компрессоров для получения высокотемпературного потока азота  $\sim 453$  К ( $180$  °С), идущего на регенерацию адсорберов блока комплексной очистки в воздухоразделительных установках [1–4].

Тепловой насос разрабатывался применительно к установке разделения воздуха КдАдАр-18/14 (производства ОАО “Криогенмаш”), предназначенной для получения газообразного технического кислорода и азота под давлением, а также жидких кислорода, азота и аргона. Установка перерабатывает  $90000$  м<sup>3</sup>/ч воздуха, который сжимается

компрессором Cameron Turbo Air 6040 до давления 2,5 МПа. Компрессор охлаждается оборотной водой с расходом 780 м<sup>3</sup>/ч, при этом ее температура на выходе из компрессора равна ~313 К (40 °С). Потребляемая мощность воздушного компрессора 13600 кВт.

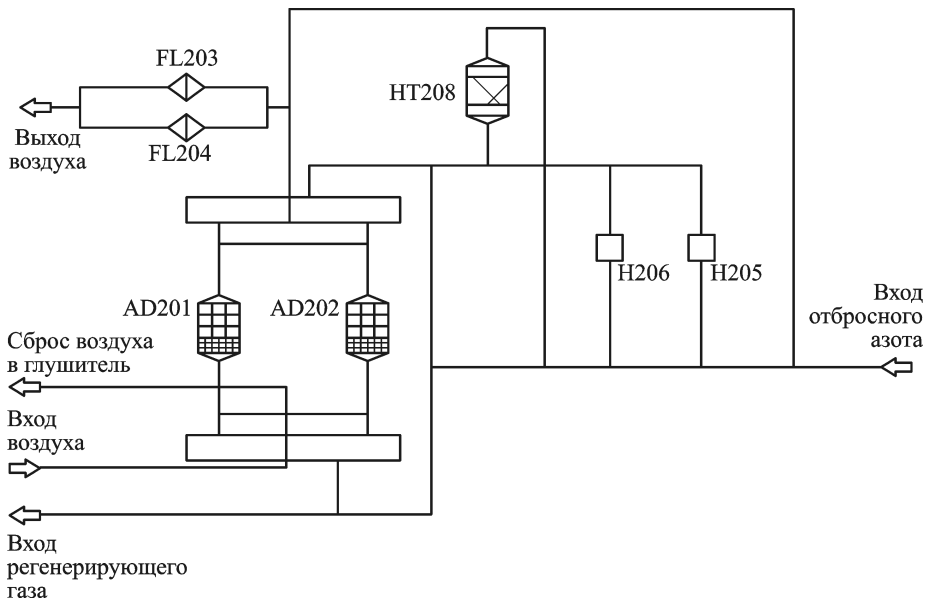
Особенностью этой установки является получение производственного газообразного кислорода и азота под требуемым давлением непосредственно из блока разделения, что позволяет исключить из состава оборудования участка разделения воздуха компрессорное оборудование. Построена установка по схеме среднего давления воздуха с дожатием дроссельного потока воздуха в компрессорной ступени турбодетандер-компрессорного агрегата с выдачей кислорода и азота под давлением с помощью жидкостных криогенных насосов. Установка создана на основе современных схемных и конструкторских решений.

В блоке комплексной очистки КдАдАр-18/14 штатная регенерация адсорбента проводится нагретым отбросным азотом. При этом высокотемпературная регенерация проводится один раз в два года. В этом процессе воздух нагревается в электронагревателе до температуры 523 К (250 °С) и направляется на нагрев адсорбента в регенерируемый адсорбер. При низкотемпературной (штатной) регенерации процесс проводится через каждые 4 ч, при этом азот нагревается до 449 К (176 °С).

Принципиальная технологическая схема блока комплексной очистки воздухоразделительной установки КдАдАр-18/14 представлена на рис. 1.

Воздух с температурой не выше 288 К (15 °С) и давлением 2,5 МПа поступает в один из попеременно работающих адсорберов (AD201 или AD202), где очищается от влаги, диоксида углерода и других примесей, затем проходит через затвор, трубопровод с фильтроэлементами FL203 (FL204) и поступает в ВРУ на разделение. Другой адсорбер в это время находится на регенерации, которая осуществляется регенерирующим газом противотоком потоку воздуха, т.е. сверху вниз. Отбросной азот поступает в контур регенерации и направляется или на нагрев адсорбера, или на его охлаждение.

Контур регенерации состоит из двух электронагревателей (Н205 или Н206), один из которых работает совместно с накопителем теплоты НТ208. Часть регенерирующего газа, поступающего в блок комплексной очистки в количестве 20 %, подается в электронагреватель Н205 (Н206), где нагревается до температуры ~449 К (176 °С) и направляется на нагрев насадки в накопитель теплоты НТ208. По истечении 3,5 ч от начала нагрева основная часть регенерирующего газа в количестве 80 % направляется в накопитель теплоты, где нагревается до



**Рис. 1. Принципиальная технологическая схема блока комплексной очистки воздуходелительной установки КдАдАр-18/14:**

AD201, AD202 — адсорберы; H205, H206 — электронагреватели; HT208 — накопитель теплоты; FL203, FL204 — фильтроэлементы

$\sim 443 \text{ K}$  ( $170^\circ \text{C}$ ), смешивается с потоком азота, который прошел через электронагреватель, и в количестве 100 % поступает в адсорбер AD201 (AD202), затем через затвор сбрасывается в атмосферу, при этом его температура составляет  $\sim 303 \text{ K}$  ( $30^\circ \text{C}$ ).

Насадка нагревается (процесс накопления тепловой энергии) в накопителе теплоты во время процессов охлаждения, наполнения, параллельной работы и сброса давления, происходящих в одном из адсорберов.

Отрегенерированный адсорбер AD201 (AD202) включается в режим адсорбции и заданное время работает параллельно с адсорбером AD202 (AD201), а затем отработанный адсорбер AD201 (AD202) ставится на регенерацию. Предварительно в отработанном адсорбере AD201 (AD202) понижают давление, сбрасывая воздух в атмосферу. В период наполнения одного адсорбера, параллельной работы и понижения давления в другом адсорбере регенерирующий газ сбрасывается в атмосферу через затворы.

В настоящей работе сделана попытка обосновать возможность применения теплового насоса для нагрева регенерирующего газа с использованием теплоты оборотной воды.

Реализация процесса нагрева регенерирующего газа (азота) от исходной температуры, равной  $285 \text{ K}$  ( $12^\circ \text{C}$ ), до необходимой  $\sim 449 \text{ K}$  ( $176^\circ \text{C}$ ) возможна при выборе эффективного цикла, рабочего тела и

подборе компрессора с соответствующими техническими характеристиками.

Аммиак по сравнению с другими хладагентами является наиболее эффективным рабочим телом в цикле ТН. Он позволяет получить в цикле теплоту с высоким уровнем температур 463...468 К (190...195 °С), которая необходима для нагрева регенерирующего газа от 285 К (12 °С) до ~449 К (176 °С).

Основной задачей при проектировании теплового насоса является подбор компрессора. В этой связи была проведена работа по подбору серийно выпускаемых аммиачных компрессоров. Наиболее близкой конструкцией являются компрессоры компаний Johnson Controls, ГЕА Грассо Рефрижерейшн и др. Далее расчет парокompрессионного цикла теплового насоса был проведен на основании выбранного серийно выпускаемого аммиачного компрессора компании Johnson Controls с температурой нагнетания 121 °С и температурой конденсации 71 °С (при этом давление составляло 33,88 бара), мощностью 56,8 кВт.

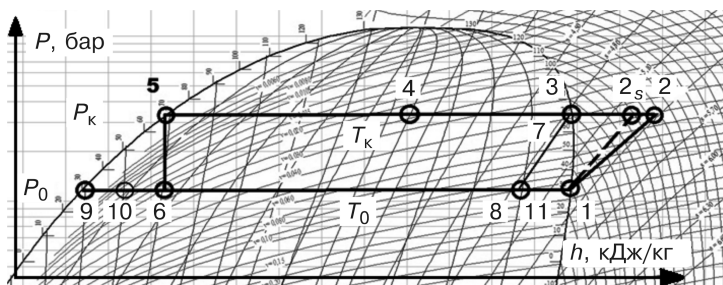
*Исходные данные для проектируемого теплового насоса*

Расход регенерирующего газа .....	1
Температура регенерирующего газа:	
начальная .....	285 К (12 °С);
конечная .....	379 К (106 °С)
Давление регенерирующего газа .....	1,12 бар

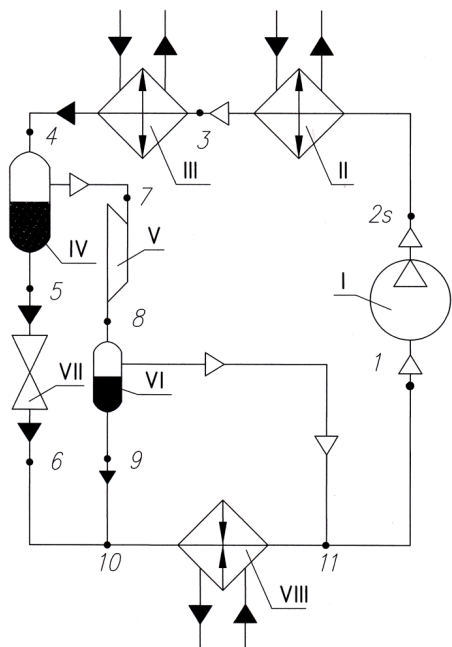
Парокompрессионный цикл теплового насоса представлен на рис. 2, а его принципиальная технологическая схема на рис. 3.

**Основные этапы расчета цикла.** Температура начала сжатия (точка 1 — точка всасывания в компрессор), равная 303 К (30 °С) (давление при этом равно 11,33 бар), определяется источником низкопотенциальной теплоты для проектируемого теплового насоса, которым является обратная вода с температурой ~313 К (40 °С).

Исходными данными для расчета цикла теплового насоса является расход хладагента и температура его конденсации, которые были подобраны расчетным путем с помощью программного пакета Aspen



**Рис. 2. Парокompрессионный цикл теплового насоса в  $p-h$  диаграмме**



**Рис. 3. Принципиальная технологическая схема парокompрессионного цикла теплового насоса:**

I — компрессор; II — предконденсатор; III — конденсатор; IV, VI — отделители жидкости; V — турбодетандер; VII — дроссельный вентиль; VIII — испаритель

HYSYS. Была построена и рассчитана термодинамическая модель теплонасосной установки со следующими параметрами:

Расход аммиака ( $G_{NH_3}$ ) .....	0,3 кг/с
Температура:	
нагнетания ( $T_H$ ) .....	394 К (121 °С)
конденсации ( $T_K$ ) .....	344 К (71 °С)
Давление конденсации ( $p_K$ ) .....	33,88 бар

Поскольку в точке 4 доля пара велика (~80%), то после конденсатора ставится сепаратор. Получившийся пар (точка 7) идет на расширение в роторный детандер, а жидкость (точка 5) на дросселирование. В детандере аммиак расширяется с начального давления 33,88 бар до конечного давления, равного 11,33 бар.

Роторный детандер в цикле использован ввиду необходимости утилизировать энергию, сообщенную рабочему телу при сжатии в компрессоре и не отведенную от него в виде теплоты в конденсаторе из-за недостатка расхода регенерирующего газа (азота).

Исходя из расчета цикла параметры роторного детандера следующие:

Расход аммиака ( $G_d$ ) .....	0,24 кг/с
Температура аммиака:	
на входе в детандер ( $T_7$ ) .....	344 К (71 °С)
на выходе из детандера ( $T_8$ ) .....	303 К (30 °С)
Давление аммиака:	
на входе ( $p_7$ ) .....	33,88 бар
на выходе ( $p_8$ ) .....	11,33 бар

Парожидкостная смесь, которая выходит из детандера, направляется в сепаратор, где разделяется на пар и жидкость. Пар (точка 11) идет на смешение с потоком, который выходит из испарителя, а жидкость (точка 10) смешивается с потоком жидкости после дросселирования (точке б) и направляется в испаритель.

На завершающем этапе определяются свойства хладагента после сжатия в компрессоре (точка 2) при независимых переменных  $p$  и  $s$  с использованием условий  $p_2 = p_3$  и  $s_1 = s_2$ .

Затем рассчитываются характеристики цикла  $q_0$ ,  $L_{ц}$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ .

**Расчет цикла теплового насоса.** Температура начала сжатия (точка всасывания в компрессор):

$$t_1 = 30^\circ\text{C}.$$

Полное отношение давлений в расчетном цикле:

$$\pi_k = \frac{p_k}{p_0};$$
$$\pi_k = \frac{33,88}{11,33} = 2,99.$$

Массовая холодопроизводительность цикла:

$$Q_0 = G_u(i_1 - i_{10});$$
$$Q_0 = 0,074(1692 - 682) = 72,54 \text{ кВт}.$$

Тепловая нагрузка конденсатора:

$$Q_k = G_k(i_3 - i_4);$$
$$Q_k = 0,3(1690 - 1505) = 55,5 \text{ кВт}.$$

Тепловая нагрузка предконденсатора:

$$Q_{пр} = G_{пр}(i_2 - i_3);$$
$$Q_{пр} = 0,3(1875 - 1690) = 55,5 \text{ кВт}.$$

Теплопроизводительность теплового насоса:

$$Q_{тн} = G_{NH_3}(i_2 - i_4);$$
$$Q_{тн} = 0,3(1875 - 1505) = 110 \text{ кВт}.$$

Работа сжатия в компрессоре:

$$L_t = \frac{G_{NH_3}(i_2 - i_1)}{\eta};$$
$$L_t = \frac{0,3 \cdot (1850 - 1692)}{0,87} = 56,8 \text{ кВт}.$$

Полезная работа, полученная при расширении в детандере:

$$L_d = G_d(i_7 - i_8)\eta;$$

$$L_d = 0,24 \cdot (1690 - 1593) \cdot 0,8 = 18,6 \text{ кВт.}$$

Коэффициент преобразования цикла:

$$\mu = \frac{Q_{\text{тн}}}{L_t - L_d};$$

$$\mu = \frac{110}{56,8 - 18,6} = 2,87.$$

При построении данной схемы нагрев регенерирующего газа возможен только до температуры 379 К (106 °С), поэтому дальнейшая подготовка регенерирующего газа должна проводиться в электронагревателе с меньшей мощностью (~80 кВт).

Результаты расчета такой схемы приведены в таблице.

#### Расход электроэнергии, кВт·ч

Расчетный период	Тепловой насос + ТЭН (117 кВт)	Электронагреватель (180 кВт)
Цикл (4 ч)	468	720
Месяц	84 240	129 600
Год	1 024 920	1 576 800

Экономия электроэнергии при использовании теплового насоса, работающего совместно с электронагревателем (тепловой насос + ТЭН), значительна и составляет 551 880 кВт·ч/год, а в рублях ~1,55 млн р./год.

Идея использования низкопотенциальной теплоты в промышленных установках, как показывают расчеты, оправдывает себя, а дальнейший положительный эффект определяется применением специального компрессорного оборудования и затратами на электроэнергию, стоимость которой непрерывно повышается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М а р т ы н о в с к и й В. С. Тепловые насосы. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 191 с.
2. М а р т ы н о в с к и й В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. – М.: Энергия, 1979. – 288 с.
3. К р и о г е н н ы е системы. Т. 2 / А.М. Архаров, А.И. Смородин и др. – М.: Машиностроение, 1999. – 720 с.
4. Б л а з н и н Ю. П., Г о р о х о в В. А., Г о л у б е в В. М. Блоки комплексной очистки воздухоразделительных установок ОАО “Криогенмаш”: методы расчета, конструкции, опыт пуска наладки и эксплуатации // Технические газы. – 2009. – № 4. – С. 47–56.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012