

УДК 621.5; 621.65

## КОМПРЕССИОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС С РАБОЧИМ ТЕЛОМ: СМЕСЬ ПАРОВ ВОДЫ И ВОЗДУХА

*И.М. ПИСКУН, д-р техн. наук, проф. Г.Н. АБАЕВ  
 (Полоцкий государственный университет)*

*В современных условиях экономика Республики Беларусь базируется преимущественно на импорте энергоресурсов, поэтому поиск альтернативных источников энергии и утилизация низкопотенциального тепла становится актуальной задачей для нашего государства. Одно из эффективных направлений по энергосбережению – использование тепловых насосов, преобразующих низкопотенциальную энергию в теплоту более высокой температуры. Применение теплонасосных установок, преобразующих низкопотенциальную энергию в теплоту более высокой температуры, пригодную для дальнейшего использования, позволит не только экономить топливо, но и защитит окружающую среду от воздействия тепловых отходов. Создание теплового насоса компрессионного типа с использованием в качестве рабочего тела смеси паров воды и воздуха позволит поднять потенциал системы водооборота отопления зданий.*

**Введение.** В мировой практике для достижения наибольшего экономического эффекта тепловые насосы используют в первую очередь для рекуперации промышленных тепловых отходов.

Наиболее приоритетные направления работ по энергосбережению в промышленности:

- использование тепла уходящих газов термических и нагревательных печей;
- использование тепла вторичного пара и конденсата;
- использование низкопотенциального тепла охлаждающей воды систем водооборота и тепла вентиляционных выбросов.

Составляя значительную часть теряемого в промышленности тепла, эти источники, как правило, не могут быть эффективно использованы из-за своего низкого потенциала без тепловых насосов [1].

Особое место в использовании низкопотенциального тепла в промышленности занимают тепловые насосы с термокомпрессионными циклами. В таких системах определяющими являются выбор эффективного теплообменного оборудования, рабочего тела и компрессора для термокомпрессионного цикла [2].

**Описание схемы пилотной установки теплового насоса.** Тепловой насос компрессионного типа (рабочее тело – смесь паров воды и воздуха) для рекуперации больших количеств низкопотенциального тепла с использованием ротационно-пластинчатого компрессора и струйного аппарата в качестве теплообменника рекуператора низкопотенциального тепла представляет интерес для системы водооборота отопления зданий.

Пилотная установка теплового насоса, разработанная и созданная на кафедре химической техники Полоцкого государственного университета, представлена на рисунке 1 [3, 4]. Установка работает следующим образом. Вода с температурой 30...50 °С циркулирует по трубному пространству и охлаждается в змеевиковом теплообменнике 6 до температуры 25...30 °С. Для охлаждения теплой воды по межтрубному пространству циркулирует охлажденная в струйном аппарате 2 вода. Охлаждение воды в струйном аппарате 2 достигается за счет испарения жидкой части рабочего тела.

Струйный аппарат применяется с целью создания более глубокого вакуума для повышения содержания количества водяных паров в паровоздушной смеси и увеличения удельной поверхности контакта фаз между теплоносителями.

Газообразная часть рабочего тела (воздух) подается в струйный аппарат через эжектор. Газожидкостная смесь поступает в нижнюю часть струйного аппарата, в газожидкостной слой. За счет испарения жидкой части рабочего тела и происходит охлаждение воды.

Пары рабочего тела с температурой 25...30 °С поступают на всас ротационно-пластинчатого компрессора, где сжимаясь, нагреваются до 150...200 °С [3, 5]. Горячие пары рабочего тела от компрессора направляются в теплообменник 4, где охлаждаются, частично конденсируются и поступают в сепаратор 5. В сепараторе рабочее тело окончательно разделяется на жидкую и газообразную часть. Для получения горячей воды и водяного пара в теплообменник 4 непрерывно поступает свежая вода.

Рабочее тело, состоящее из жидкой и газообразной частей, из сепаратора вновь поступает в струйный аппарат. Рабочий цикл повторяется. В результате установка вырабатывает «горячую воду» и водяной пар [3, 4].

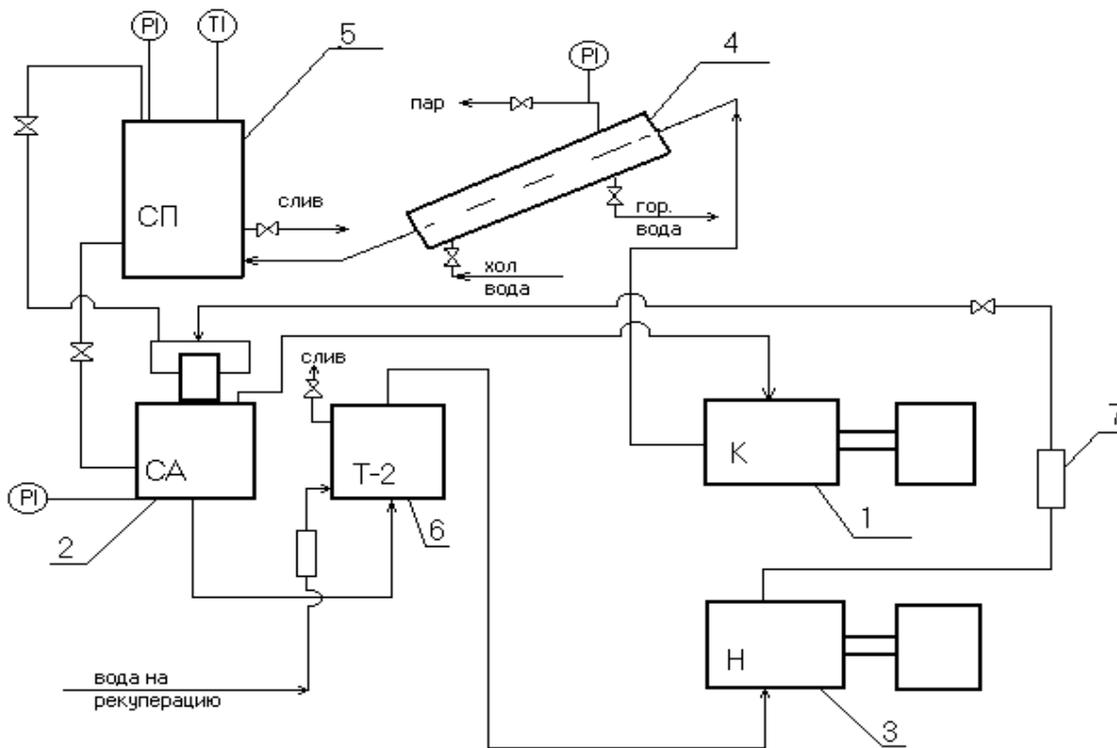


Рис. 1. Пилотная установка теплового насоса:  
 1 – компрессор; 2 – струйный аппарат; 3 – насос для циркуляции;  
 4 – теплообменник для получения горячей воды и пара;  
 5 – сепаратор жидкой и газообразной части рабочего тела;  
 6 – теплообменник для охлаждения обратной воды; 7 – простейшие средства КИП и А

**Теоретический анализ совместной работы компрессора и струйного аппарата.** Для компримирования рабочего тела планируется использовать ротационно-пластинчатый вакуум-насос ДВН-1 мощностью 4 кВт, выпускаемый на ОАО «Технолит» (г. Полоцк, Республика Беларусь).

Для повышения эффективности и КПД пилотной установки необходимо создать условия, повышающие содержание водяных паров в рабочей смеси. С одной стороны, это достигается за счет увеличения вакуума, создаваемого компрессором, и интенсификации процессов массо- и теплообмена в струйном аппарате. С другой стороны, применение струйного аппарата в схеме с компрессором позволило бы дополнительно углубить вакуум, так как известно, что струйные аппараты могут применяться как самостоятельные аппараты для вакуумирования.

К сожалению, в литературных источниках нами не найдено описание совместной работы вакуум-насоса и струйного аппарата. Известно лишь описание компрессоров, соединенных в последовательную или параллельную схему. Предполагается, что применение компрессора и струйного аппарата как самостоятельных аппаратов будет подчиняться аналогичным законам.

*Параллельная работа* компрессоров применяется для увеличения расхода газа в системе (рис 2, а). Параллельно можно соединять компрессоры различных типов, например центробежный и поршневой. Однако наиболее эффективна работа при подключении однотипных компрессоров с одинаковыми напорными характеристиками.

Пусть в системе работают два компрессора 1 и 2 с соответствующими характеристиками:  $P_1 = f(V)$  и  $P_2 = f(V)$ . Работая одиночно, компрессоры имеют производительность  $V_1$  и  $V_2$ . При параллельной работе суммарная производительность будет равна:

$$V_{1+2} = V_1 + V_2.$$

Суммируя абсциссы при одинаковых значениях  $P$  ( $P_i = \text{const}$ ), можно получить суммарную характеристику двух компрессоров [6, 7]:

$$P_{1+2} = f(V).$$

Последовательное соединение компрессоров применяется при необходимости увеличения давления (рис 2, б). Компрессоры могут устанавливаться на некотором удалении друг от друга либо непосредственно друг за другом. Последовательно обычно включаются одинаковые компрессоры. Число последовательно включенных компрессоров ограничивается прочностью корпусов и надежностью их работы.

Общую характеристику строят суммированием ординат характеристик отдельных компрессоров для постоянных абсцисс ( $V_i = \text{const}$ ). Работая одиночно, компрессоры имеют рабочее давление  $P_1$  и  $P_2$ . При последовательной работе суммарное давление, развиваемое компрессорами, будет равно [6, 7]:

$$P_{1+2} = P_1 + P_2.$$

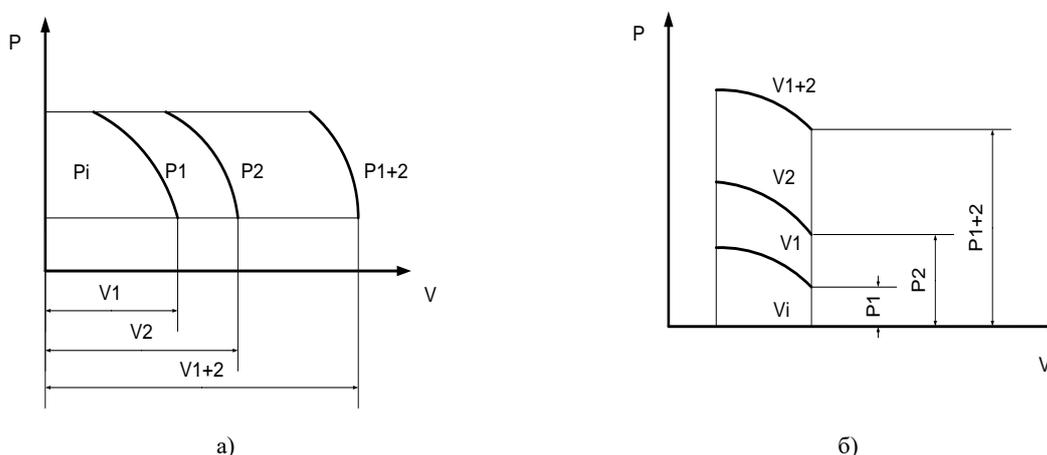


Рис. 2. Совместная работа компрессоров:  
а – параллельное соединение; б – последовательное соединение

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Чтобы выявить влияние струйного аппарата на работу вакуум-насоса, была изучена их совместная работа и работа одного насоса. Отдельно изучить работу лабораторного струйного аппарата довольно сложно, так как он обладает низкими рабочими характеристиками, которые трудно измерить из-за их малых значений.

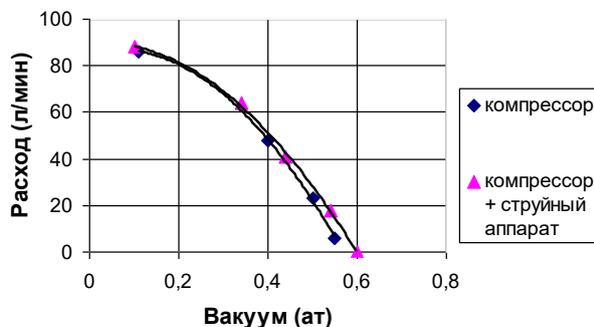


Рис. 3. Совместная работа компрессора 2НВР-5ДН и струйного аппарата

В нашей работе были сняты характеристики отдельно работающего вакуум-насоса 2НВР-5ДН (расход/вакуум) во всех диапазонах его работы (рис. 3). Результаты совместной работы вакуум-насоса и струйного аппарата в последовательном соединении также отображены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что последовательное подключение струйного аппарата к компрессору несколько улучшает характеристики системы, как и предполагалось, по аналогии с последовательным соединением компрессоров. Улучшение характеристик лишь на незначительную величину обусловлено низкими показателями работы струйного аппарата, созданного для других целей.

Для создания новой пилотной установки необходимо использование струйного аппарата с определенными характеристиками. Предполагается, что струйный аппарат сможет развивать вакуум до 0,6 ат абсолютных, а максимальная производительность по воздуху будет близка к производительности компрессора (1...1,5 м<sup>3</sup>/мин). При этом для достижения заданных характеристик струйный аппарат должен соответствовать определенным критериям:

- геометрический размер и форма сопла;
- геометрический размер и форма конфузора и размеры шахты;
- положение шахты относительно уровня жидкости в аппарате;
- гидродинамические характеристики истечения жидкости из сопла;
- определенное давление жидкости перед соплом.

Для дальнейшего проектирования теплового насоса воспользуемся данными, полученными при изучении более совершенного струйного аппарата (создан на кафедре химической техники). К сожалению, форма и материал корпуса струйного аппарата выполнены из стекла и не позволяют его исполь-

зовать в схеме теплового насоса. Однако данные по развиваемому вакууму и выявленные коэффициенты эжекции позволяют сделать некоторые предположения.

Так, например известны оптимальные рабочие характеристики струйного аппарата после ряда экспериментов (расход /вакуум). Отообразим их на рисунке 4 вместе с рабочими характеристиками вакуум-насоса ДВН-1.

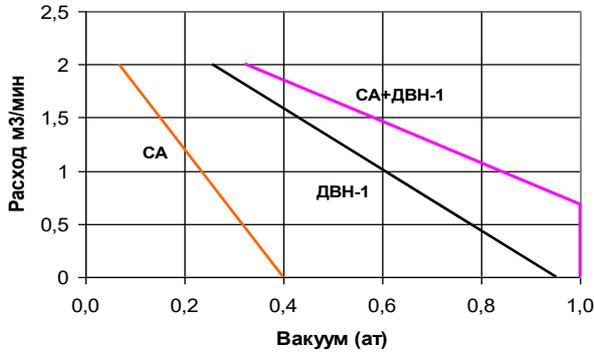


Рис. 4. Совместная работа компрессора ДВН-1 и лабораторного струйного аппарата

(в пределах 0,2...0,1 ат абсол.) при достаточных расходах рабочей среды (0,9 м³/мин). Это в свою очередь позволит достичь мощности теплового насоса порядка 20 кВт, при 4 кВт, затраченных на привод компрессора и насоса струйного аппарата.

**Расчет мощности теплового насоса**

Используя экспериментальные данные по объемной производительности компрессора ДВН-1 и лабораторного струйного аппарата, можно произвести ориентировочный расчет мощности теплового насоса.

Мощность теплового насоса представляет собой количество энергии (Q), которое снимается при охлаждении паровоздушной смеси от 150 до 30 °С в теплообменнике-конденсаторе 4 (см. рис. 1) для получения горячей воды.

При этом в теплообменнике происходит охлаждение воздуха и конденсация водяного пара.

$$Q = \Delta Q_{возд.} + \Delta Q_{в.п.}, \tag{1}$$

где  $\Delta Q_{возд.}$  – энергия, выделяемая при охлаждении воздуха:

$$\Delta Q_{возд.} = G_{возд.} \cdot C_{возд.} \cdot (T_{150^\circ} - T_{30^\circ}),$$

где  $C_{возд.} = 1010$  Дж/кг·град – средняя теплоемкость воздуха;  $G_{возд.}$  – массовый расход воздуха;  $\Delta Q_{в.п.} = G_{в.п.} \cdot (1150^\circ - 130^\circ)$  – энергия, выделяемая при охлаждении и конденсации водяного пара:

$$\Delta Q_{в.п.} = G_{в.п.} \cdot (1150^\circ - 130^\circ),$$

где  $1150^\circ = 2753000$  Дж /кг – энтальпия водяного пара при 150 °С;  $130^\circ = 126000$  Дж /кг – энтальпия воды при 30 °С.

$$Q = G_{возд.} \cdot C_{возд.} \cdot (T_{150^\circ} - T_{30^\circ}) + G_{в.п.} \cdot (1150^\circ - 130^\circ).$$

Соотношение воздуха и водяного пара в паровоздушной смеси в зависимости от вакуума будет определяться соотношением:

$$G_{вод.}/G_{возд.} = \frac{P_{вод.} \cdot M_{вод.}}{P_{возд.} \cdot M_{возд.}},$$

откуда  $G_{вод.} = \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 G_{возд.}$

$$P_{возд.} = P - P_{вод.},$$

где P – общее давление смеси.

Таким образом, преобразовав выражение (1), получим:

$$Q = G_{возд.} \cdot (C_{возд.} \cdot \Delta T_{возд.} + \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 \Delta I). \tag{2}$$

Как видно из рисунка, работа струйного аппарата при совместной работе с компрессором может значительно повлиять на характеристики последнего.

Теоретически характеристика при совместной работе компрессора ДВН-1 и лабораторного струйного аппарата в последовательном соединении должна получиться путем суммирования ординат для постоянных абсцисс ( $V_i = const$ ). При этом суммарный вакуум, развиваемый аппаратами, будет равен:

$$P_{K+ca} = P_K + P_{CA}.$$

Рисунок 4 показывает, что совместная работа компрессора и струйного аппарата даст ощутимую возможность по увеличению вакуума

Выразим массовый расход воздуха через объемный расход смеси:

$$V_{см.} = V_{возд.} + V_{вод.};$$

$$V_{см.} = G_{возд.}/p_{возд.} + G_{вод.}/p_{вод.} = G_{возд.}/p_{возд.} + \left( \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 \right) \cdot G_{возд.}/p_{вод.} =$$

$$= G_{возд.} \cdot (1/p_{возд.} + \left( \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 \right) \cdot 1/p_{вод.}).$$

Отсюда массовый расход воздуха

$$G_{возд.} = V_{см.}/(1/p_{возд.} + \left( \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 \right) \cdot 1/p_{вод.}). \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим мощность теплового насоса в виде выражения:

$$Q = (V_{см.}/(1/p_{возд.} + \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 \cdot 1/p_{вод.})) \cdot (C_{возд.} \cdot \Delta T_{возд.} + \frac{P_{вод.}}{P_{возд.}} \cdot 0,621 \cdot \Delta T). \quad (4)$$

При объемной производительности рабочей смеси в контуре теплового насоса  $V_{см.} = 0,9 \text{ м}^3$  и развиваемом вакууме  $P = 0,1 \text{ ат}$  абс. мощность теплового насоса будет равна  $Q = 15 \text{ кВт}$ .

Аналогичным образом по выражению (4) рассчитаем мощность при тех же условиях при развиваемом вакууме  $0,2 \text{ ат}$  и  $0,15 \text{ ат}$ . Результаты расчетов представлены в таблице.

Расчет мощности теплового насоса

$\rho_{возд.}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{H_2O}, \text{ кг/м}^3$	$P_{H_2O}, \text{ ат}$	$P_{возд.}, \text{ ат}$	$P, \text{ ат}$	$\Delta t_{в.п.}, \text{ Дж/кг}$	$Q, \text{ Дж/с}$	$N, \text{ кВт}$
1,2946	0,803	0,0433	0,1567	0,2	2627300	8701,21	8,7
1,2946	0,803	0,0433	0,1067	0,15	2627300	10816,37	10,8
1,2946	0,803	0,0433	0,0567	0,1	2627300	15045,6	15,0

**Заключение.** Создание типового теплового насоса мощностью до 15 кВт возможно на основе вакуум-насоса ДВН-1, выпускаемого на ОАО «Технолит» (г. Полоцк). Потребляя 3...4 кВт энергии, этот тепловой насос сможет рекуперировать низкопотенциальное тепло и получать горячую воду с температурой 80...90 °С и потенциалом до 15 кВт. В настоящее время такая установка создается на кафедре химической техники Полоцкого государственного университета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рекуперация низкопотенциального тепла системы оборотного охлаждения с использованием термокомпрессионных циклов / Г.Н. Абаев [и др.] // *Материалы, технологии, инструменты.* – 1998. – № 1. – С. 49 – 52.
2. Бунин, В.С. Тепловой насос / В.С. Бунин // *Большая Российская энциклопедия.* – М., 2001. – 253 с.
3. Компрессорный тепловой насос: пат. № 6345 Респ. Беларусь / Г.Н. Абаев, М.А. Брикер, Е.В. Чернявская // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр. інтэлектуал. уласнасці.* – 2004.
4. Пилотная установка по рекуперации низкопотенциального тепла / Г.Н. Абаев [и др.] // *РЭК нефтехим-1: тр. междунар. науч.-техн. конф.* – Новополоцк, 1998. – С. 200 – 203.
5. Абаев, Г.Н. Тепловой баланс компрессора для схем тепловых насосов / Г.Н. Абаев, М.А. Брикер // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2002. – № 1. – С. 34 – 36.
6. Семидуберский, М.С. Насосы. Компрессоры. Вентиляторы / М.С. Семидуберский. – М.: Высш. шк., 1961.
7. Теоретический расчет производительности лопастных насосов ротационного типа // *Труды Горьк. индустр. ин-та им. Т.К. Жданова.* – Горький, 1966.

Поступила 18.01.2007