

УДК 621.5; 621.65

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВАКУУМ-КОМПРЕССОРА И СТРУЙНОГО АППАРАТА
В СХЕМЕ КОМПРЕССИОННОГО ПАРОЖИДКОСТНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

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

Рассмотрена совместная работа основных узлов парожидкостного компрессионного теплового насоса: вакуум-компрессора и струйного аппарата при их последовательном соединении. Особенностью такой схемы теплового насоса является использование ротационно-пластинчатого вакуум-компрессора и струйного аппарата в качестве теплообменника рекуператора, а рабочим телом является смесь паров воды и воздуха. С помощью специально изготовленного стенда получены ключевые характеристики работы компрессора и струйного аппарата: расход эжектируемого воздуха и развиваемый вакуум. Выявленные зависимости представлены на рисунках в виде графиков, построенных как с учетом содержания водяных паров в рабочей смеси, так и с учетом ее термического расширения. Анализ полученных данных позволяет количественно оценить влияние струйного аппарата на работу компрессора. Установлено, что при определенном вакууме суммарная рабочая характеристика может быть получена путем арифметического сложения характеристик компрессора и струйного аппарата с учетом некоторой погрешности.

Введение. Одним из эффективных мероприятий по экономии топлива и защите окружающей среды является использование тепловых насосных установок (ТНУ), преобразующих низкопотенциальную энергию и тепловые отходы в высокопотенциальную тепловую энергию, пригодную для дальнейшего использования. Однако одним из важнейших факторов, сдерживающих эффективное применение тепловых насосов, является тот факт, что в качестве их рабочих тел применяются токсичные вещества.

Для осуществления процессов в трансформаторах тепла применяют рабочие вещества (агенты), обладающие необходимыми термодинамическими, физико-химическими свойствами. Они могут быть однородными или являться смесью нескольких (обычно двух) веществ. У большинства трансформаторов тепла рабочие вещества подвергаются фазовым превращениям [1, 2]. В настоящее время в трансформаторах тепла наиболее широко применяют различные виды фреонов и аммиак. Однако применение фреонов и аммиака для создания промышленных тепловых насосов не представляется возможным. Фреоны неприемлемы не только из-за известной проблемы парникового эффекта, но и потому, что применение их в качестве рабочих тел для рекуперации промышленных источников низкопотенциального тепла нецелесообразно (дорогостоящая и небезопасная технология). Хорошо растворимый в воде аммиак непригоден потому, что мы предполагаем в качестве испарителя использовать аппарат прямого контактирования (струйный аппарат) [3, 4].

В данной работе в качестве легкодоступного и экологически чистого рабочего тела предлагается использовать смесь воздуха с водяным паром. Данное решение позволит создать тепловой насос, который пригоден для повсеместного и широкого применения как в промышленности, так и в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Однако наиболее узким местом в схеме теплового насоса является выбор необходимого компрессора и струйного аппарата, которые будут соответствовать не только заданным требованиям по производительности и надежности, но и будут работать в одном диапазоне характеристик, что позволит обеспечить их наилучшую совместную работу при последовательном соединении в термокомпрессионном цикле [5, 6]. Кроме того, необходимо иметь представления о том, какой будет суммарная рабочая характеристика выбранного компрессора и струйного аппарата при их последовательном соединении в схеме теплового насоса. Принципиальная схема работы компрессионного теплового насоса для рекуперации низкопотенциального тепла систем отопления, использующих горячую воду от ТЭЦ или котельных, изложена в работах [7, 8]. Особенностью такой схемы теплового насоса является использование ротационно-пластинчатого вакуум-компрессора и струйного аппарата в качестве теплообменника рекуператора, а рабочим телом – смесь паров воды и воздуха.

Стенд для изучения совместной работы вакуум-компрессора и струйного аппарата. Так как в литературных источниках не встречается описание совместной работы вакуум-компрессора и струйного аппарата, для изучения их взаимодействия в лабораторных условиях был создан стенд (рис. 1). Причем схема соединения компрессора и струйного аппарата в стенде соответствует их расположению в схеме теплового насоса. Корпус струйного аппарата 1 представляет собой цилиндрический сосуд диаметром 150 и высотой 650 мм, наполовину заполненный водой. В нижнем днище корпуса струйного аппарата

расположен выходной штуцер, подсоединенный к «приему» центробежного насоса 3. При включенном центробежном насосе вода забирается из нижней части корпуса струйного аппарата и через выкидной трубопровод под давлением $1,5 \text{ кгс/см}^2$ нагнетается в сопло 8. Сопло представляет собой цилиндрическую трубку диаметром 7 мм, свободный выход на конце выполнен в виде сплюснутого эллипса с меньшим диаметром 5 мм и большим диаметром 12 мм. Под давлением вода в виде плоской струи направляется в цилиндрическую шахту смешения 7. Внутренний диаметр шахты равен 14 мм, нижний конец шахты погружен в воду на 10 мм (при «спокойной» поверхности воды) для предотвращения обратного тока паровоздушной смеси. Таким образом, плоская струя воды при истечении из сопла эжектирует воздух и образовавшаяся смесь воздуха и воды, попадая в шахту смешения, заполняет все ее сечение. Количество эжектируемого воздуха струей воды регулируется вентилем 6, а объемный расход воздуха контролируется с помощью трубки Пито 2. Пройдя через шахту, смесь воздуха и воды попадает в слой жидкости, что приводит к ее активному барботированию. Благодаря данному эффекту многократно увеличивается поверхность массо- и теплообмена. Вакуум-компрессор 4 создает вакуум (до $0,15 \dots 0,2 \text{ кгс/см}^2$) в корпусе струйного аппарата 1, повышая тем самым в нем парциальное давление водяных паров. Струйный аппарат в данной схеме работает и как вакуум-компрессор, дополнительно углубляя вакуум в головке смешения 11 на $0,25 \dots 0,1 \text{ кгс/см}^2$. Давление в головке смешения контролируется манометром 9. Таким образом, благодаря активному барботированию и развиваемому вакууму происходит интенсивное испарение жидкости. И образовавшаяся смесь паров воды и воздуха (с содержанием водяных паров до 40 % об.) поступает на «всас» компрессора. Вакуум в корпусе струйного аппарата 1 контролируется манометром 5. Таким образом, за счёт частичного испарения циркулирующая вода в корпусе струйного аппарата охлаждается. Температура воды в корпусе контролируется с помощью термометра 10. Проходя вакуум-насос, рабочая смесь разогревается до $70 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$ как за счёт сжатия, так и за счёт тепла, выделяемого от трения пластин о корпус.

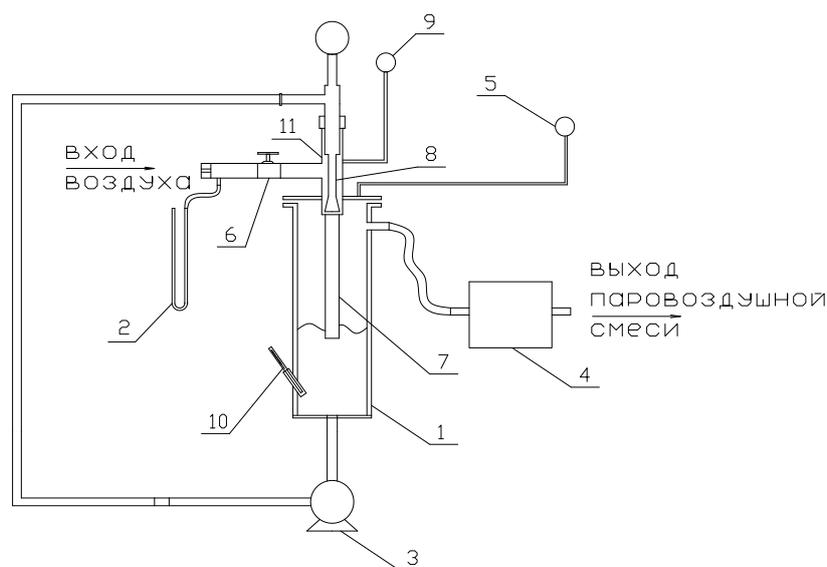


Рис. 1. Стенд для изучения совместной работы компрессора и струйного аппарата

Так как предлагаемая схема теплового насоса основана на фазовых превращениях рабочего тела, то эффективность и КПД такого трансформатора тепла напрямую зависят от содержания паров воды в воздухе. Поэтому необходимо создать условия, повышающие содержания 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.

Проведение экспериментальной части. В ходе проведения эксперимента снимались основные рабочие характеристики стенда. С помощью трубки Пито 2 фиксируем расход воздуха (л/мин), а вакуум в корпусе струйного аппарата 1 (кгс/см^2) и головке смешения 11 (кгс/см^2) отмечаем при помощи вакууметров 5 и 9 соответственно.

Эксперимент проводился в две стадии. В первой части эксперимента работал только вакуум-компрессор. Воздух на «всас» компрессора подается через регулирующий вентиль 6, проходит с наружной стороны сопла 8, попадает в шахту смешения 7 и, преодолевая слой жидкости в 10 мм, попадает в компрессор. Таким образом, изменяя расход воздуха (от 0 до 70 л/мин) с помощью регулирующего вентиля 6 изменяем и вакуум как в корпусе струйного аппарата 1, так и в головке смешения 11 (от 0,7 до 0,3 кгс/см²). Зависимость «расход воздуха – вакуум» в системе показана на рисунках 2 а, б. Во второй части эксперимента дополнительно включался центробежный насос 3. В результате поток жидкости при истечении из сопла 8 дополнительно увлекал некоторое количество воздуха в шахту смешения 7. Расход воздуха и развиваемый вакуум во втором случае также поясняют рисунки 2, а, б. Характеристика работы одного струйного аппарата достаточно подробно описана в статье [8] и иллюстрирована рисунками 2, а и 2, б.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В данной работе были сняты характеристики отдельно работающего вакуум-насоса 2НВР-5ДН мощностью 0,25 кВт (расход/вакуум) и его характеристики при совместной работе со струйным аппаратом в последовательном соединении (рис. 2, а, б).

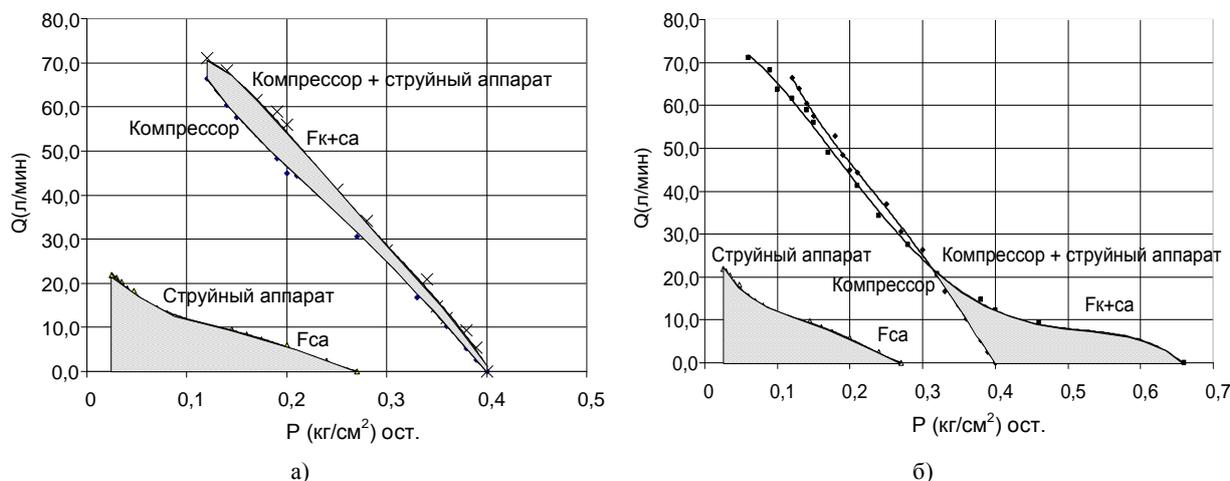


Рис. 2. Совместная работа вакуум-компрессора и струйного аппарата:

а – замер вакуума в корпусе струйного аппарата; б – замер вакуума в головке смешения струйного аппарата

Так как в корпусе компрессора наблюдается термический разогрев паровоздушной смеси как за счет сжатия, так и за счет механического трения пластин о корпус компрессора, его рабочая характеристика строилась с учетом изменения объема вакуумируемой смеси от температуры по формуле:

$$Q_K = \frac{T_1}{T_2} \cdot Q^*, \quad (1)$$

где T_1 – температура смеси после компрессора, К; T_2 – комнатная температура смеси, К; Q^* – объемный расход смеси, замеряемый трубкой Пито, л/мин.

При построении совместной характеристики компрессора и струйного аппарата кроме влияния температуры учитывалось и увеличение содержания водяных паров в смеси в зависимости от вакуума в корпусе струйного аппарата по формуле:

$$Q_{K+ca} = \frac{Q^*}{1 - \frac{P_{в.п.}}{P}} \cdot \frac{T_1}{T_2}, \quad (2)$$

где Q^* – объемный расход смеси, замеряемый трубкой Пито, л/мин; $P_{в.п.}$ – парциальное давление водяных паров в корпусе струйного аппарата, ат; P – абсолютное давление в корпусе струйного аппарата, ат; T_1 – температура смеси после компрессора, К; T_2 – комнатная температура смеси, К.

Из рисунков 2, а, б видно, что при последовательном подключении струйного аппарата к компрессору суммарная рабочая характеристика увеличивается. При контроле вакуума в корпусе струйного аппарата наибольшее влияние на суммарную характеристику оказывается при наибольших расходах эжек-

тируемого воздуха (см. рис. 2, а), а при отсутствии расхода воздуха вакуум в корпусе струйного аппарата 1 не углубляется. Рисунок 2, б, напротив, показывает увеличение вакуума в головке смешения при минимальных расходах эжектируемого воздуха.

Для количественной оценки влияния струйного аппарата на работу вакуум-насоса (см. рис. 2, а) вычислим величину площади ($F_{к+са}$), заключенной между кривыми, характеризующими совместную работу компрессора ($F_к$) и струйного аппарата ($F_{са}$) и работу одного компрессора. Для этого рассмотрим уравнения для кривых, описывающих совместную работу компрессора и струйного аппарата и работу одного компрессора, а площадь между кривыми вычислим как разность интегралов этих уравнений:

$$F_{к+са} = \int_{0,12}^{0,4} (-15865x^4 + 16907x^3 - 6581,3x^2 + 853,13x + 37,002)dx - \int_{0,12}^{0,4} (6641,7x^4 - 8083,9x^3 + 3445,1x^2 - 833,39x + 129,46)dx = 2,27 \text{ ед.}^2. \quad (3)$$

Аналогичным образом вычислим и площадь $F_{са}$, заключенную между кривой, характеризующей работу одного струйного аппарата, и осью абсцисс. Площадь будет иметь значение $F_{са} = 2,26 \text{ ед.}^2$.

Вычислим величину отклонения площадей $F_{к+са}$ и $F_{са}$:

$$\Delta = \frac{F_{к+са} - F_{са}}{F_{к+са}} \cdot 100 \% = 0,21 \%. \quad (4)$$

Для проведения аналогичных вычислений при иных условиях был изготовлен набор пластин, позволяющий изменять параметры работы компрессора в диапазоне вакуума от 0,35 до 0,7 кгс/см² ост. Кроме того, для струйного аппарата было изготовлено сопло № 2, позволяющее изменить характеристику струйного аппарата. Вид характеристики струйного аппарата с соплом № 2 принципиальных отличий от характеристики с соплом № 1 не имеет.

Так, используя три набора рабочих пластин вакуум-компрессора, было проведено три эксперимента по изучению совместной работы компрессора и струйного аппарата с соплом № 1 и три эксперимента работы компрессора и струйного аппарата с соплом № 2.

По описанной выше методике были построены суммарные рабочие характеристики. Используя интегральные исчисления, получены площади $F_{к+са}$ и $F_{са}$, по формуле (4) для всех вариантов работы компрессора и струйного аппарата определены отклонения площадей $F_{к+са}$ и $F_{са}$ (Δ).

Результаты вычислений отображены на рисунках 3, а, б, которые иллюстрируют отклонения площадей, построенных по данным давления в корпусе струйного аппарата и давления в его головке смешения.

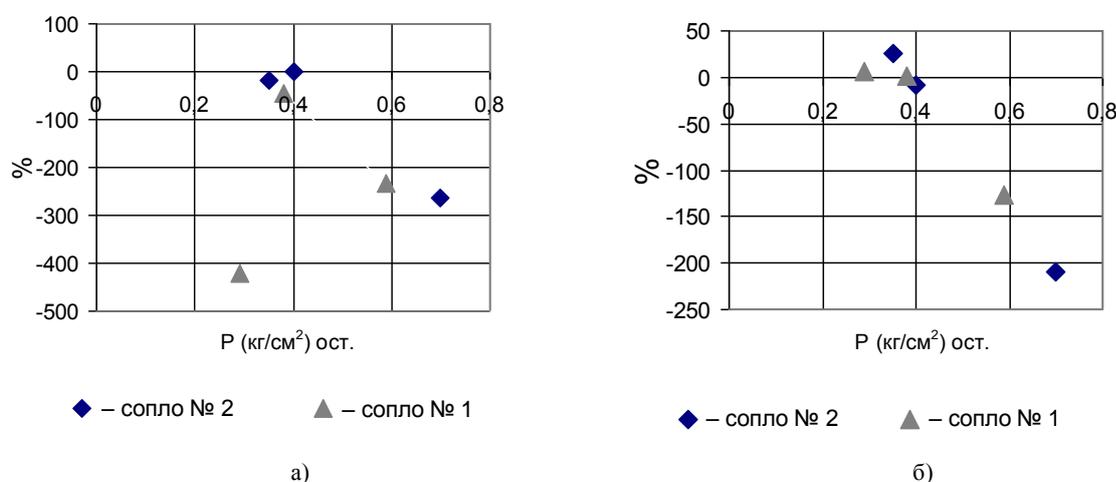


Рис. 3. Величина отклонения площадей $F_{к+са}$ и $F_{са}$:
а – замер вакуума в корпусе струйного аппарата; б – замер вакуума в головке смешения струйного аппарата

Из рисунка 3, а, б видно, что величина отклонения площадей $F_{\kappa+ca}$ и F_{ca} имеет наименьшие значения при вакууме, развиваемом компрессором в пределах от 0,35 до 0,4 кг/см² ост. при совместной работе со струйным аппаратом, использующим как сопло № 1, так и сопло № 2.

На основании расчета площадей, характеризующих работу вакуум-компрессора и струйного аппарата, можно прийти к выводу, что суммарная рабочая характеристика может быть получена при арифметическом сложении их площадей: F_{Σ} и F_{ca} , с учетом некоторой погрешности Δ при определенном вакууме:

$$F_{\Sigma} = F_{\kappa} + F_{ca} (\pm\Delta), \quad (5)$$

где F_{ca} – площадь под кривой, характеризующей работу струйного аппарата; F_{κ} – площадь под кривой, характеризующей работу компрессора; Δ – погрешность; F_{Σ} – площадь под кривой, характеризующей совместную работу компрессора и струйного аппарата.

Заключение. Анализируя данные о совместных характеристиках работы компрессора и струйного аппарата можно прийти к выводу, что их эффективное взаимодействие в последовательном соединении отмечается только при определенных условиях. Так, величина отклонения площадей $F_{\kappa+ca}$ и F_{ca} имеет наименьшее значения (0,21...19 %) при вакууме, достигаемом компрессором в пределах от 0,35 до 0,4 кгс/см² ост. при работе со струйным аппаратом, развивающим вакуум от 0,25 до 0,27 кгс/см² ост.

Используя полученные закономерности по определению суммарной рабочей характеристики работы лабораторного вакуум-компрессора и струйного аппарата, можно эффективно подобрать соответствующий схеме теплового насоса струйный аппарат и оценить производительность теплового насоса, использующего ротационно-пластинчатый вакуум-компрессор мощностью 4 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жидкович, Н.С. Применение тепловых насосов на промышленных предприятиях / Н.С. Жидкович // Энергоэффективность. – 1998. – № 9.
2. Бунин, В.С. Тепловой насос / В.С. Бунин // Большая Рос. энцикл. – М., 2001. – 253 с.
3. Рекуперация низкопотенциального тепла системы оборотного охлаждения с использованием термокомпрессионных циклов / Г.Н. Абаев [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 1998. – № 1. – С. 49 – 52.
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. Компрессорный тепловой насос: пат. № 6345 Рэсп. Беларусь / Г.Н. Абаев, М.А. Брикер, Е.В. Чернявская // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр. інтэлектуал. уласнасці. – 2004.
7. Абаев, Г.Н. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом: смесь паров воды и воздуха / Г.Н. Абаев, И.М. Пискун // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2007. – № 2. – С. – 77 – 81
8. Абаев, Г.Н. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом: смесь паров воды и воздуха / Г.Н. Абаев, И.М. Пискун // Региональная науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов: сб. науч. тр. – Новополоцк: ПГУ, 2007.

Поступила 22.08.2008