

УДК 672.55

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДВКЛЮЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЭЖЕКТОРНЫХ СТУПЕНЕЙ ВАКУУМНОГО АГРЕГАТА*

Левченко Д.А., ассистент,
Арсеньев В.М., к.т.н.,
Мелейчук С.С., к.т.н.,
Ванеев С.М., к.т.н.
Сумский государственный университет
Тел. (0619) 42-04-42

Аннотация – в данной статье представлены экспериментальные характеристики предвключенных воздушных эжекторных ступеней вакуумного агрегата на базе жидкостно-кольцевого вакуум-насоса. Акцентируется внимание на том, что агрегатирование жидкостно-кольцевого насоса прямоструйной или воздушной эжекторной ступенью позволяет повысить продуктивность и снизить удельную мощность агрегата в области низкого давления всасывания в сравнении с одноступенчатыми и двухступенчатыми жидкостно-кольцевыми вакуум-насосами.

Ключевые слова – предвключенные воздушные эжекторные ступени, вакуумный агрегат.

Введение. Жидкостно-кольцевые машины (ЖКМ), в частности, жидкостно-кольцевые вакуум-насосы (ЖКВН), конструктивно просты, надежны в эксплуатации, отличаются низким уровнем шума при работе, относительно низкой стоимостью. Наличие водяного кольца позволяет откачивать газы, содержащие пары, капельную жидкость, твердые инородные включения (пыль), кроме того, процесс сжатия газа происходит с интенсивным теплообменом и близок к изотермическому, что позволяет перекачивать легко разлагающиеся, полимеризующиеся и взрывоопасные газы и смеси. Поэтому ЖКВН находят свое применение в технологических процессах металлургии, обеспечивающих выплавку высокочистых металлов и сплавов; при проведении сварочных операций, что обеспечивает защиту металлов от насыщения их вредными газовыми примесями; различных технологиях переработки пищевых продуктов на основе процессов

© ас. Д. А. Левченко, к.т.н. В. М. Арсеньев, к.т.н. С. С. Мелейчук, к.т.н. С. М. Ванеев

* Печатается в рамках Гранта Президента Украины при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований.

консервирования и сушки, где замена технологий удаления жидкой фазы путем ее нагрева и выпарки на более низкотемпературные процессы в условиях вакуума повышает качество продукции [1].

Для откачки парогазовой смеси при заданных условиях используют одноступенчатые жидкостно-кольцевые машины, которые, как правило, проектируют и изготавливают на давление всасывания 20...30 кПа при оптимальной объемной производительности, что является недостаточным уровнем вакуума для многих из указанных технологических процессов. Достижимый в них вакуум определяется давлением насыщенных паров рабочей жидкости, а также конструктивными особенностями – наличие торцевых зазоров между лопастным колесом и корпусом жидкостно-кольцевой машины, что приводит к перетечкам газа. Если температура воды в жидкостном кольце равна 15°C, то при давлении 1,7 кПа она закипает и производительность ЖКВН падает до нуля [1].

Можно выделить такие основные способы повышения предельного вакуума ЖКВН:

- использование двухступенчатых одновальных ЖКВН;
- последовательное включение одноступенчатых ЖКВН;
- агрегатирование ЖКВН эжектором.

Применение первых двух методов повышения вакуума ведет к увеличению потребляемой мощности, металлоемкости, удельного расхода воды, удельной площади установки и, как следствие, существенному повышению капитальных затрат. Наиболее технологически и экономически выгодным решением является агрегатирование водокольцевого вакуумного насоса с эжектором. В качестве предвключенной ступени для вакуумного агрегата могут быть использованы прямоструйные и вихревые эжекторы. Существующие экспериментальные и теоретические исследования относятся к ЖКВН, у которых предвключенной ступенью являются прямоструйные, одно- и двухступенчатые эжекторы. Такие исследования проводились в КГТУ им. Кирова (КХТИ), НПО «Криогенмаш», СМНПО имени Фрунзе. Последние годы на кафедре ТТФ СумГУ проводились исследования ЖКВН с вихревой эжекторной ступенью (ВЭС), подтвердившие их работоспособность и целесообразность применения. Особенностью подобных агрегатов является то, что активный поток расширяется в каналах подвода активного потока не за счет ранее приобретенного им потенциала статического давления, а посредством перераспределения энергии, подводимой на привод вакуумного насоса.

Благодаря этому, осуществляется более эффективное взаимодействие активного и пассивного потоков, а также исключается появление застойных зон. Таким образом, определение области эффективного применения вихревой эжекторной ступени, по сравнению

с прямоструйной эжекторной ступенью (ПЭС), для вакуумных агрегатов на базе ЖКВН является важной предпосылкой на пути совершенствования ВЭС.

Параметры прямоструйной эжекторной ступени. Эскиз аппарата представлен на рисунке 1. Основные элементы аппарата: рабочее сопло приемная камера, камера смешения, диффузор. Потoki рабочей и инжектируемой сред поступают в камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления.

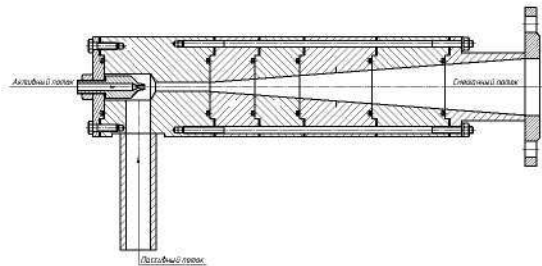


Рис. 1. Эскиз прямоструйного эжектора

Проведены испытания прямоструйного эжектора в качестве ступени сжатия для ВВН-1,5. На рисунке 2 представлен общий вид прямоструйной эжекторной ступени.



Рис. 2. Общий вид прямоструйного воздушного эжектора

Основные расчетные параметры эжекторных ступеней представлены в таблице 1. Расчеты ПЭС и ВЭС производились согласно методик [2] и [3] соответственно.

На рисунках 3,4 приведены расходные характеристики водокольцевого вакуум-насоса ВВН-1,5, а также вакуумного агрегата ВВН-1,5 с ПЭС, работающего на расчетном и нерасчетном режимах соответственно.

Работа агрегата с замкнутым циклом водоснабжения на нерасчетном режиме обусловлена жесткой зависимостью расходной характеристики ЖКВН от температуры воды, поступающей на вход в вакуумный насос.

Так, при повышении средней температуры воды в ЖКВН с расчетных 15°C (при работе ЖКВН в холодное время года) до 25°C (летом) предельный вакуум достигаемый ВВН-1,5 снижается примерно на 3 кПа в результате чего вакуумный агрегат с ПЭС выходит за пределы расчетного режима и его параметры резко падают. Т.к. расходная характеристика вакуумного агрегата с замкнутой системой водоснабжения меняется в зависимости от продолжительности работы и температуры, давления окружающей среды, то более оправдано сравнение ВЭС с характеристикой вакуумного агрегата с ПЭС при температуре воды на линии всасывания $T_w=25^{\circ}\text{C}$, как в наиболее тяжелых условиях работы агрегата.

Из представленных графиков видно, что агрегатирование ЖКВН прямоструйным эжектором увеличивает диапазон производительности вакуумного агрегата при более низком давлении всасывания.

Таблица 1. Расчетные параметры прямоструйного и вихревого эжекторов

Параметр	Условное обозначение	ПЭС	ВЭС
Удельная газовая постоянная	$R, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\times\text{К}}$	287	287
Показатель изэнтропы	k	1,4	1,4
Давление активного потока	$p_a, \text{ата}$	1,02	1,02
Давление пассивного потока	$p_{оп}, \text{ата}$	0,05	0,05
Давление смешанного потока	$p_c, \text{ата}$	0,1	0,1
Отношение давлений активного и пассивного потоков	$\Pi = \frac{p_a}{p_{оп}}$	20	20
Степень повышения давления в эжекторе	$\varepsilon = \frac{p_c}{p_{оп}}$	2	2
Температура активного потока	$T_{OA}, \text{К}$	293	295
Температура пассивного потока	$T_{оп}, \text{К}$	293	295
Температура смешанного потока	$T_c, \text{К}$	293	295
Массовый расход активного потока	$m_a, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	0,0007	0,000465
Массовый расход пассивного потока	$m_{п}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	0,0005	0,00072
Массовый расход смешанного потока	$m_c, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	0,0012	0,0012
Максимальный	U_{\max}	0,656	1,55

коэффициент эжекции			
---------------------	--	--	--

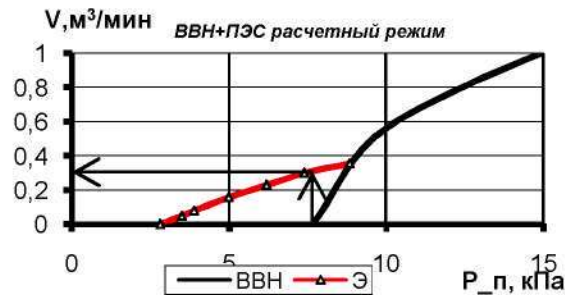


Рис. 3. Характеристика вакуумного агрегата с ПЭС на расчетном режиме работы ВВН-1,5 с температурой воды на линии всасывания $T_w=15^\circ\text{C}$

Однако данный тип эжектора обладает рядом недостатков: работа эжектора при скоростях вызывает необходимость использования для ввода активного потока специально спрофилированного сопла Лаваля, которое при своей работе чувствительно к пульсации давлений и к изменению режима работы; отсутствие возможности полного и эффективного перемешивания активного и пассивного потоков в камере смешения эжектора; имеют место потери на трение по длине в осевом диффузоре, а также сложность в обеспечении безотрывности потока.



Рис. 4. Характеристика вакуумного агрегата с ПЭС на нерасчетном режиме работы ВВН-1,5 с температурой воды на линии всасывания $T_w=25^\circ\text{C}$

Параметры вихревой эжекторной ступени. Проведены исследования вихревой эжекторной ступени (рисунок 5), использование которой позволяет осуществлять регулирование работы ступени на различных режимах и уменьшить массогабаритные показатели, при этом значительно упрощается технология изготовления.

При задаваемой геометрии сопловых каналов, параметры активного и пассивного потоков зависят от массового расхода и давления потока смешения, которые в свою очередь связаны функционально в виде характеристики вакуум-насоса $V_{BC.AГP.} = f(p_{on})$. Из этого следует вывод: все, что влияет на характеристику вакуум-насоса отражается на уровне параметров, описывающих режимные соотношения эжекторной ступени вакуумного агрегата, таких, как коэффициент эжекции и рабочее давление всасывания [3].

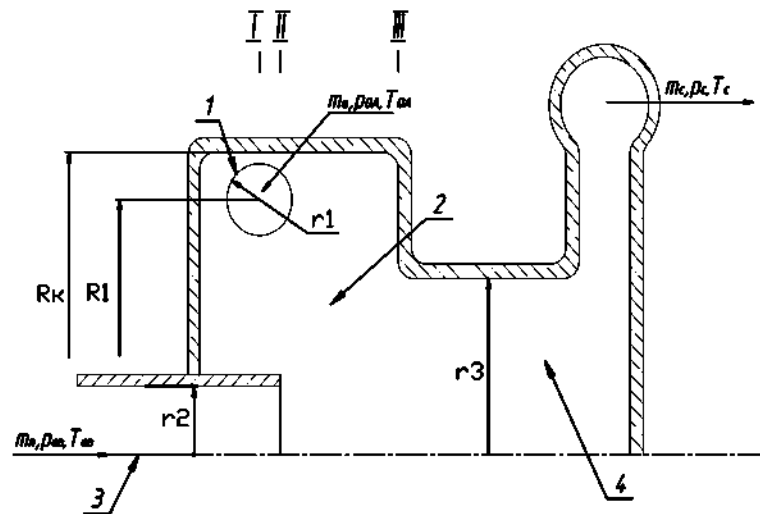


Рис. 5. Схема вихревой эжекторной ступени:

1-тангенциальное сопло; 2- камера смешения; 3- сопло подачи эжектируемого воздуха; 4- радиально-щелевой диффузор;

расчетные сечения: I – выход активного потока; II – выход активного и пассивного потоков в зону смешения; III – вход смешанного потока в подводящий патрубок осерадиального диффузора;

m_n, p_{on}, T_{on} , m_a, p_{OA}, T_{OA} и m_c, p_c, T_c - параметры пассивного, активного и смешанного потоков (массовый расход, абсолютное давление и абсолютная температура) соответственно; R_1 - радиус расположения активного сопла относительно оси эжектора; R_k - радиус вихревой камеры; r_1 - радиус активного сопла;

r_2 - радиус пассивного сопла, r_3 - радиус патрубка радиально-щелевого диффузора.

В связи с этим производились исследования ВЭС с соплами пассивного потока переменной геометрии (рисунок 6). Вариации таких геометрических параметров пассивного сопла, как его длина и наружный диаметр, производились по трем позициям.

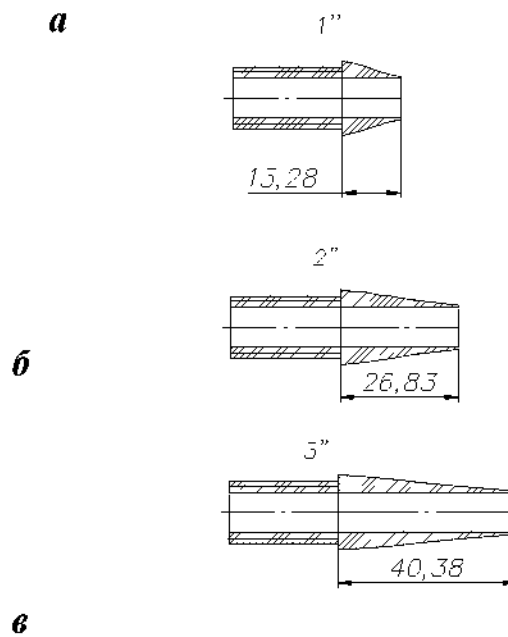


Рис. 6. Общий вид и эскиз исполнения сопел пассивного потока различной геометрии: а – короткое; б – среднее; в – длинное

Режимные характеристики вакуумного агрегата с ВЭС при средней температуре воды на линии всасывания $T_w=28^\circ\text{C}$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Режимные характеристики вакуумного агрегата с ВЭС для длинного сопла пассивного потока с наружным диаметром $D=14,8$ мм

Параметры ВВН						
Р_{см}, кПа	11,1083	11,59863	12,08896	12,5792926	13,0696251	13,265758
У_{см}, м³/мин	0	0,30137	0,507042	0,814285714	0,95539568	1,1130435
Параметры эжектора						
Р_{оп}, кПа	7,675968	8,656633	9,637298	10,6179626	11,59863	12,215
У_п, м³/мин	0	0,041096	0,326761	0,585714286	0,63309353	0,58

Сравнительная оценка вакуумных агрегатов с ПЭС и ВЭС. На рисунке 7 представлены расходные характеристики вакуумного агрегата с ПЭС и ВЭС. По этому графику видно, что прямоструйная эжекторная ступень обеспечивает достижение более низкого давления всасывания пассивного потока по сравнению с ВЭС, но при этом производительность вакуумного агрегата с ПЭС в диапазоне давления всасывания 7-10 кПа гораздо ниже по сравнению с ВЭС. Так при давлении пассивного потока на всасывании 8,7 кПа (выделено на графике) производительность вакуумного агрегата с вихревой эжекторной ступенью на 50% больше, чем с ЖКВН с прямоструйным эжектором.

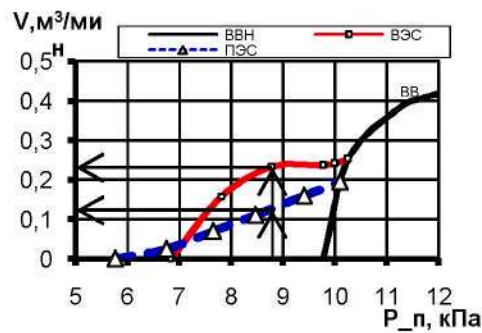


Рис. 7. Характеристики вакуумного агрегата с ПЭС и ВЭС на нерасчетном режиме работы ВВН-1,5 с температурой воды на линии всасывания $T_w=28^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим зависимость потребляемой мощности насоса от создаваемого вакуума. Из графика (рисунок 8) видно, что при равных затратах мощности на привод вакуум-насоса с эжекторной приставкой и без неё, величина достижимого вакуума изменяется на 5-6 кПа.

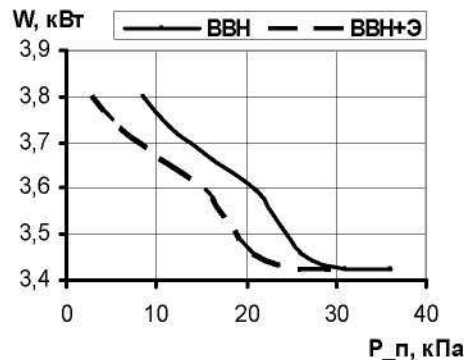


Рис. 8. График зависимости потребляемой мощности вакуумного агрегата от производимого вакуума

Таким образом, агрегатирование эжекторной ступенью позволяет повысить уровень достижимого вакуума ЖКВН без увеличения затрат энергии.

Этот факт можно объяснить более эффективным перераспределением энергии в трактах прямоструйного и вихревого эжекторов, в частности в их диффузорах, по сравнению с неагрегатированной ступенью ЖКВН, у которого на линии всасывания стоит регулировочный вентиль.

Выводы. В результате проведенных исследований и анализа результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

- агрегатирование ЖКВН с ПЭС увеличивает производительность вакуумного агрегата при более высоком вакууме на всасывании для ЖКВН с постоянной режимной характеристикой.

- применение ВЭС для вакуумных агрегатов с замкнутой системой водоснабжения, у которых расходная характеристика не постоянна, более целесообразно, по сравнению с ПЭС.

Литература

1. Райзман И.А. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы и компрессоры / И.А. Райзман. – Казань, 1995. – 258 с.
2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989.-352 с.
3. Арсеньев В.М. Основные положения методики расчета вихревой эжекторной ступени вакуумного агрегата / В.М. Арсеньев, С.С. Мелейчук, Д.А. Левченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – №2(12). – С. 68-72.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДВІВІМКНЕНИХ ПОВІТРЯНИХ ЕЖЕКТОРНИХ СТУПЕНЕЙ ВАКУУМНОГО АГРЕГАТУ

Левченко Д.А., Арсеньев В.М., Мелейчук С.С., Ванеев С.М.

Анотація – у поданій статті представлені експериментальні характеристики передувімкнених повітряних ежекторних ступенів вакуумного агрегату на базі рідинно-кільцевого вакуум-насосу. Акцентується увага на тому, що агрегування рідинно-кільцевого вакуум-насоса прямоструменевим або вихровим ежекторним ступенем дозволяє підвищити продуктивність і знизити питому потужність агрегату в області низького тиску всмоктування у порівнянні з одноступінчатими та двоступінчатими рідинно-кільцевими вакуум-насосами.

EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF PRIMARY AIR EJECTOR LEVELS OF VACUUM AGGREGATE

D. Levchenko, V. Arsenyev, S. Melejchuk, S. Vaneev

Summary

In submitted article experimental characteristics preincluded air ejectors stages of the vacuum unit on the basis of the water-ring vacuum pump are presented. The attention that arrangement the water-ring vacuum pump with straightstream or vortical ejector's stages allows to raise productivity is focused and to lower specific capacity of the unit in the field of low pressure on the soaking up line in comparison with one-stage and two-level water-ring vacuum pumps.