

По таблицам газодинамических функций по численным значениям λ_v , λ_n , λ_{cm} определяются $q(\lambda_v)$, $q(\lambda_{cm})$, $q(\lambda_n)$. Таким образом найдены все величины, позволяющие определить $\mathcal{K}_{КС}$ по уравнению (9).

Сравнение результатов расчетов, проведенных по предлагаемой методике, с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение; расхождение опытных и расчетных данных не превышает 8%.

Л и т е р а т у р а

1. Метенин В.И., Черепанов В.Б., Самойлов В.В. Принцип работы и характеристики противоточного вихревого эжектора. - В кн.: Повышение эффективности холодильных машин. - Межвуз. сб. науч. трудов. - Л., 1982, с. 5.

2. Метенин В.И., Бобров В.В., Черепанов В.Б. Применение вихревых эжекторов в схемах охлаждения. - В кн.: Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. Одесса, 1981, вып. I(39).

3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - М.: Наука, 1969. - 825 с.

УДК 621.694.2

А. В. И л ь и н

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ СЖАТИЯ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

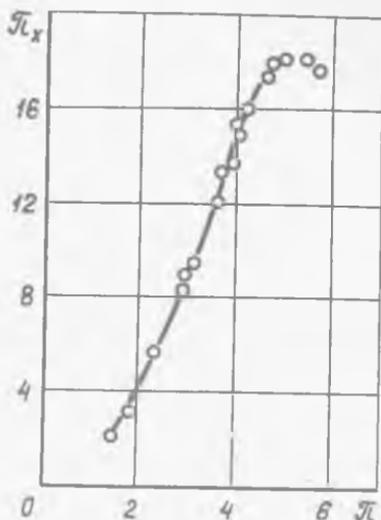
Настоящее исследование проведено с целью создания работоспособной конструкции вихревого эжектора (ВЭ) для сжатия низкопотенциальных водяных паров.

Экспериментальный стенд и инструменты исследования описаны в работах [1, 2].

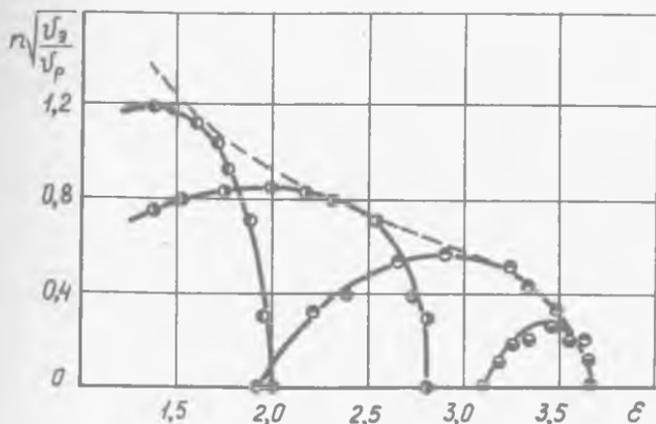
Для выявления оптимальных по степени сжатия \mathcal{E} и коэффициенту эжекции \mathcal{K} геометрических соотношений \bar{f}_p , $\bar{\Delta}$, \bar{a}_x применено планирование многофакторных экспериментов. Получено аналитическое выражение этих зависимостей и на их базе разработана инженерная методика расчета ВЭ для сжатия водяных паров [2].

Максимальная степень сжатия достигается при $\bar{f}_p = 0,095$, $\bar{\Delta} = 0,103$ и $\bar{a}_x = 0,6$. Исходя из однофакторных экспериментов, получены оптимальные значения $\bar{L} = 1,0$; $\mathcal{E} = 1,0$, а для оптимальной геометрии найдены зависимости $\mathcal{K}_x = f(\mathcal{K})$ (рис. 1).

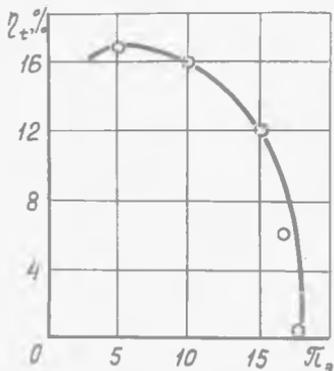
Для исследования возможностей ВЭ по эжектированию тех или иных количеств пара низкого потенциала при переменных давлениях на нагнетании проведены эксперименты по построению безразмерной рабочей характеристики $n\sqrt{U_2/U_p} = f(\varepsilon; \pi_2)$ для оптимальной геометрии ВЭ. Результаты представлены на рис. 2. Характер кривых при малых $\pi_2 < 15$ свидетельствует о возникновении предельных режимов течения в сопле эжектируемого пара, когда коэффициент эжекции практически не зависит ($\pi_2 = 10$) от степени сжатия в диапазоне $1,5 < \varepsilon < 2,3$. Очевидно, режим с критическим расходом эжектируемого пара при максимальной степени сжатия является наиболее экономичным. Геометрическое место точек, соответствующих максимальным значениям коэффициентов эжекции



Р и с. 1. Предельные возможности вихря в ВЭ оптимальной геометрии



Р и с. 2. Рабочая характеристика ВЭ: \circ - $\pi_2 = 5,0$; \bullet - $\pi_2 = 10,0$; \circ - $\pi_2 = 15,0$; \bullet - $\pi_2 = 17,5$

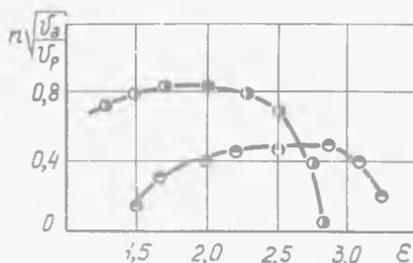


Р и с. 3. Адиабатный к.п.д.

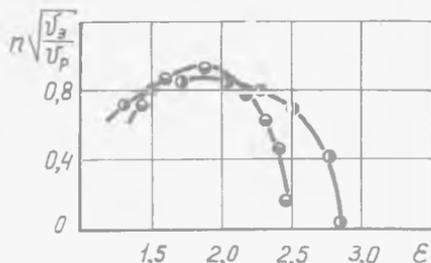
экономичен на расчетных режимах работы, однако имеет крутую рабочую характеристику (рис. 5) [5].

Сопоставление рабочих характеристик ВЭ и струйного эжектора (по данным [6] рис. 10-17, с. 439) при отношении давлений $\pi_2 = 12,5$ приведено на рис. 6 и показывает, что ВЭ более устойчив на переменных режимах и значительно экономичней струйного эжектора. Однако при больших степенях сжатия коэффициенты эжекции ВЭ резко снижаются и уступают характеристикам струйного аппарата.

С целью исследования физических основ процессов, происходящих в вихревой камере, было проведено газодинамическое зондирование паровых потоков на режиме $n = 0$.



Р и с. 4. Рабочие характеристики: ● - ВЭ с камерой завихрения, ○ - ВЭ описанной конструкции

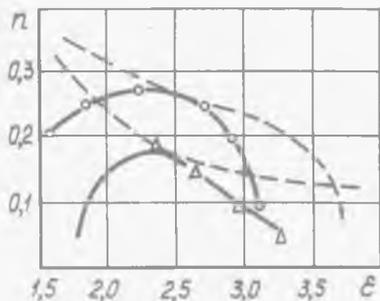


Р и с. 5. Рабочие характеристики: ● - ВЭ с профилированным диффузором, ○ - ВЭ описанной конструкции

при различных отношениях π_2 , дает характеристику ВЭ при качественном регулировании с помощью дросселирования рабочего пара (пунктир).

Экономичность ВЭ оценена с помощью адиабатного к.п.д. (рис. 3).

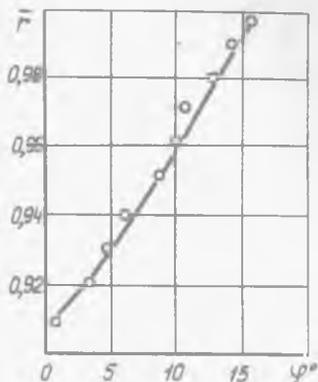
На экспериментальном стенде были проведены эксперименты по сопоставлению рабочих характеристик описанной конструкции ВЭ и ВЭ с камерой завихрения [3] и с профилированным изогradientным раскруточным диффузором [4]. Первый имеет большую степень сжатия при низких значениях коэффициента эжекции (рис. 4). Его предлагается использовать для вакуумирования замкнутых объемов. Второй более



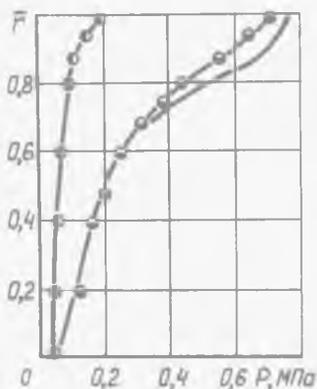
Р и с. 6. Рабочие характеристики: \circ - ВЭ, Δ - струйный эжектор

В сопловом сечении вихревой камеры измерены направления вектора полной скорости в меридиональном сечении (рис. 7). Начиная с радиуса разделения r_2 и до оси ВЭ $\varphi = 0$, т.е. осевая составляющая скорости отсутствует.

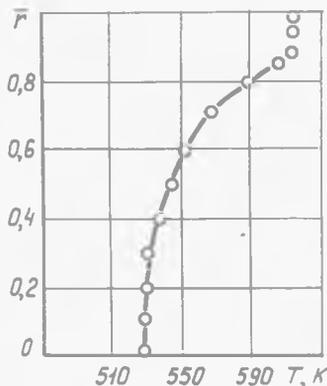
Результаты измерений статического и полного давлений и температуры торможения приведены на рис. 8, 9.



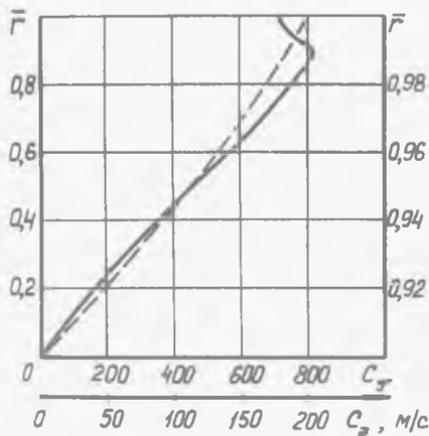
Р и с. 7. Направление вектора полной скорости в меридиональном сечении



Р и с. 8. Эпюры статического и полного давлений: $\circ - P = f(\bar{r})$, $\bullet - P^* = f(\bar{r})$



Р и с. 9. Распределение температуры торможения в сопловом сечении



Р и с. 10. Эпюры скоростей в сопловом сечении: $C_z = f(\bar{r})$,
 ---- $C_z = f(\bar{r})$

по длине вихревой камеры. Распределения давлений качественно не отличаются от приведенного на рис. 8. Все кривые пересекаются на радиусе разделения, что подтверждает отсутствие осевых перемещений в вихревой камере на радиусе разделения. Незначительное увеличение статического давления на оси вихревой камеры при движении к диффузору подсказало возможность дополнительного ввода эжектируемого пара в присоевную область с другого торца вихревой камеры — со стороны диска раскруточного диффузора.

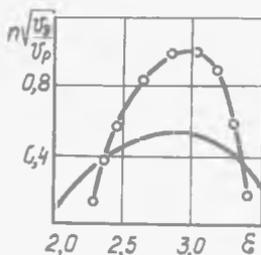
На рис. 11 представлена рабочая характеристика ВЭ с двумя вводами эжектируемого пара при $\mathcal{K}_2 = 15$. Для сравнения приведена аналогичная характеристика с рис. 4. Коэффициент эжекции на оптимальном режиме увеличился на 85% и составил на степени сжатия $\epsilon = 3,0$ — $\eta = 0,307$ вместо $0,167$. При этом к.п.д. возрос с 12 до 22%.

На рис. 12 представлены распределения параметров паровых потоков на режиме $\eta = 0$ в „iS”- диаграмме состояний водяного пара. Уменьшение энтальпии пара от точки 0 до точки I вызвано совершением им работы и частично восполняется за счет теплообмена. Если потери на

Эпюра осевой составляющей скорости с погрешностью 5% описывается уравнением $C_z / \Psi = \text{const}$ (см. пунктир на рис. 10).

Эпюра C_z с погрешностью 7% описывается зависимостью $C_z \bar{r} = \text{const}$ для $\bar{r} > \bar{r}_2$. В вынужденном вихре эпюра C_z хорошо согласуется с распределением $C_z / \bar{r} = \text{const}$. В широком диапазоне изменения внешних параметров качественная картина течений в вихревой камере не изменяется.

Датчиком статического давления проведено зондирование по радиусу в нескольких сечениях



Р и с. 11. Рабочая характеристика ВЭ с двумя вводами эжектируемого пара

где коэффициент адиабаты, входящий в комплекс K для пара, определяется по формуле

$$K = -\frac{\gamma}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \nu} \right)_s.$$

Используя полученное экспериментально распределение осевой составляющей скорости в свободном вихре, получаем

$$C_{z1} = \frac{\bar{v}_k}{(1-\bar{r}_2)^2} \int_{\bar{r}} K \sqrt{\rho_0 / \nu \rho}.$$

где \bar{v}_k - средний по свободному вихрю удельный объем пара.

Принимая допущения Эйлера, получаем дифференциальное уравнение движения одномерного потока в сопловом сечении вихревой камеры:

$$\nu d\rho = (c_z^2 / \bar{r}) d\bar{r}.$$

Используя условие постоянства циркуляции, в предположении изоэнтропийного расширения $\nu d\rho = d\bar{i}$, после интегрирования получаем распределение энтальпии пара в свободном вихре:

$$\bar{i} = \bar{i}_s - \frac{C_z^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{r}_2} - 1 \right).$$

Полученная зависимость хорошо согласуется с экспериментом.

Используя условие постоянства угловой скорости в вынужденном вихре и интегрируя в предположении изоэнтропного сжатия от давления на оси ρ_{oc} до давления на радиусе разделения ρ_2 , получаем распределение энтальпии в свободном вихре:

$$\bar{i} = \bar{i}_{oc} + \frac{C_z^2}{2} \frac{\bar{r}^2}{\bar{r}_2^2}.$$

В условиях эксперимента теплоперепад, затрачиваемый на сжатие в вынужденном вихре, согласно этому распределению составляет 302,5 кДж/кг, что соответствует $\rho_{oc} = 30$ кПа и $T_{oc} = 345$ К при степени сухости пара 0,95. Согласно экспериментальному распределению параметров эти величины составляют соответственно 70 кПа и 533 К. Столь значительное расхождение указывает на неадиабатное распределение параметров в вынужденном вихре.

На рис. 12 точка 2 соответствует состоянию пара на стенке вихревой камеры, точка 3 - на радиусе разделения вихрей, точка 4 - на оси вихревой камеры, точка 5 - на входе в раскруточный диффузор, точка 6 - на выходе из диффузора.

В результате проведенных исследований были разработаны конструкции ВЭ для утилизации низкопотенциальных паров на предприятиях пищевой промышленности и выполнено их внедрение в производство.

Л и т е р а т у р а

1. Ильин А.В. Исследование вихревого эжектора для сжатия водяных паров с целью их утилизации в теплоиспользующем оборудовании промышленных предприятий. - Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук.-Куйбышев, 1982. - 128 с.
2. Меркулов А.П., Волов В.Т., Ильин А.В. Оптимизация геометрических характеристик вихревого эжектора для сжатия водяных паров. - Куйбышев, 1981. - 16 с. - Рукопись представлена КуАИ им.С.П.Королева. Деп. ВИНТИ 6 авг. 1981, № 3940-81.
3. Епифанова В.И., Ивакин О.А., Шадрин В.Ю. Аналитическая методика расчета вихревых устройств. - В кн.: Криогенная техника и кондиционирование: Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1980, № 318, с. 106-116.
4. Волов В.Т. Влияние диффузоров на энергетические характеристики самовакуумирующейся вихревой трубы. - В кн.: Вихревой эффект и его промышленное применение. Труды Ш Всесоюзной научно-технической конференции. Куйбышев: КуАИ, 1981, с. 92-95.
5. Меркулов А.П., Волов В.Т., Ильин А.В. Экспериментальное сравнение вариантов геометрии вихревого эжектора. - Куйбышев, 1981. - 13 с. Рукопись представлена КуАИ им. С.П.Королева. Деп. ВИНТИ 6 авг. 1981, № 3941-81.
6. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. - М.: Энергия, 3-е изд. перераб., 1974. - 592 с.

УДК 621.694

Н.Д.Колышев, В.Е.Виликин

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕЛ В САМОВАКУУМИРУЮЩЕЙСЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Основное преимущество самовакуумирующейся вихревой трубы (СВТ) перед другими типами ВТ заключается в ее способности создавать пониженные давления и высокие эффекты охлаждения в присоединенной области вихревой зоны.

Результаты проведенных исследований показывают, что несмотря на высокую плотность теплового потока на поверхности цилиндра, охлаждаемого в СВТ (до $30 \cdot 10^4$ Вт/м²), рассеиваемая им мощность довольно ограничена ввиду малой величины теплоотдающей поверхности.

Увеличение боковой поверхности охлаждаемого цилиндра за счет его длины или диаметра не позволяет увеличить холодопроизводительность СВТ, так как при росте относительного диаметра d цилиндра повышается температура оmyвающих его слоев вихря и уменьшается температурный на-