

УДК 621.51

## Способы регулирования вихревых турбокомпрессоров

Сергеев В.Н., к.т.н., доцент  
 Белотелова Л.Н., ассистент  
 Герц А.В., студент  
 МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Аннотация.** В работе описаны новые способы регулирования вихревых турбокомпрессоров, основанные на оригинальных конструктивных решениях и позволяющие повысить экономичность регулирования и расширить его диапазон.

**Ключевые слова:** регулирование, вихревая ступень, заслонка, отсекатель, рабочий канал.

## Vortex turbochargers's methods of regulation

V.N. Sergeev, L.N. Belotelova, A.V. Gerts

**Abstract.** The paper describes new vortex turbochargers's methods of regulation based on original design solutions and allowing to improve the economy of regulation and to expand this range.

**Keywords:** regulation, vortex stage, shutter, cut-off, working channel.

Вихревые турбокомпрессоры (ВТК) относятся к машинам динамического действия (МДД) и отличаются специфической кинематикой потока в проточной части ступени, определяющей особые рабочие характеристики ВТК. Регулирование ВТК, то есть изменение рабочих параметров возможно как способами традиционными для МДД, так и способами, применимыми только для ВТК. К традиционным способам относятся изменение характеристик сети или характеристик машины. Изменение характеристик машины для МДД всех типов (центробежных, осевых, вихревых) возможно, например, путем дросселирования на всасывании, изменением числа оборотов ротора, отключением части ступеней или переключением их с параллельной работы на последовательную (ступенчатое регулирование) [1]. Все эти способы отличаются друг от друга конструктивно и различной экономичностью.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны ряд оригинальных конструкций ВТК, позволяющих использовать нетрадиционные способы автоматического регулирования, применимые только для вихревых ступеней и позволяющие повысить экономичность регулирования в широком диапазоне параметров. Это стало возможным благодаря ряду особенностей вихревых машин, в частности наличию окружного градиента давления в рабочем канале и отсутствию помпажных явлений, то есть устойчивой работе во всем диапазоне изменения производительности. Так, в работе [2] описана вихревая ступень, в зоне нагнетательного окна которой со стороны входных кромок лопаток установлена заслонка, препятствующая входу газа на лопатки рабочего колеса. Показано, что оптимизация углового размера заслонки позволяет добиться существенного повышения КПД вихревой ступени. При этом коэффициент удельной работы (напора) практически не изменяется. Увеличение углового размера заслонки приводит к уменьшению создаваемого ступенью перепада давлений при одновременном уменьшении затрачиваемой мощности. То есть изменением углового размера заслонки можно регулировать ступень ВТК по создаваемому перепаду давлений.

Конструктивно возможно выполнение заслонки таким образом, чтобы её угловой размер менялся автоматически

во время работы ступени в зависимости от управляющего сигнала, и, тем самым, осуществлять автоматическое регулирование. На рис.1 схематично представлены продольный (А-А) и поперечный разрезы вихревой ступени с периферийно-боковым каналом и серповидными лопатками на торцах рабочего колеса.

Рабочее колесо 1 вращается в корпусе 2 с малыми торцевыми зазорами. В корпусе 2 выполнен охватывающий колесо 1 рабочий канал 3, разделенный отсекателем 4. Газ входит в рабочий канал 3 через окно 5 всасывания и выходит из канала 3 через окно 6 нагнетания. В зоне окна 6 нагнетания со стороны входных кромок лопаток установлена заслонка 7, препятствующая входу газа на лопатки рабочего колеса 1. Заслонка 7 выполнена в виде упругой стальной ленты, намотанной на барабан 8. Свободный конец ленты размещен в дугообразном пазу 9, выполненном на торце корпуса 2. При повороте барабана 8 в ту или иную сторону свободный конец ленты перемещается по пазу 9, изменяя угловой размер  $\theta_{засл}$  и влияя, тем самым, на создаваемый ступенью напор. Конструкция позволяет автоматизировать процесс регулирования. На рис.2 показано изменение характеристик вихревой ступени при изменении углового размера  $\theta_{засл}$  заслонки 7.

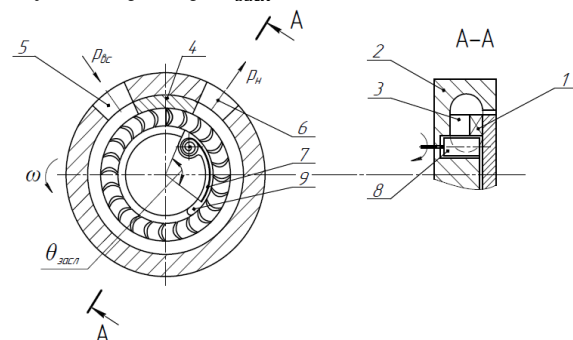
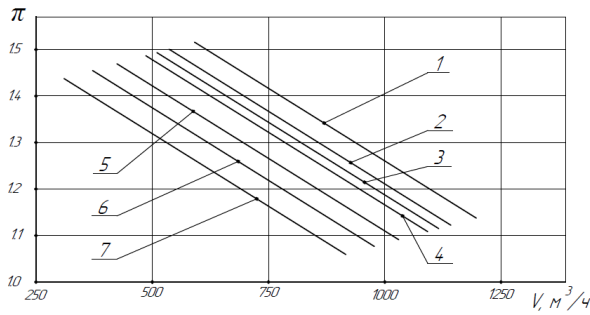
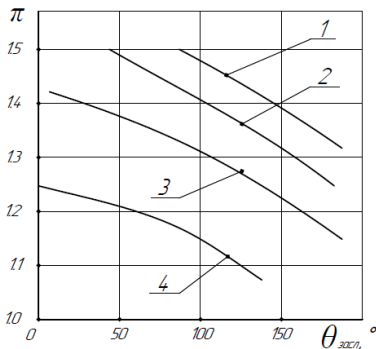


Рис.1. Конструктивная схема продольного (А-А) и поперечного разреза вихревой ступени с периферийно-боковым каналом и серповидными лопатками на торцах рабочего колеса.

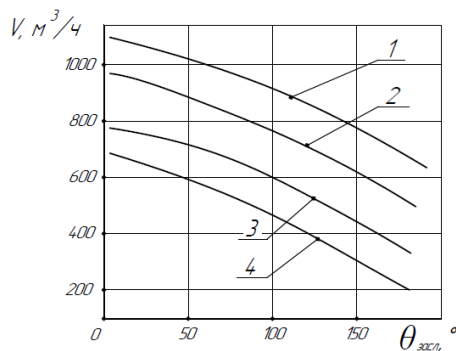


**Рис.2. Зависимость степени повышения давления  $\pi$  вихревой ступени от расхода газа  $V$  при различных значениях углового размера  $\theta_{\text{засл}}$  заслонки 7. Позиции на графике: 1)  $\theta_{\text{засл}} = 0^\circ$ ; 2)  $\theta_{\text{засл}} = 50^\circ$ ; 3)  $\theta_{\text{засл}} = 75^\circ$ ; 4)  $\theta_{\text{засл}} = 90^\circ$ ; 5)  $\theta_{\text{засл}} = 125^\circ$ ; 6)  $\theta_{\text{засл}} = 150^\circ$ ; 7)  $\theta_{\text{засл}} = 180^\circ$ .**

На рис.3 и рис.4 показаны характеристики ступени при сохранении постоянным расхода  $V = \text{const}$  и постоянным перепада давления  $\Delta P = \text{const}$  в зависимости от углового размера  $\theta_{\text{засл}} = \text{var}$ . Применение описанного способа регулирования обеспечивается наличием окружного градиента давления в рабочем канале, что позволяет исключить непроизводительные затраты мощности привода ступени ВТК. Отсутствие помпажных явлений в ступени ВТК позволяет регулировать производительность в достаточно широком диапазоне.



**Рис.3. Изменение степени повышения давления нагнетателя  $\pi$  в зависимости от значения углового размера заслонки  $\theta_{\text{засл}}$  при постоянных значениях расхода нагнетателя  $V = \text{const}$ . Позиции на графике: 1)  $V_1 = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 2)  $V_2 = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 3)  $V_3 = 750 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4)  $V_4 = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .**



**Рис.4. Зависимость расхода нагнетателя  $V_4$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) от значения углового размера заслонки  $\theta_{\text{засл}}$  при постоянных значениях степени повышения давления нагнетателя  $\pi = \text{const}$ . Позиции на графике: 1)  $\pi_1 = 1.2$ ; 2)  $\pi_2 = 1.3$ ; 3)  $\pi_3 = 1.4$ ; 4)  $\pi_4 = 1.5$ .**

В практике использования ВТК часто встречаются задачи регулирования производительности в очень широком диапазоне – от 0 до 100%. При таком регулировании трудно обеспечить высокий КПД машины во всём диапазоне. Для вихревых машин оптимальный с точки зрения КПД диапазон обычно находится в пределах от 0,3 до 0,5 по коэффициенту расхода. Одним из решений задачи увеличения глубины регулирования ВТК может служить использование многоканальной схемы проточной части с периферийным каналом [3]. Эта схема удобна тем, что используя ряд параллельно работающих одинаковых каналов можно осуществлять ступенчатое автоматическое регулирование производительности путём подключения или отключения отдельных каналов. При этом каждый из каналов работает с примерно постоянным напором в режиме максимального КПД, а производительность машины меняется соответственно числу подключённых каналов. Схема многоканальной ступени с периферийными каналами представлена на рис.5.

Цилиндрический ротор 1 содержит несколько одинаковых лопаточных венцов 2 и размещён внутри цилиндрического корпуса 3 с малым радиальным зазором. На обращённой к ротору 1 поверхности корпуса 3 выполнены кольцевые соосные ротору 1 рабочие каналы 4, каждый соответственно своему лопаточному венцу 2. Кроме ротора 1 в корпусе 3 размещён подвижный в осевом направлении плоский золотник 5 с окнами 6, соединяющими каналы 4 с коллекторными патрубками 7 всасывания и 8 нагнетания. На обращенной к ротору 1 поверхности золотника 5 выполнены соосные с ротором 1 дугообразные каналы 9, по своей геометрии совпадающие с рабочими каналами 4. В осевом направлении машины лопаточные венцы ротора 1, рабочие каналы 4 корпуса 3, окна 6 и дугообразные каналы 9 золотника 5 размещены с одинаковым шагом «1». При работе машины со 100%-ной производительностью золотник 5 находится в крайнем правом положении, когда все каналы 4 корпуса 3 соединены через окна 6 с соответствующими патрубками 7 и 8. При этом золотник 5 выполняет роль отсекающего, разделяющего зоны всасывания и нагнетания канала 4. При перемещении золотника 5 справа налево на один шаг «1» в положение, показанное на рис.5 задействованы только три канала 4 из четырёх, то есть обеспечивается 75% производительности. Рабочий канал 4, в котором вместо отсекающего окажется дугообразный канал 9 (см. разрез Б-Б рис.5), фактически отключается.

При движении золотника 5 справа налево начнут последовательно отключаться соответствующие каналы 4, так как в канале, в котором отсутствует отсекающий канал, будет отсутствовать и градиент давления, а значит и основные затраты мощности. По мере последовательного отключения каналов 4 производительность машины будет снижаться кратно числу каналов. Глубина регулирования производительности в такой машине будет зависеть только от числа рабочих каналов 4. Например, при десяти каналах глубина регулирования составит более 90%. Регулирование может осуществляться автоматически, если перемещение золотника 5 связать с регулируемым параметром. Кроме названных, к преимуществам многоканальной схемы с периферийным каналом следует отнести конструктивную и технологическую простоту.

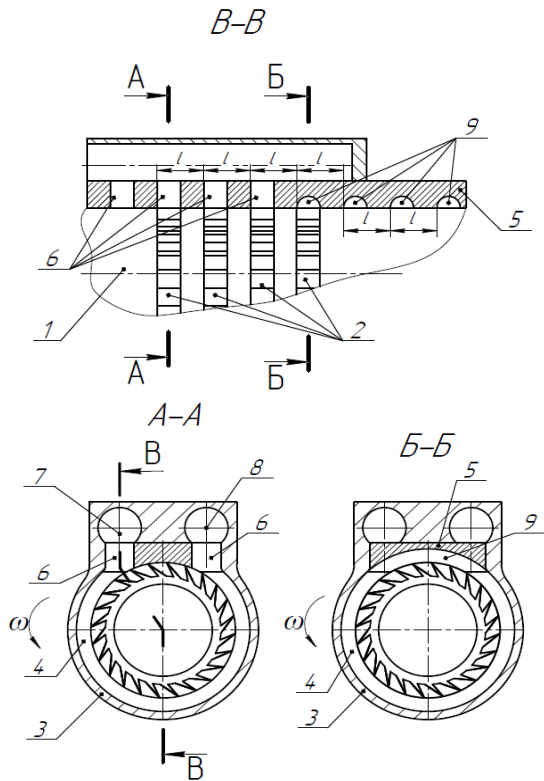


Рис.5. Схема продольного (В-В) и поперечного (А-А, Б-Б) разрезов многоканальной вихревой ступени с периферийными каналами и 75% производительностью.

На рис. 6 показано изменение характеристик вихревой ступени при изменении числа каналов в абсолютных параметрах.

На рис. 7 представлена характеристика той же многоканальной ступени при переменном числе каналов в относительных параметрах. Кроме названных, к преимуществам многоканальной схемы с периферийным каналом следует отнести конструктивную и технологическую простоту.

#### Литература:

1. Чистяков Ф.М., Игнатенко В.В., Романенко Н.Т. и др. Центробежные компрессорные машины.- М.: Машиностроение, 1969.
2. Экспериментальное исследование вихревой ступени с кольцевой заслонкой в зоне нагнетания / Л.Н. Белотелова, П.А. Волошин, С.А. Оськин и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012, - С 41 – 44.
3. Хмара В.Н. Теория и расчет вихревых вакуумных компрессоров: учеб. Пособие по курсу «Динамические машины» /под ред. П.И. Пластинина – М.: МВТУ, 1988. – 44 с.

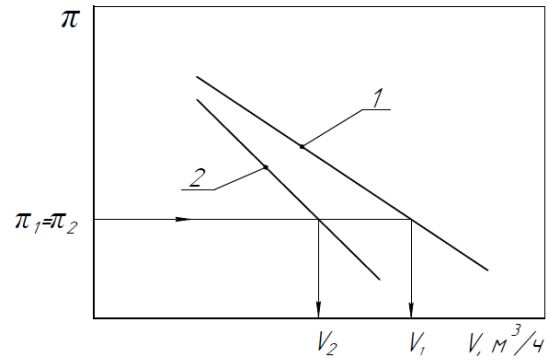


Рис. 6. Характер изменения зависимости степени повышения давления  $\pi$  от расхода вихревой многоканальной ступени с периферийным каналом при изменении числа параллельно работающих каналов  $i = var$  для значения  $\pi_1 = \pi_2$ . Позиции на графике: 1)  $i_1 = i_{ном}$ ,  $V_1 = V_{ном}$ ; 2)  $i_1 = \frac{i_{ном}}{K}$ ,  $V_2 = \frac{V_{ном}}{K}$ .

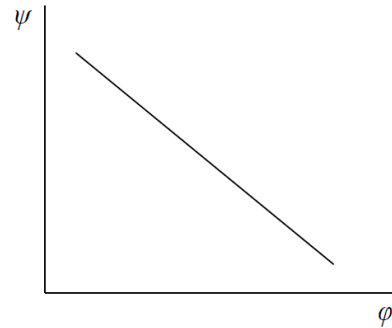


Рис. 7. Характер изменения зависимости коэффициента напора  $\psi$  от коэффициента расхода  $\phi$  вихревой многоканальной ступени с периферийными каналами при переменном числе работающих каналов  $i = var$ .

**Вывод.** Представленные способы регулирования обладают новизной, применимы только для ВТК и позволяют изменять величину производительности и перепада давления вихревой ступени в том числе автоматически в широком диапазоне без дополнительных затрат мощности.