

Ю.М. Вертепов, к.т.н., доцент (Сумский государственный университет) г. Сумы, Украина

Профилирование всасывающего окна жидкостно-кольцевой машины

Рассмотрено влияние очертаний внешней кромки всасывающего окна на объемные характеристики жидкостно-кольцевой машины, а также приведены расчетные зависимости для ее оптимального профилирования.

Ключевые слова: окно всасывания, скорость, зазоры, площадь, угловой размер, радиус, ячейка.

Розглянуто вплив форми зовнішньої кромки всмоктувального вікна на об'ємні характеристики рідинно-кільцевої машини, а також приведені розрахункові співвідношення для її оптимального профілювання.

Ключові слова: вікно всмоктування, швидкість, зазори, площа, кутовий розмір, радіус, колірка.

The influence of suction port outer edge on volumetric characteristics of liquid-ring machine is considered in the article. Rated alignments for it's optimal profiling are given as well.

Keywords: suction port, velocity, clearances, area, angle size, radius, cell.

Жидкостно-кольцевая машина относится к объемным машинам с внутренним сжатием и принудительным осевым газораспределением через окна, поэтому конфигурация окон во многом определяет ее характеристики. Объемная характеристика зависит от правильной организации процесса всасывания, для которого большое значение имеет форма всасывающего окна. С увеличением отношения давлений нагнетания и всасывания коэффициент подачи машины быстро снижается. Объемный коэффициент и коэффициент дросселирования на коэффициент подачи влияют незначительно из-за малых значений депрессий на всасывании и нагнетании в связи отсутствием клапанов. Коэффициент подогрева достаточно велик из-за интенсивного отвода теплоты сжатия из рабочих ячеек в жидкостное кольцо. Наиболее заметно с возрастанием отношения давлений снижается коэффициент плотности, связанный, в основном, с перетечками сжимаемого газа через торцовые зазоры со стороны нагнетания на сторону всасывания. На их величину влияют не только величина зазоров и разность давлений нагнетания и всасывания, но и размеры окон машины, с которыми связана площадь перетечек. Для уменьшения этих перетечек в торцовые зазоры подается рабочая жидкость, либо торцы рабочего колеса частично закрывают дисками, концентричными его втулке, либо на торцовых поверхностях втулки колеса и его лопаток выполняется канавки в качестве лабиринтных уплотнений на пути перетечек [1].

В жидкостно-кольцевой машине наибольшие угловые и радиальные размеры имеет всасывающее окно, при этом его площадь значительно больше, чем у нагнетательного окна. При проектировании жидкостно-кольцевых машин принимается, что наружная кромка всасывающего окна повторяет очертания внутренней поверхности жидкостного кольца на участке всасывания [2-4]. Согласно методике Румянцева В.А. [2], для участка всасывания радиус внутренней поверхности

жидкостного кольца, отсчитываемый от оси вращения колеса, равен

$$r_x = r_2 \sqrt{\frac{2\Psi\xi}{\mu} \left(\frac{R-\Delta}{r_2} \right) - C + v^2}, \text{ м} \quad (1)$$

где r_2 – наружный радиус колеса, м; $v = \frac{r_{1cp}}{r_2}$ – втулочное

отношение колеса; r_{1cp} – средний радиус втулки колеса, м; Δ – минимальный зазор между внутренней стенкой цилиндра и наружной поверхностью колеса, м;

e – эксцентриситет машины, м; $\bar{e} = \frac{e}{r_2}$ – относитель-

ный эксцентриситет; $R=(e+r_2+\Delta)$ – радиус внутренней стенки цилиндра, м; Ψ – коэффициент, учитывающий влияние формы колеса на создаваемый машинной напор; ξ – коэффициент, зависящий от величины торцовых зазоров и осевой ширины колеса; μ – коэффициент загромождения рабочей полости лопатки колеса; $C = \sqrt{1 + \bar{e}^2 + 2\bar{e}\cos\varphi}$ – безразмерный коэффициент; φ – угол поворота колеса, отсчитываемый в направлении его вращения от сечения с наименьшим зазором между колесом и внутренней стенкой цилиндра, град.

Если обозначить угол открытия всасывающего окна через $\varphi_{от}$, а угол его закрытия через $\varphi_{м}$, то с увеличением угла φ величина r_x и площадь окна увеличиваются и достигают наибольших значений при $\varphi = 180^\circ$ (рис. 1).

Зависимость площади всасывающего окна F_o , сообщающего камеру всасывания с рабочими ячейками, от угла поворота колеса для серийного выпускаемого вакуумного насоса ВВН1-3 представлена на рис. 2 линией 1.

В начальный момент всасывания площадь окна равна нулю, а затем ее величина возрастает до угла поворота колеса, равного $\left(\varphi_m - \frac{2\pi}{Z} \right)$, где Z – число лопаток

колеса. После этого на угле поворота колеса, равном угловому размеру рабочей ячейки $\frac{2\pi}{Z}$, площадь окна опять уменьшается до нуля. Изменение площади рабочей ячейки $F_{яч}$ на участке всасывания от угла поворота колеса представлено на рис. 2 линией 4. Скорость изменения площади рабочей ячейки $\frac{dF_{яч}}{d\varphi}$, которая в начале процесса всасывания равна определенной величине, затем увеличивается и достигает максимального значения при углах $90^\circ < \varphi < 120^\circ$, а затем снова снижается. Сравнение этих зависимостей показывает значительное несовпадение углов, при которых достигаются максимальные значения величин F_o и $\frac{dF_{яч}}{d\varphi}$.

Дроссельные потери во всасывающем окне зависят от скорости газа в нем C_o , поэтому наряду с рассмотрением зависимостей F_o и $\frac{dF_{яч}}{d\varphi}$ следует рассмотреть зависимость скорости газа в окне C_o от угла поворота колеса, не учитывая в первом приближении дроссельные потери в окне всасывания. Из уравнения неразрывности объемный расход при движении всасываемого потока газа через окно в рабочую ячейку равен

$$\frac{dV_{яч}}{dt} = C_o F_o, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

После замены переменных в этом выражении через соотношение $d\varphi = \omega \cdot dt$ оно приводится к виду

$$\frac{dV_{яч}}{dt} = \frac{dV_{яч}}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \omega \cdot \frac{dV_{яч}}{d\varphi} = \varepsilon \cdot \omega \cdot \frac{dF_{яч}}{d\varphi}, \quad (3)$$

где ε – осевая ширина колеса, м; ω – угловая скорость колеса, с^{-1} .

С учетом двух последних выражений скорость газа во всасывающем окне равна

$$C_o = \frac{\omega \varepsilon}{F_o} \cdot \frac{dF_{яч}}{d\varphi}, \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (4)$$

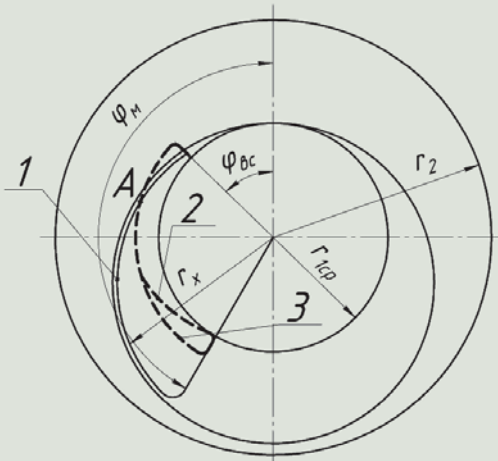


Рис. 1. Форма жидкостного кольца и всасывающего окна: 1 – существующее окно; 2 – теоретическое окно; 3 – рекомендуемое окно

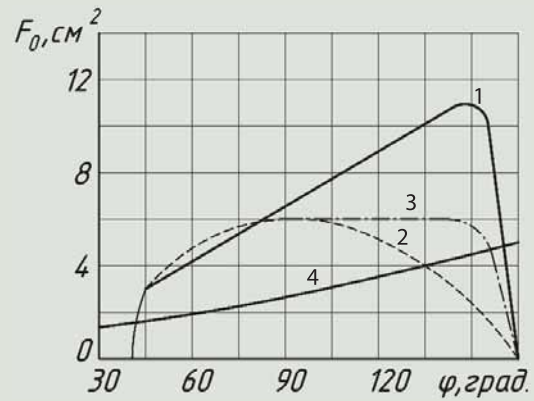


Рис. 2. Площадь всасывающего окна: 1 – существующее окно; 2 – теоретически полученное окно; 3 – рекомендуемое окно; 4 – зависимость $F_{яч}$ (φ)

Зависимость скорости газа во всасывающем окне вакуумного насоса ВВН1-3 от угла поворота колеса представлена кривой 1 на рис. 3.

Анализ этой зависимости показывает, что скорость газа в окне всасывания постоянно снижается с возрастанием угла поворота колеса, достигая нулевого значения в момент окончания процесса всасывания. Абсолютная величина скорости C_o в течение всего процесса всасывания значительно ниже величины 50 м/с, допускаемой во всасывающих окнах ротационных объемных машин [2], а на заключительной трети процесса всасывания она снижается от 20 м/с до нуля. Таким образом, размеры всасывающего окна вакуумного насоса ВВН1-3 значительно превышают необходимую величину, т.е. к моменту закрытия всасывающего окна оно практически уже не работает. Уменьшение размеров всасывающего окна позволяет уменьшить площадь, по которой имеют место перетечи сжимаемого газа через торцовые зазоры со стороны нагнетания на сторону всасывания. Кроме того, выравнивание поля скоростей всасываемого газа в угловых пределах всего всасывающего окна дает возможность увеличить полноту процесса всасывания, что также приводит к повышению производительности жидкостно-кольцевой машины. Этого можно достигнуть за счет уменьшения радиальных размеров окна в области, близкой к углу его закрытия, причем скорость газа не будет превышать допустимой величины. Задаваясь скоростью газа во всасывающем окне $C_o=45$ м/с, можно построить очертания наружной кромки окна, изменение скорости газа в нем и его площади по углу поворота колеса φ , что показано линией 2 на рис. 1-3.

Площадь всасывающего окна F_o можно рассчитать, разбивая участок всасывания на угловые интервалы, равные угловому размеру рабочей ячейки $\varphi_{яч} = \frac{2\pi}{Z}$ и принимая при этом допущение, что в пределах каждого интервала внутренняя поверхность жидкостного кольца концентрична втулке колеса. Если оставить без изменения углы открытия $\varphi_{от}$ и закрытия $\varphi_{з}$ всасывающего окна, а радиус-вектор наружной кромки окна обозначить через R , то площадь ячейки и перекрываемая ею часть площади окна определяется в виде разности площадей секторов,

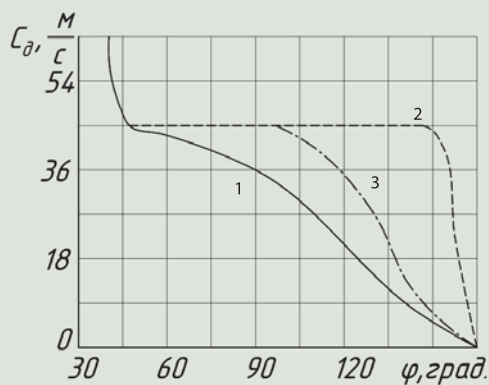


Рис. 3. Скорость газа во всасывающем окне:
1 – существующее окно; 2 – теоретически полученное окно; 3 – рекомендуемое окно

имеющих угловой размер $\varphi_{\text{яч}}$ и радиусы R и $r_{1\text{cp}}$ по формуле

$$F_o = \frac{\varphi_{\text{яч}}}{2} (R^2 - r_{1\text{cp}}^2), \text{ м}^2. \quad (5)$$

Величину производной $\frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi}$ можно найти путем пересчета масштаба скорости в окне C_o в масштаб производной $\frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi}$. Выражение для площади всасывающего окна, с другой стороны, из предыдущих соотношений имеет вид

$$F_o = \frac{\varepsilon\omega}{C_o} \cdot \frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi}, \text{ м}^2. \quad (6)$$

В результате из выражений (5) и (6) получается формула для определения радиуса-вектора наружной кромки всасывающего окна на угле поворота колеса φ

$$R = \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon}{\varphi_{\text{яч}}} \cdot \frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi} + r_{1\text{cp}}^2} = \sqrt{\frac{Z\omega\varepsilon}{\pi C_o} \cdot \frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi} + r_{1\text{cp}}^2}, \text{ м}. \quad (7)$$

Найденная расчетным путем из формулы (7) наружная кромка всасывающего окна показана линией 2 рис. 1. Её радиус-вектор изменяется по величине в течение процесса всасывания и достигает максимального значения R_{max} при $\left(\frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi}\right)_{\text{max}}$ на угле поворота колеса, взятом у середины угловой протяженности окна, а в момент окончания процесса всасывания при $\varphi = \varphi_m$ он становится равным среднему радиусу втулки колеса, т.к. производная $\frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi}$ равна нулю. При этом скорость газа в окне, соответствующая линии 2 на рис. 2, выравнивается по всему окну, а площадь окна значительно уменьшается.

Формулу (7) для R можно также преобразовать через средний радиус втулки колеса $r_{1\text{cp}}$, выразив угловую скорость колеса через его окружную скорость на наружном радиусе r_2 , т.е. $\omega = \frac{U_2}{r_2}$, и вводя коэффициент скорости $K = \frac{U_2}{C_o} = 0,32 \dots 0,36$ для жидкостно-кольцевых

вакуумных насосов. В результате этих преобразований выражение для максимального радиуса-вектора наружной кромки всасывающего окна принимает вид

$$R_{\text{max}} = r_{1\text{cp}} \cdot \sqrt{\frac{K\varepsilon Z}{\pi r_2^2} \cdot \left(\frac{dF_{\text{яч}}}{d\varphi}\right)_{\text{max}} + 1} = K_1 \cdot r_{1\text{cp}}, \text{ м}, \quad (8)$$

где $K_1 = 1,07 \dots 1,3$ – коэффициент для жидкостно-кольцевых вакуумных насосов, зависящий от геометрических параметров колеса и коэффициента скорости [5].

Для упрощения технологии изготовления всасывающего окна его наружную кромку можно выполнить в форме дуги окружности 3, концентричной втулке колеса, с радиусом R_{max} , определяемым допустимой скоростью газа в окне (рис. 1). Однако через верхнюю часть такого окна на участке от его угла открытия $\varphi_{\text{ес}}$ до угла, соответствующего точке А пересечения окружности наружной кромки окна с внутренней поверхностью жидкостного кольца, будет попадать жидкость из жидкостного кольца, занимая при этом часть полезного объема рабочей ячейки, что ведет к уменьшению производительности и увеличению потребляемой мощности машины. Для недопущения этого необходимо, чтобы на участке от угла открытия окна $\varphi_{\text{ес}}$ до точки А конфигурация наружной кромки окна всасывания определялась формой внутренней поверхности жидкостного кольца, как в серийно выпускаемой машине. В этом случае скорость газа на большем участке угловой протяженности всасывающего окна остается достаточно высокой и постепенно снижается по мере закрытия окна до нуля в соответствии с графиком 3 на рис. 3. На полноте процесса всасывания это практически не отразится, как и на величине площади окна.

Распределение скорости газа в окне всасывания по углу поворота колеса вакуумного насоса ВВН1-3 было подтверждено экспериментально в работе [6].

Выводы

Выполнение наружной кромки всасывающего окна жидкостно-кольцевой машины целесообразно в форме окружности с радиусом R_{max} , концентричной втулке колеса, от угла закрытия окна до точки ее пересечения с внутренней поверхностью жидкостного кольца, и далее от этой точки до угла открытия окна – в соответствии с формой внутренней поверхности жидкостного кольца. Это позволяет уменьшить радиальные размеры окна и его площадь, что приводит к уменьшению перетечек газа через торцовые зазоры со стороны нагнетания на сторону всасывания и дает возможность увеличить полноту процесса всасывания. В результате повышается производительность машины и ее коэффициент плотности.

Список литературы:

1. Декларационный патент на корисну модель №7401, кл. F04c 7/00, F04c 19/00. Бюл. №6, 15.06.2005 р.
2. Головинцов А. Г. и др. Ротационные компрессоры. – М.: Машиностроение, 1964. – 314 с.
3. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. – М.: Машгиз, 1960. – 832 с.
4. Тетерюков В. И. Ротационные вакуум-насосы и компрессоры с жидкостным поршнем. – М.: Машгиз, 1060. – 284 с.
5. Авторское свидетельство СССР №1303738, кл. № F04c 19/00. Бюл. №40, 30.10.91 г.
6. Райзман И. А. Особенности процесса всасывания жидкостно-кольцевых машин. – Казань.: Труды КХТИ им. С.М. Кирова. – Вып. 49, 1971. – С. 41-44.