РАЗДЕЛ XXI. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Автономова И.В., Рухлина К.С.

Расчёт мощности сжатия жидкостно-кольцевой машины

МГТУ им. Н.Э. Баумана
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-04-2019-219

idsp: ljournal-04-2019-219

Аннотация

В данной работе приведен расчет индикаторной диаграммы жидкостно-кольцевой машины, построена индикаторная диаграмма жидкостно-кольцевого вакуум-насоса с учетом влияния формы внутренней поверхности жидкостного кольца. Для оценки правильности определения формы внутренней поверхности жидкостного кольца были сравнены расчётные данные с экспериментом, изготовлен экспериментальный стенд.

Ключевые слова: жидкостно-кольцевой вакуум-насос, форма внутренней поверхности жидкостного кольца, мощность, индикаторная диаграмма

Abstract

In this paper, the calculation of the indicator diagram of the liquidring machine is given, the indicator diagram of the liquidring vacuum pump is analytically constructed taking into account the influence of the shape of the inner surface of the liquid ring. To assess the correctness of determining the shape of the inner surface of the liquid ring, the calculated data were compared with the experiment, and an experimental stand was made.

Keywords: liquidring vacuum pump, the shape of the inner surface of the liquid ring, power, indicator diagram

Жидкостно-кольцевые машины (ЖКМ) нашли широкое применение в различных областях промышленности: нефтяной, химической, пищевой, текстильной и бумагоделательной, благодаря своим преимуществам: простоте конструкции, надёжности, процессу сжатия близкому к изотермическому, возможности откачивать загрязнённые газы и т.д. Основным недостатком этих машин является относительно низкий КПД. Поэтому расчёт мощности этих машин является актуальной задачей. Этому вопросу посвящены работы [1-5]. В них мощность, затрачиваемая на сжатие газа, определяется как политропная. Условный показатель политропы сжатия в работах [1] и [2] определяется экспериментально и рекомендуется в пределах 1,02-1,35. В работах [3-5] показатель политропы сжатия рассчитывают в зависимости от подачи воды в жидкостное кольцо.

Для того чтобы аналитически определить мощность, затрачиваемую на сжатие газа, построим индикаторную диаграмму. Для определения объёма рабочих ячеек и давления в них необходимо определить форму внутренней поверхности жидкостного кольца (ФВП ЖК).

Рис. 1. Принципиальная схема ЖКМ.

В исходном расчёте [6] ФВП ЖК принимается описанной окружностью, центр которой лежит на вертикальной оси ЖКМ (рис.1) и расположен на расстоянии e от оси колеса.

Тогда радиус-вектор $\rho(\theta)$, которым описана эта окружность, будет:

$$\rho(\theta) = -e \cdot \cos(\theta) + \sqrt{r_0^2 - (e \cdot \sin(\theta))^2}, \quad (1)$$

где θ – угол поворота колеса относительно своей оси, град, r_0 – радиус окружности, которой описана ФВП ЖК, м.

Площадь рабочих ячеек:

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \int_{\theta}^{\theta+\beta} \rho(\theta)^2 d\theta - \frac{\pi \cdot r_1^2}{z}, \quad (2)$$

где r_1 – средний радиус ступицы колеса, м, z – число лопаток, $\beta = \frac{2\pi}{z}$ – угол между лопатками колеса, град.

Изменение давления газа в рабочих ячейках в процессе сжатия:

$$p_{сж1}(\theta) = p_{вс} \cdot \left(\frac{f_{max}}{f(\theta)} \right)^n, \quad (3)$$

где $p_{вс}$ – давление всасывания, Па, n – условный показатель политропы сжатия.

Индикаторная диаграмма (рис. 2) ЖКМ строится по зависимости:

$$p(\theta) = \begin{cases} p_{вс}, & \varphi_0 - \beta < \theta \leq \varphi_{вс} \\ p_{сж1}(\theta), & \varphi_{вс} < \theta \leq \varphi_{сж} - \beta \\ p_{н}, & \varphi_{сж} - \beta < \theta \leq \varphi_{к} \\ p_{сж2}(\theta), & \varphi_{к} < \theta \leq 2\pi - \beta \\ p_{од}(\theta), & 2\pi - \beta < \theta \leq \varphi_0 - \beta \end{cases} \quad (4)$$

где $p_{н}$ – давление нагнетания, Па, $p_{сж2}$ – давление сжатия, Па. φ_0 – угол открытия всасывающего окна, град, $\varphi_{вс}$ – угол закрытия всасывающего окна, град, $\varphi_{сж}$ – угол открытия нагнетательного окна, град, $\varphi_{к}$ – угол закрытия нагнетательного окна, град.

Рис.2. Индикаторная диаграмма ЖКМ в предположении, что ФВП ЖК описана окружностью.

Имея индикаторную диаграмму, в первом приближении ФВП ЖК можно определить по методике [7] (рис.3).

Рис.3. ФВП ЖК ЖКМ: 1 – в предположении, что ФВП ЖК описана окружностью; 2 – ФВП ЖК в первом приближении.

Расчёт по данной методике показал, что жидкостное кольцо ближе всего подходит к ступице колеса на угле θ_{i0} . При этом угле меняется направление движения жидкости: до этого угла жидкость входила в колесо, после него жидкость начинает выходить из колеса. Таким образом, определяется верхний предел изменения угла $\theta = \theta_{i0}$ при расчёте радиуса $\rho_2(\theta)$ и нижний предел изменения угла $\theta = \theta_{i0}$ при расчёте радиуса $\rho_1(\theta)$.

Аппроксимируем ФВП ЖК не тремя окружностями, как это делается в [7], а двумя, что соответствует физике явлений, происходящих в жидкостном кольце. В ячейке сжатия, которая подошла к нагнетательному окну, в следующее мгновение, когда она соединится с нагнетательным окном, резко изменится давление и станет равным давлению нагнетания. Это приведёт к резкому изменению скорости жидкости в безлопаточном пространстве и скачкообразному изменению ФВП ЖК (рис.3). Следовательно, часть ФВП ЖК опишем радиусом $\rho_1(\theta)$, а другую часть радиусом $\rho_2(\theta)$:

$$\rho_l(\theta) = \begin{cases} \rho_1(\theta), & 0 < \theta \leq \varphi_{сж} - \beta \\ \rho_2(\theta), & \varphi_{сж} - \beta < \theta \leq \theta_{i0}, \\ \rho_1(\theta), & \theta_{i0} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho_{1,2}(\theta) = -\varepsilon_{1,2} \cdot \cos(\theta - \alpha_{1,2}) + \sqrt{r_{1,2}^2 - (\varepsilon_{1,2} \cdot \sin(\theta - \alpha_{1,2}))^2} \quad (6)$$

В выражении (6) подберем коэффициенты ε, α и r методом последовательных приближений таким образом, чтобы каждая дуга отличалась не более 5% от ФВП ЖК, полученной ранее.

Площадь рабочей ячейки в зависимости от угла поворота ротора определим по зависимости (2).

Во втором приближении значения радиус-векторов $\rho_i(\theta)$ отличаются от значений радиус-векторов $\rho_i(\theta)$, полученных в первом приближении, менее чем на 4,9%, т.е. ФВП ЖК второго приближения – окончательное решение (рис. 4).

По данной методике для вакуумного насоса ВВН-12 при давлении всасывания $p_{вс} = 26,5$ кПа, давлении нагнетания $p_n = 98$ кПа и частоте вращения вала $n_0 = 16,45$ с⁻¹ построим эпюру скоростей в сечении $\theta = 180^\circ$ и сравним с экспериментальными данными [6] (точки) (рис. 5).

Рис.4. ФВП ЖК ЖКМ: 1 – во втором приближении, 2 – в третьем приближении.

Рис. 5. Экспериментальная (точки) и расчётная эпюра скоростей ЖКМ:
 а – трубка Пито расположена в центре длины корпуса, б – трубка Пито расположена на расстоянии $\frac{1}{4}$ от торцевой крышки ЖКМ, в – средние экспериментальные значения скоростей.

В методике [7] скорости по длине безлопаточного пространства принимаются постоянными, т.е. рассчитывается среднее значение скоростей жидкости подлине корпуса. Замер скоростей в эксперименте проводился в двух точках: в центре корпуса и на расстоянии $\frac{1}{4}$ от торцевой крышки ЖКМ. Сравнение расчётных данных и экспериментальных показывает, что скорости на расстоянии 7 мм от внешнего диаметра колеса меньше расчётных. И отличаются от расчётных: для центрального положения на 14,47%, а для не центрального на 20,3%. Это говорит о том, что жидкость в момент выхода из колеса по инерции продолжает двигаться по траектории, заданной наклоном лопатки колеса. И только на расстоянии приблизительно 10 мм начинает двигаться по траекториям, которые определяются внутренней поверхностью корпуса. В радиальном сечении жидкостного кольца значения расчётных скоростей отличаются от экспериментальных значений максимум на 7,93% и минимум на 1,1%. Если сравнить расчётные значения скоростей со средними экспериментальными значениями $v_{2\text{ср}} = (v_{2\text{центр}} + 2 v_{2\text{нецентр}})/3$, то на расстоянии 7мм от поверхности колеса ошибка составит 18,1%, а для остальных значений скоростей от 6,9% до 2,6%. Следовательно, предположение о струйном течении жидкости в безлопаточном пространстве соответствует действительности.

Для проверки правильности определения ФВП ЖК был изготовлен экспериментальный стенд (рис. 6) и снята ФВП ЖК ЖКМ с размерами: $r_1 = 0,045$ м, $r_2 = 0,09$ м, $b_0 = 0,05$ м, $e = 0,014$ м, $\Delta = 0,001$ м, $z = 12$, $\beta_2 = 135^\circ$, $p_{\text{вс}} = 2,386 \cdot 10^4$ Па, $p_{\text{н}} = 1,006 \cdot 10^5$ Па. Торцовая крышка ЖКМ была выполнена из оргстекла толщиной 40 мм. Для получения четкой и устойчивой формы жидкостного кольца использовался строботометр СТ-5. Для сравнения расчётных и экспериментальных данных на снимок (рис. 7) была наложена расчетная ФВП ЖК (красный цвет), а также форма в предположении окружности (синий цвет). Из рис. 7 видно, что расчетная форма жидкостного кольца значительно отличается от окружности, и, напротив, хорошо согласуется с реальной картиной.

Рис. 6. Экспериментальный стенд.

Рис. 7. Экспериментальная и расчётная (красная линия) ФВП ЖК.

При данной ФВП ЖК индикаторная диаграмма ЖКМ представлена на рис.8.

Рис.8. Индикаторная диаграмма ЖКМ в исходном расчёте (красная) и в первом приближении (синяя).

Построим зависимость давления в рабочей полости от её объема (рис. 9) (свернём индикаторную диаграмму).

Рис. 9. Свернутая индикаторная диаграмма.

По диаграмме можно определить мощность, затрачиваемую на сжатие газа в ячейке:

$$L_{\text{сж } p} = \int p \, dV \quad (7)$$

Тогда расчетная мощность сжатия:

$$N_{\text{сж } p} = L_{\text{сж } p} \cdot n_0 \, z, \quad (8)$$

где n_0 – частота вращения колеса.

Для рассматриваемого насоса $N_{\text{сж } p}$ составляет 375,85 Вт.

Сравним её с мощностью политропного сжатия:

$$N_{\text{сж}} = \frac{n}{n-1} \cdot S_e \cdot p_{\text{вс}} \cdot \left(\left(\frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{вс}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right), \quad (9)$$

где $n = [\ln(p_{\text{н}}/p_{\text{вс}})] / [\ln(p_{\text{н}}/p_{\text{вс}}) - \ln(T_{\text{н}}/T_{\text{вс}})]$ – условный показатель политропы сжатия.

В эксперименте температура воздуха на всасывании была $T_{\text{вс}} = 295$ К, на выходе – $T_{\text{н}} = 303$ К. При этих значениях температур условный показатель политропы сжатия равен 1,019, политропная мощность – 382,88 Вт. Ошибка, по сравнению с мощностью, рассчитанной по индикаторной диаграмме, составляет 1,83%.

Сравним мощность, рассчитанную по индикаторной диаграмме, с мощностью, рассчитанной по методикам [1,2], в которых рекомендуется выбирать n в пределах от 1,02 до 1,35. Для $n = 1,02$ мощность сжатия $N_{\text{сж}}$ равна 390,97 Вт и тогда ошибка по сравнению с мощностью, рассчитанной по индикаторной диаграмме, составит 1,91%. Для $n = 1,35$ мощность сжатия $N_{\text{сж}}$ равна 457,85 Вт и ошибка составляет 17,92%.

Выводы:

- доказано, что течение в безлопаточном пространстве жидкостного кольца ЖКМ можно считать струйным и для его описания применять уравнение Бернулли;
- показано, что ФВП ЖК повернута относительно оси, проходящей между всасывающим и нагнетательным окном, на величину θ_{i0} , которая приблизительно равна $0,5\beta$, следовательно, всасывающее окно следует закрывать не при угле $(\pi - 0,5\beta)$, а при угле $(\pi - \beta)$;
- предложена методика построения индикаторной диаграммы: мощность, затрачиваемая на сжатие газа, рассчитанная по индикаторной диаграмме, отличается от мощности сжатия газа, рассчитанной по политропному закону с условным показателем политропы сжатия, полученным в эксперименте, менее чем на 2%.

1. И.А. Райзман Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры. - Казань: 1995. 258с.
2. И.П. Кляусс, И.Б. Лисичкин Индицирование ротационных жидкостных компрессорных машин. Гидродинамика, компрессоры и насосы химических производств. М.: Машиностроение, 1973. С63-69.

3. В.Д. Лубенец, И.В. Автономова Расчёт мощности гидродинамических потерь и жидкостнокольцевых машинах. Труды МВТУ №146 Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты. - М.: 1971. С.31-38
4. В.Д. Лубенец, И.В. Автономова Влияние окружной скорости колеса жидкостнокольцевого вакуум-компрессора на его энергетические характеристики. Труды МВТУ №158 Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты.- М. 1973. С.37-41
5. В.Д. Лубенец, И.В. Автономова Теоретическое исследование влияния относительного эксцентриситета на производительность и удельную мощность жидкостнокольцевых вакуум компрессоров.Труды МВТУ №158 Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты. - М.: 1973. С.41-47
6. Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев, Н.К. Никулин, П.И. Пластинин Механические вакуумные насосы.- М.: Машиностроение, 1989.- 288с.
7. T.A. Tsorayev. I.V. Avtonomova. Calculation of Liquid Ring Shape in Liquid-Ring Machine.OIL AND GAS ENGINEERING (OGE-2018) Omsk, RussiaPublished by the American Institute of Physics p.03026-1 - 03026-11.

Анухин И.В., Любомудров С.А., Журавлева И.Н.

Оценка точности тепловизионного метода измерения температуры в зоне резания при точении

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/lj-04-2019-220

idsp: ljjournal-04-2019-220

Аннотация

В статье предложен тепловизионный метод измерения температуры в зоне резания при обработке на токарном станке и проведена оценка его точности. Применение тепловизора модели BALTECH TR-01500 позволило записать термограмму выхода резца из зоны резания в момент освобождения его от стружки, и тем самым найти температуру передней поверхности резца. Предварительно определялись коэффициенты излучения резца и стружки, их значения заносились в память тепловизора.

Ключевые слова: тепловизор, температура, термограмма, резец, стружка, коэффициент излучения, токарный станок.

Abstract

The article offers a method for temperature measurement in the cutting zone on a turning lathe. Also the accuracy evaluation was made. Application of thermal imager BALTECH TR-01500 allowed to record the thermogramm of the cutter running out from the cutting zone at the moment of releasing the cutter face from chips. The values of the coefficients of thermal emissivity of the cutter and chips were recorded in the memory of the thermal imager.

Keywords: thermal imager, temperature, thermogramm, cutter, metal chips, coefficient of thermal emissivity, turning lathe.

В условиях повышения нагрузок и температур, действующих в узлах современных машин, все большее распространение получают специальные марки нержавеющей, износостойких и жаропрочных сталей и сплавов. При обработке подобных материалов стойкость режущего инструмента часто не превышает 3...10 минут.

Основной задачей при обработке подобных материалов и сплавов становится выбор в производственных условиях режущего инструмента, его геометрических параметров и режимов резания, при которых износ режущего инструмента был бы минимален, а качество обработки приемлемо.

Для проверки гипотезы и реализации метода ускоренного определения оптимальных режимов резания в условиях производства, прежде всего, требуется надежный, точный и удобный способ измерения температуры в зоне резания.