

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТИ ПРИ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ЗАЗОРЕ РОТОРНО-ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

Промтов М.А., Монастырский М.В

Тамбовский государственный технический университет (Россия)

При проектировании аппаратов и устройств, имеющих вращающийся ротор и статор, в зазоре между которыми течет поток жидкости или газа, необходимо рассчитывать теплообразование в зазоре. Величина тепловыделения в зазоре между ротором и статором зависит от количества энергии, диссипируемой в зазоре. Решение таких задач может быть усложнено за счет наличия отверстий в стенках ротора и статора, вследствие чего к осевому потоку добавляется и радиальный поток жидкости или газа, как например, это существует в зазоре между ротором и статором роторно-импульсного аппарата (РИА) [1].

Схема РИА представлена на рис. 1. Основными конструктивными элементами РИА являются цилиндрические ротор и статор, на боковых стенках которых выполнены сквозные отверстия, как правило круглой или щелевидной формы. Обрабатываемая жидкость подается под давлением в полость ротора, проходит через отверстия ротора, межцилиндровый зазор, отверстия в статоре и выводится из аппарата через рабочую камеру вокруг статора. При вращении ротора, его отверстия периодически совмещаются с отверстиями в статоре, что вызывает периодические пульсации потока жидкости.

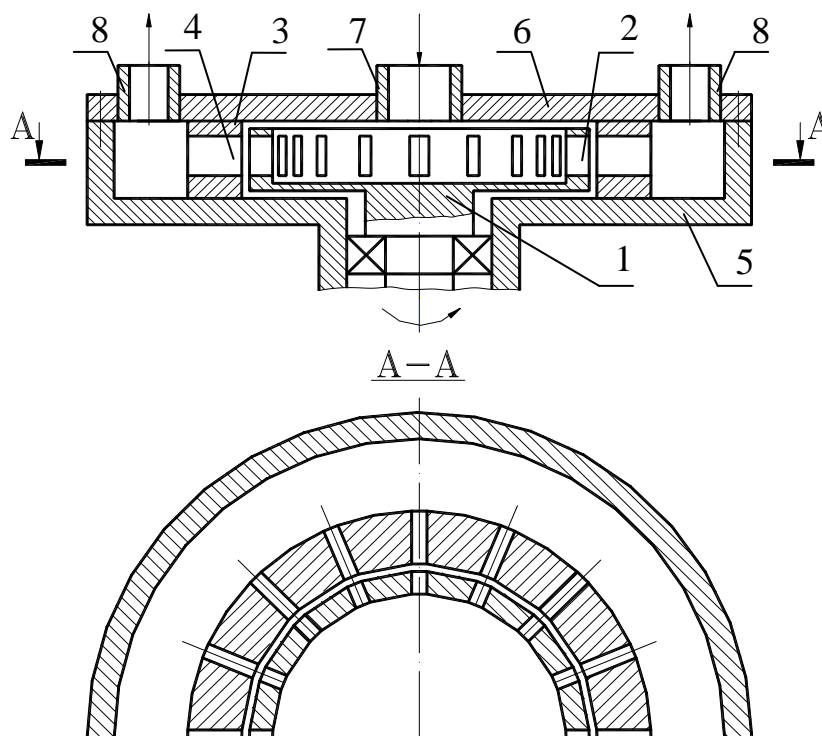


Рис.1. Схема роторно-импульсного аппарата:
1 - ротор; 2 - каналы ротора; 3 - статор; 4 - каналы статора;
5 - корпус; 6 - крышка; 7 - входной патрубок; 8 - выходной патрубок.

Характерные положения отверстий ротора относительно отверстий статора показаны на рис. 2. Примем, что количество отверстий в роторе и статоре одинаково и равно z .

Положение 1. Отверстие ротора начинает совмещаться с отверстием статора (рис. 2, а).

Положение 2. Отверстие ротора выходит из совмещения с отверстием статора (рис. 2, б).

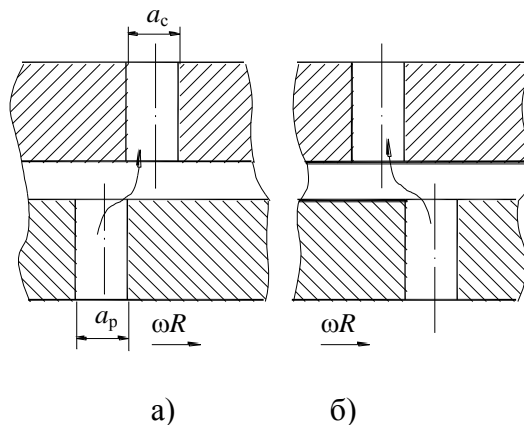


Рис. 2. Схема положения отверстия ротора относительно отверстия статора.

Длительность временного интервала при переходе отверстия ротора из положения (а) в положение (б) равна $t_1 = (a_c + a_p) / \omega R$. Для этого временного интервала структура потока жидкости в радиальном зазоре вне зоны отверстий ротора и статора соответствует классической модели течения между соосными цилиндрами, внутренний из которых вращается [2].

Длительность временного интервала при переходе отверстия ротора из положения (б) в положение (а) равна $t_2 = (b_c - a_p) / \omega R$. Для этого временного интервала структура потока жидкости имеет сложный вид. Движущими силами для потока жидкости являются перепад давления между отверстиями ротора и статора и силы вязкого трения при вращении ротора.

Рассмотрим положение, когда отверстия ротора не совпадают с отверстиями статора и выделим четыре участка для зоны зазора между ротором и статором (рис. 3). Участок *I*- сечение зоны зазора, ограниченной прямоугольником *ABCD*. Участок *II*- ограничен прямоугольником *CDEF*. Участок *III*- прямоугольником *EFGH*. Участок *IV*-прямоугольником *GHKL*. Время существования этих участков за один цикл перехода отверстия ротора из положения (б) в положение (а) равно длительности временного интервала t_2 .

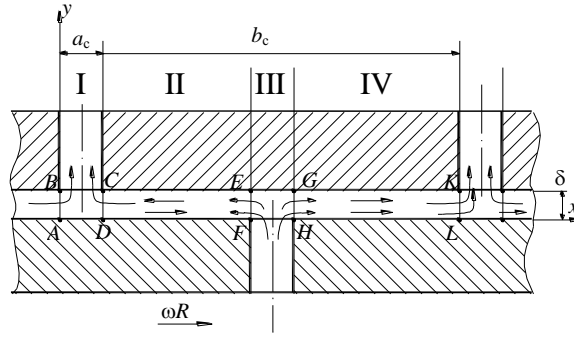


Рис. 3. Схема потоков жидкости в зазоре на участках I, II, III, IV.

Для участков II и IV суммарное поле скоростей потока жидкости будет представлять собой сумму скоростей потока жидкости при вращении ротора и скоростей потока жидкости за счет перепада давления между отверстиями ротора и статора:

$$V_{IV} = V_{\omega R} + V_{\Delta P} ; V_{II} = V_{\omega R} - V_{\Delta P} . \quad (1)$$

Скорость потока жидкости в зазоре при вращении ротора определяется по формуле [2]:

$$V_{\omega R} = \omega \cdot R \left(0.5 - 0.383 \cdot \lg \frac{y/\delta}{1 - y/\delta} \right) \quad (2)$$

при граничных условиях $V_{\omega R} = 0$ при $y = \delta$, $V_{\omega R} = \omega R$ при $y = 0$.

Скорость потока жидкости в зазоре за счет перепада давления между ротором и статором определяется по уравнению [3]:

$$V_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{2\mu l_{cp}} \cdot \delta^2 \left(\frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где $l_{cp} = (b_c - a_p)/2$ - средняя длина участков II и IV за период времени t_2 .

Мощность, диссипируемая в жидкости в зазоре между ротором и статором определяется по формуле [4]:

$$N = \int \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 dv, \quad (4)$$

где v - объем соответствующего участка в зазоре между ротором и статором, m^3 .

Для участков II и IV имеем:

$$N_{II} = \int \mu \left(\frac{\partial V_{II}}{\partial y} \right)^2 dv = S \cdot \int_0^{\delta} \mu \left(\frac{\partial V_{II}}{\partial y} \right)^2 dy ; \quad (5)$$

$$N_{IV} = \int \mu \left(\frac{\partial V_{IV}}{\partial y} \right)^2 dv = S \cdot \int_0^{\delta} \mu \left(\frac{\partial V_{IV}}{\partial y} \right)^2 dy . \quad (6)$$

Площадь боковой поверхности S на каждом из участков II и IV в период времени t_2 есть функция, зависящая от времени:

$$S = \int_0^{t_2} S(t) dt . \quad (7)$$

Так как угловая скорость ротора ω является постоянной величиной, то функция $S(t)$ линейно зависит от времени на участках II и IV и после интегрирования можно записать, что

$$S = S_{II} = S_{IV} = \frac{1}{2}(b_c - a_p) \cdot z \cdot h. \quad (8)$$

Потери мощности в зонах отверстий статора I и ротора III определим исходя из потерь кинетической энергии потока жидкости. Потери кинетической энергии потока жидкости для участка I равны разности кинетической энергии в сечении BC и сечениях AB и CD . Потери кинетической энергии потока жидкости для участка III равны разности кинетической энергии в сечении FH и сечениях EF и GF :

$$\Delta T_I = (T_{AB} + T_{CD}) - T_{BC}; \quad (9)$$

$$\Delta T_{III} = T_{FN} - (T_{EF} + T_{GH}). \quad (10)$$

В сечении BC кинетическая энергия элемента объема жидкости Δv определяется по формуле:

$$T_{BC} = \frac{1}{2} \rho \cdot \Delta v \cdot V_c^2. \quad (11)$$

В сечении FH кинетическая энергия элемента объема жидкости Δv определяется как сумма кинетических энергий элемента за счет движения его при вращении ротора и за счет перепада давления между ротором и статором:

$$T_{FH} = \frac{1}{2} \rho \cdot \Delta v \cdot (V_p^2 + \omega^2 R^2). \quad (12)$$

В сечениях AB , CD , EF и GH кинетическую энергию потока можно определить как:

$$T_{AB} = T_{GH} = \Delta S \cdot h \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \int_0^{\delta} V_{IV}^2 dy; \quad (13)$$

$$T_{CD} = T_{EF} = \Delta S \cdot h \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \int_0^{\delta} V_{II}^2 dy, \text{ где } \Delta S = \frac{\Delta v}{\delta \cdot h}. \quad (14)$$

Подставим формулы (11)-(14) в (9), (10) и перейдем от кинетической энергии к мощности, вводя вместо элементарного объема жидкости Δv секундный расход через зазор, который определяется как: $Q = Q_{IV} + Q_{II}$, где Q_{II} и Q_{IV} - расход через зазор на участках II и IV . Расход жидкости на участках II и IV определяется по следующим уравнениям:

$$Q = \left(\frac{1}{\delta} \cdot \int_0^{\delta} V_{IV} dy \right) \cdot \delta \cdot h - \left(\frac{1}{\delta} \cdot \int_0^{\delta} V_{II} dy \right) \cdot \delta \cdot h = 2 \cdot h \cdot \int_0^{\delta} V_{\Delta P} dy = \frac{h \cdot \Delta P \cdot \delta^3}{6 \cdot \mu \cdot l_{cp}}. \quad (15)$$

Потери мощности в зазоре между ротором и статором для участков I и III определим по формулам:

$$N_I = \frac{1}{2} \rho Q \left(\frac{1}{2\delta} \int_0^{\delta} (V_{II}^2 + V_{IV}^2) dy - V^2 \right) \cdot z; \quad (16)$$

$$N_{III} = \frac{1}{2} \rho Q \left((V^2 + \omega^2 R^2) - \frac{1}{2\delta} \int_0^{\delta} (V_{II}^2 + V_{IV}^2) dy \right) \cdot z. \quad (17)$$

Анализируя уравнения (16) и (17) можно записать:

$$N_I + N_{III} = \frac{1}{2} \rho Q (V_p^2 + \omega^2 R^2 - V_c^2); V_p = \frac{Q}{a_p \cdot h}; V_c = \frac{Q}{a_c \cdot h}. \quad (18)$$

Физический смысл уравнения (18) состоит в том, что диссипация мощности в зонах каналов ротора и статора для промежутка времени t_2 равна мощности, затрачиваемой на торможение жидкости в зазоре между ротором и статором, т.к. при выходе из канала ротора жидкость имеет две составляющие скорости - радиальную и осевую, а при входе в канал статора - только радиальную.

Потери мощности в зазоре между ротором и статором на временном интервале t_1 при переходе отверстия ротора из положения 1 в положение 2 рассчитываются по формуле:

$$N_1 = \mu (b_c - a_p) z h \int_0^{\delta} \left(\frac{\partial V_{\omega R}}{\partial y} \right)^2 dy. \quad (19)$$

Общие потери мощности в зазоре РИА определяются пропорционально периодам времени как суммарные потери на каждом из участков в соответствующий период времени:

$$N = k \frac{a_c + a_p}{a_c + b_c} N_1 + k \frac{b_c - a_p}{a_c + b_c} (N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV}), \quad (20)$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние турбулентности и вихреобразования в зазоре, для геометрических и режимных параметров, принятых при данном расчете ($\Delta P = 0,1$ МПа, $R = 100$ мм, $z = 20$, $h = 10$ мм, $a_p = a_c = 2$ мм, $b_p = b_c = 29$ мм, $\delta = 0,1$ мм, ρ , c и μ для воды при нормальных условиях) $k \approx 10$.

При вращении ротора РИА жидкость нагревается за счет диссипации энергии. Определить температуру нагрева жидкости за промежуток времени Δt можно исходя из теплового баланса, считая, что тепловые потери отсутствуют: $N \cdot \Delta t = Q \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta t \cdot \Delta \theta$. Откуда изменение температуры жидкости после обработки в аппарате можно выразить в виде $\Delta \theta = \frac{N}{Q \cdot \rho \cdot c}$. На рис.4 показаны графики зависимости изменения (нагрева) температуры жидкости (воды) в зазоре между ротором и статором от угловой скорости ротора.

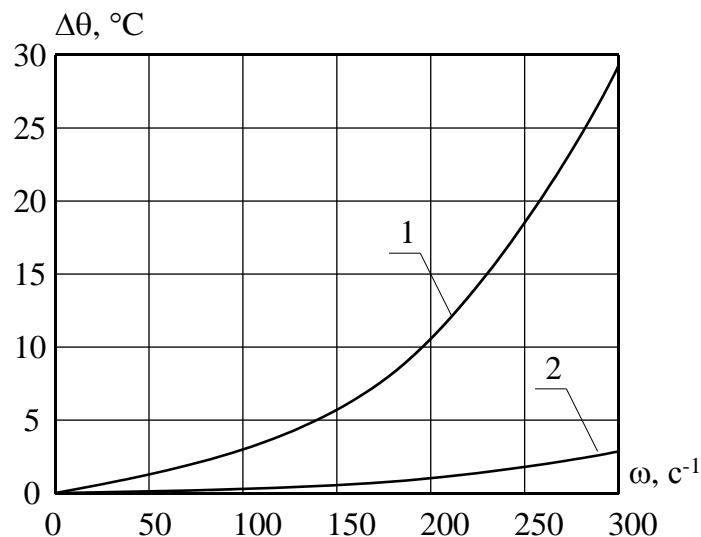


Рис. 4. Зависимости изменения температуры жидкости в зазоре от угловой скорости вращения ротора: 1) $\delta=10^{-4}$ м; 2) $\delta=5 \cdot 10^{-4}$ м.

Необходимо отметить, что в предложенной методике расчета изменения температуры жидкости в зазоре между ротором и статором задействована величина расхода жидкости Q , проходящей только через зазор, когда отверстия ротора не совмещены с отверстиями статора. При малой величине зазора расход Q значительно меньше общего расхода $Q_{\text{общ}}$ через РИА. Поэтому в реальных условиях часть жидкости, проходящая через зазор и нагревающаяся в нем, затем смешивается с основным потоком, и поэтому повышение температуры жидкости при обработке в РИА незначительно и зависит от соотношения Q и $Q_{\text{общ}}$.

Промтов М. А. Расчет изменения температуры жидкости при диссипации энергии в зазоре роторно-импульсного аппарата / М. А. Промтов, М. В. Монастырский // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 4. – С. 28–32.