УДК 693.546.4.002.5 DOI: 10.17673/Vestnik.2021.04.21

Е. А. КРЕСТИН
Г. В. СЕРЕБРЯКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И КОНИЧЕСКИХ ЗАЗОРАХ ПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

STUDY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF FLOW IN PLANE-PARALLEL AND TAPER CLEARANCES OF DRIVES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Исследованы гидродинамические параметры потока вязкой рабочей жидкости в плоскопараллельных и конических зазорах в приводах электроэнергетических систем. Найдено общее выражение для определения закономерности изменения скорости потока в зазорах бесконтактных уплотнений, а также рассмотрены частные случаи. В случае фрикционного перемещения одной из стенок в зазоре наблюдается течение Куэтта. При напорном воздействии на жидкость в зазоре наблюдается параболическое распределение скорости с максимумом в середине канала. При совместном воздействии фрикционного перемещения стенки и напорного течения в канале наблюдается расслоение движения жидкости в противоположные стороны. Фрикционное течение в конусных щелях, когда жидкость движется только в одном направлении, возможно при значении конусности -0,5…1,0. Во всех остальных случаях поток в щели будет иметь два противоположных направления течения. Наличие двух противоположных потоков внутри щели может быть и для случая, когда направление движения подвижной стенки совпадает с направлением напорного течения. Это вызвано повышением давления внутри зазора. Найдено общее решение для силы давления в зазорах, которая стремится раздвинуть стенки, т. е. раскрыть уплотняющие поверхности. Выполнен анализ силы давления для различных случаев щелевого зазора и при различном воздействии фрикционного течения и напорного давления.

The hydrodynamic parameters of the flow of a viscous working fluid in plane-parallel and conical gaps in drives of electric power systems are investigated. A general expression is found for determining the regularity of the change in the flow rate in the gaps of non-contact seals, and special cases are considered. In the case of frictional movement of one of the walls, the Couette flow is observed in the gap. When the pressure is applied to the liquid in the gap, a parabolic velocity distribution is observed with a maximum in the middle of the channel. Under the joint action of the frictional movement of the wall and the pressure flow in the channel, stratification of fluid movement in opposite directions is observed. Frictional flow in conical slots, when the fluid moves in only one direction, is possible at a taper value of -0,5...1,0. In all other cases, the flow in the slot will have two opposite flow directions. The presence of two opposite flows inside the slot can also be for the case when the direction of movement of the movable wall coincides with the direction of the pressure flow. This is caused by an increase in pressure within the gap. A general solution has been found for the pressure force in the gaps, which tends to push the walls apart, i.e. open the sealing surfaces. The analysis of the pressure force is carried out for various cases of the slotted gap and under various effects of the frictional flow and pressure head.

Ключевые слова: *привод электроэнергетических систем, щелевой зазор, плоскопараллельный и конический каналы, фрикционное и напорное течение, сила давления*

Keywords: *drive of electric power systems, slotted gap, plane-parallel and conical channels, frictional and pressure flow, pressure force*

Для определения закономерности изменения скорости потока в зазорах бесконтактных уплотнений необходимо в уравнение (4), полученное в [1]:

$$\vartheta_x(x,y)=\frac{1}{2\nu\rho}\left(y^2-hy\right)\frac{dp}{dx}\pm\frac{U}{h}\left(h-y\right),$$

подставить значение dp / dx.

Для детального изучения закономерностей изменения скорости потока рабочей жидкости в зазорах бесконтактных уплотнений рассмотрим результаты решений для различных случаев течения.

Случай 1 – это фрикционное течение рабочей среды в щели с параллельными стенками ($\Delta p = 0$, $\vartheta_{ст} \neq 0$, k = 0). Здесь давление в щели не изменяется, т. е. $dp / dx = 0$. Поэтому закон рас-

пределения скорости потока в щелевом зазоре будет иметь линейную зависимость (рис. 1) в виде функции

$$\vartheta_x = \pm\frac{\vartheta_{cm}}{h}(h-y). \qquad (1)$$

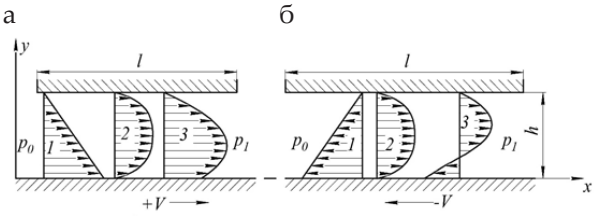

Рис. 1. Распределение скорости в плоской щели $h = const$ при движении потока под действием перепада давления и сил трения подвижной стенки: а – стенка движется вправо; б – стенка движется влево (1 – эпюра фрикционного течения; 2 – эпюра напорного течения; 3 – суммарная эпюра)

Случай 2 – это напорное течение в щелевом зазоре с параллельными и неподвижными стенками ($\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{cm} = 0$, k = 0). Тогда значение производной $\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{l}$, а выражение для определения скорости потока рабочей жидкости принимает вид:

$$\vartheta_x = -\frac{\Delta p}{2\nu\rho l}(y^2 - hy). \qquad (2)$$

Полученная формула соответствует параболическому закону распределения скорости по высоте зазора и имеет максимум в центре сечения при $y = h / 2$:

$$\vartheta_{max} = \frac{h^2\Delta p}{8\nu\rho l}.$$

Случай 3 – это напорное течение в щели с параллельными стенками $h = const$, причем одна стенка совершает перемещение в своей плоскости ($\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{cm} \neq 0$, k = 0):

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{l}; \vartheta_x = -\frac{\Delta p}{2\nu\rho l}(y^2 - hy) \pm \frac{\vartheta_{cm}}{h}(h-y). \qquad (3)$$

Когда направление движения стенки совпадает с направлением течения жидкости, то скорости складываются. Если же движение стенки происходит навстречу потоку жидкости, то скорости вычитаются. Поэтому поток всегда будет иметь два направления течения. Возле подвижной стенки частицы жидкости, увлекаемые силами трения, будут двигаться в направлении движения стенки, а в остальной части щелевого зазора – в обратном направлении [2].

Необходимо определить границы изменения направления потоков. Для этого в уравнении (3) приравниваем $\vartheta_x = 0$:

$$y_1 = -\frac{2\nu\rho l\vartheta_{cm}}{\Delta p h}, \qquad (4)$$

таким образом, координата границы раздела потоков будет зависеть как от скорости движения стенки ϑ_{cm} и величины перепада давления Δp, так и от высоты зазора h и вязкости жидкости ν.

Случай 4 – это наличие фрикционного течения в конусной щели при движении стенки с некоторой ненулевой скоростью $\pm\vartheta_{cm}$, $\Delta p = 0$, $k \neq 0$. Используя зависимость для определения давления в коническом зазоре [1]:

$$p(\bar{x}) = \bar{p}_0 \pm \frac{6\nu\rho l\vartheta_{cm}}{h_0^2}\frac{k\bar{x}(\bar{x}-1)}{(1+\bar{k}\bar{x})^2(2+k)},$$

получим формулу для изменения давления:

$$\frac{dp}{dx} = \pm\frac{6\nu\rho k\vartheta_{cm}}{h_0^2(2+k)}\frac{\bar{x}(2+k)-1}{(1+k\bar{x})^3}. \qquad (5)$$

Следует отметить, что при фрикционном течении в конусной щели жидкость будет перемещаться в направлении возрастающего давления [4]. В частности, для сужающейся щели это движение происходит до сечения с координатой $\bar{x}_1$, где давление будет достигать максимального значения [1]. В случае расширяющегося конического зазора – справа от сечения, в котором наблюдается минимум давления. Таким образом, начиная с некоторого вертикального сечения АБ, определяемого абсциссой x_2 (рис. 2), движение рабочей жидкости вблизи верхней неподвижной наклонной стенки будет происходить в направлении, противоположном движению нижней подвижной стенки. Математически это объясняется тем, что в сечении АБ производная $\frac{d\vartheta_x}{dy}$ при $y = h$ меняет свой знак на противоположный. Следовательно, в точке с координатой $\bar{x}_2$ будем иметь производную, равную нулю, $\left.\frac{\partial\vartheta_x}{\partial y}\right|_{y=h} = 0$.

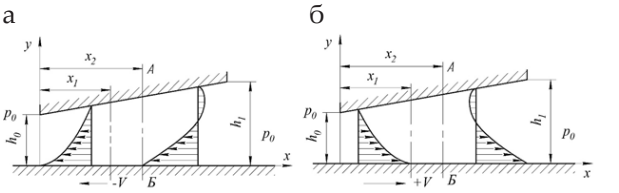

Рис. 2. Схема распределения скорости с конусной щели при движении стенки (безнапорное течение) в направлении уменьшающегося зазора (а) и увеличивающегося зазора (б)

Применяя выражение

$$\vartheta_x(x,y)=\frac{1}{2\nu\rho}(y^2-hy)\frac{dp}{dx}\pm\frac{U}{h}(h-y),$$

определим величину этой производной в виде:

$$\left.\frac{\partial\vartheta_x}{\partial y}\right|_{y=h}=\left|\frac{1}{2\nu\rho}(2y-h)\frac{dp}{dx}\mp\frac{\vartheta_{cm}}{h}\right|_{y=h}=\frac{h}{2\nu\rho}\frac{dp}{dx}\mp\frac{\vartheta_{cm}}{h}=0.$$

Используя выражение (5), найдем абсциссу точки перехода:

$$\bar{x}_2=\frac{1+2k}{k(2+k)};\ \bar{x}_2=\frac{(1+2k)l}{k(2+k)}. \qquad (6)$$

Из выражения (6) следует, что уменьшение конусности щелевого зазора приводит к увеличению значения координаты x_2. Поскольку щель имеет конечные размеры, то значение координаты x_2 может выходить за пределы зазора, т. е. область противотока в щелевом зазоре может и не возникать [3]. Минимальное значение параметра конусности k, когда в щелевом зазоре возникает течение, противоположное направлению подвижной стенки, может быть определено из следующих соотношений: для расширяющихся щелей $\bar{x}_2=1=\frac{1+2k}{k(2+k)}$, откуда коэффициент конусности равен $k = 1$ для сужающихся щелей, когда $\bar{x}_2=0=\frac{1+2k}{k(2+k)}$, получаем $k = -0{,}5$.

Таким образом, фрикционное течение в конусных щелевых зазорах, в случае когда жидкость движется только в одном направлении, возможно при значении конусности $-0{,}5 \le k \le 1$. Во всех же остальных случаях в щелевом зазоре поток будет иметь два противоположных направления течения рабочей жидкости [5].

Случай 5 – это наличие напорного течения в конусной щели при неподвижных стенках, т. е. ($\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{cm} = 0$, $k \neq 0$). Здесь дифференцирование выражения

$$\bar{p}(\bar{x})=\bar{p}_0-\frac{(1+k)^2}{2+k}\frac{2\bar{x}+k\bar{x}^2}{(1+k)^2}+q_\vartheta\frac{k\bar{x}(\bar{x}-1)}{(1+k)^2(2+k)}$$

приводит к следующей зависимости:

$$\bar{x}_p=x_p/l\frac{\int_0^l\bar{p}(\bar{x})\bar{x}d\bar{x}}{\bar{F}}\frac{dp}{dx}=\frac{(1+k)^2}{2+k}\frac{2\Delta p}{l(1+\bar{k}x)^3}. \qquad (7)$$

Закономерность изменения скорости потока рабочей жидкости в этом случае определяется уравнением

$$\vartheta_x=\frac{(1+k)^2}{2+k}\frac{\Delta p}{\nu\rho l(1+\bar{k}x)^3}(y^2-hy). \qquad (8)$$

Случай 6 – это совместное воздействие фрикционного и напорного течения в конусном щелевом зазоре. Соответственно более сложной будет и картина изменения скорости потока в конусной щели с подвижной стенкой при наличии еще и напорного течения под действием перепада давления ($\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{cm} \neq 0$, $k \neq 0$).

В этом случае имеем:

$$\frac{dp}{dx}=\left\{q_\vartheta-\frac{2(1+k)}{(2+k)(1+\bar{k}x)}\left[(1+k)+q_\vartheta\right]\frac{\Delta p}{l(1+\bar{k}x)^2}\right\}. \qquad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что когда направление движения подвижной стенки противоположно потоку, вызванному перепадом давления Δp, то возле подвижной стенки частицы жидкости, увлекаемые силами трения, будут двигаться вместе со стенкой. Наличие двух противоположных потоков внутри щелевого зазора может быть и в том случае, когда направление движения подвижной стенки совпадает с направлением напорного течения [6]. Это обусловлено повышением давления внутри самого зазора. Причем направление потока будет изменяться в том сечении, в котором производная скорости у стенки будет менять свой знак, т. е.

$$\left.\frac{\partial\vartheta_x}{\partial y}\right|_{y=h}=0.$$

Используя уравнение

$$\vartheta_x(x,y)=\frac{1}{2\nu\rho}(y^2-hy)\frac{dp}{dx}\pm\frac{U}{h}(h-y),$$

найдем значение координаты x_2, при котором происходит изменение направления движения потоков. Для этого подставим в уравнение $\frac{dp}{dx}\pm\frac{2\nu\rho\vartheta_{cm}}{h_2}=0$ значение $\frac{dp}{dx}$, в результате получим:

$$\bar{x}_2=\frac{1}{k}\left[\frac{3(1+k)}{2+k}\left(\frac{1+k}{q_\vartheta}+1\right)-1\right]. \qquad (10)$$

Увеличение параметра q_ϑ, равно как и увеличение параметра k, приводит соответственно к уменьшению координаты $\bar{x}_2$. Изменение направления потока в щелевом зазоре нежелательно, так как при этом создается неустойчивое течение жидкости. Поэтому значение координаты $\bar{x}_2$ в расширяющейся щели должно выходить за пределы щели, т. е. должно быть $\bar{x}_2 > 1$. Если в уравнение (10) положить $\bar{x}_2 = 1$, то зависимость между параметрами k и q_ϑ, при которых в расширяющейся щели не возникает изменение направления потока, запишется так:

$$q_\vartheta\le\frac{3(1+k)}{k-1}. \qquad (11)$$

Зависимость (11) позволяет определить границы однонаправленного течения в расширяющихся щелевых зазорах (рис. 3). При уменьшении угла наклона верхней стенки щели значение параметра q_ϑ, при котором происходит изменение направления течения, увеличивается и при $k \to 1$, $q_\vartheta \to \infty$. В сужающихся щелях изменение направления потока возможно лишь при значениях параметра k и q_ϑ, при которых в сужающихся щелях не возникает изменение направления движения потока, будет иметь вид:

$$q_\vartheta = -\frac{3(1+k)^2}{1+2k}. \qquad (12)$$

Причем при $k \to |-0{,}5|$, $q_\vartheta \to \infty$.

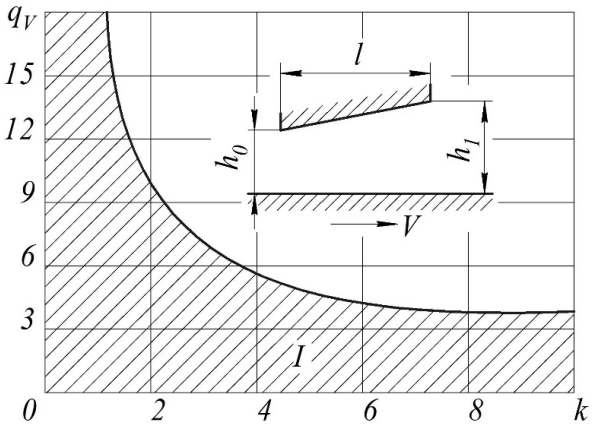

Рис. 3. Граница безотрывного течения в конусных щелях при движении стенки в направлении увеличивающегося зазора и напорного течения $\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{ст} \neq 0$, $k \neq 0$:
l – область однонаправленного течения

Далее определим силы давления, действующие на стенки щелевых зазоров. Сила давления в зазорах стремится раздвинуть стенки, т. е. раскрыть уплотняющие канал поверхности [7]. Полагая, что угол между стенками, ограничивающими зазор, мал, будем считать косинус его равным единице. Силу давления, действующую на стенки зазора, найдем путем интегрирования значения давления в зазоре:

$$F = W\int_0^l p(x)dx,$$

где l и W – соответственно длина и ширина щелевого зазора.

Используя зависимости

$$\overline{p}(\overline{x}) = \frac{p(\overline{x})}{\Delta p};\ \overline{x} = \frac{x}{l};\ d\overline{x} = \frac{dx}{l},$$

найдем величину силы давления в виде:

$$F = Wl\Delta p\int_0^l \overline{p}(\overline{x})d\overline{x}.$$

Решение получили в виде:

$$\overline{F} = \frac{F}{Wl\Delta p}\left\{\overline{p}_0 - \frac{1+k}{2+k} + \frac{q_\vartheta}{k}\left[\frac{2}{2+k} - \frac{ln(1+k)}{k}\right]\right\}. \qquad (13)$$

Для удобства анализа и расчетов введем безразмерный параметр, представляющий собой отношение действующей силы F к силе давления Δp на площадь Wl:

$$\overline{F} = \frac{F}{Wl\Delta p} = \overline{p}_0 - \frac{1+k}{2+k} + \frac{q_\vartheta}{k}\left[\frac{2}{2+k} - \frac{ln(1+k)}{k}\right]. \qquad (14)$$

С учетом этого обозначения, значение силы давления на стенку составит:

$$F = \overline{F}Wl\Delta p. \qquad (15)$$

Найдем абсциссу точки приложения равнодействующей силы давления в щели x_p. Положение абсциссы можно определить из условия равенства момента равнодействующей силы относительно начала координат моменту сил давления, найденному также относительно начала координат:

$$Fx_p = W\int_0^l p(x)xdx \text{ или } \overline{F}\overline{x}_p = \int_0^l \overline{p}(\overline{x})\overline{x}d\overline{x},$$

откуда:

$$\overline{x}_p = \frac{\int_0^l \overline{p}(\overline{x})\overline{x}d\overline{x}}{\overline{F}}, \qquad (16)$$

где $\overline{x}_p = x_p / l$.

Используя уравнения (13), (14) и (16), определим значения параметра $\overline{F}$, силы F, действующей на стенки и координату x_p приложения силы для следующих частных случаев.

1. Щель образована неподвижными параллельными стенками, течение напорное ($\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{ст} = 0$, $k = 0$).

Безразмерный параметр:

$$\overline{F} = \overline{p} - 0{,}5. \qquad (17)$$

Сила давления на стенку:

$$F = Wl\frac{p_0 + p_l}{2}. \qquad (18)$$

Абсцисса точки приложения силы F:

$$\overline{x}_p = \frac{3\overline{p}_0 - 2}{3(2\overline{p}_0 - 1)}. \qquad (19)$$

В случае, когда

$$\overline{p}_0 = \frac{p_0}{\Delta p} = 1,$$

а это возможно при $p_1 = 0$, то точка приложения силы F находится на расстоянии $x_p = 1/3$ от входа в щелевой зазор. При $p_1 = 0{,}5p_0$ координата $x_p = 4l/9$.

2. В щелевом зазоре с параллельными стенками ($\Delta p = 0$, $\vartheta_{ст} \neq 0$, k = 0) наблюдается фрикционное течение [8].

В этом случае искомые параметры имеют вид:

$$\overline{F} = 1;\ F = Wlp_0 \text{ и } x_p = 0{,}5l. \qquad (20)$$

3. Конусная щель с неподвижными стенками, течение напорное ($\Delta p \neq 0$, $\vartheta_{ст} = 0$, k ≠ 0).

Для этого случая имеем:

$$\overline{F} = \overline{p}_0 - \frac{1+k}{2+k}; \qquad (21)$$

$$F = Wl\Delta p\left(\overline{p}_0 - \frac{1+k}{2+k}\right). \qquad (22)$$

На рис. 4 приведен график зависимости

$$F = Wl\Delta p\left\{1 + \frac{q_\vartheta}{k}\left[\frac{2}{2+k} - \frac{ln(1+k)}{k}\right]\right\}\ \overline{F}$$

от параметра конусности k и при относительном давлении $\overline{p}_0 = \frac{p_0}{\Delta p} = 1$. Из этого графика следует, что $\overline{F}$ у сужающихся щелей будет больше, чем у параллельной и расходящейся. Максимальное значение $\overline{F}_{max} = 1$ будет при $k = -1$, т. е. когда входной зазор $h_1 = 0$ и течение жидкости через щель отсутствует [9]. При этом давление по всей длине щели будет постоянным $p = p_0$, а сила давления на стенки равна $\overline{F}_{max} = Wlp_0$. Абсцисса приложенной силы F составит:

$$x_p = \frac{0{,}5\overline{p}_0 - \frac{(1+k)^2}{k^2(2+k)}\left[\frac{k}{2} + \frac{1}{1+k} - \frac{1}{k}ln(1+k)\right]}{\overline{p}_0 - \frac{1+k}{2+k}}. \qquad (23)$$

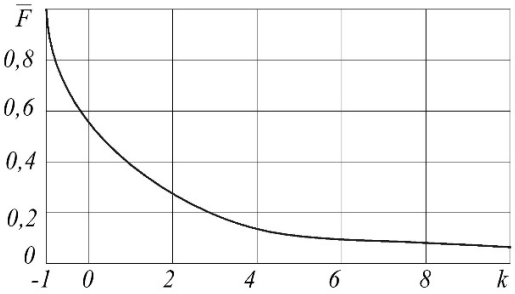

Рис. 4. График зависимости $\overline{F} = f(k)$ при напорном течении жидкости через конусную щель с неподвижными стенками

Так, например, при $\overline{p}_0 = 1$ и течении жидкости через расширяющуюся щель с величиной конусности $k = 1$ положение абсциссы равно $x_p = 0{,}294l$.

Для безнапорного течения в конусной щели ($\Delta p = 0$, $\vartheta_{ст} \neq 0$, k ≠ 0) безразмерный параметр составит [10]:

$$\overline{F} = 1 + \frac{q_{\vartheta_0}}{k}\left[\frac{2}{2+k} - \frac{ln(1+k)}{k}\right]. \qquad (24)$$

Сила давления, действующая на стенку, в этом случае равна:

$$F = Wl\Delta p\left\{1 + \frac{q_{\vartheta_0}}{k}\left[\frac{2}{2+k} - \frac{ln(1+k)}{k}\right]\right\}. \qquad (25)$$

Зависимость значения безразмерного параметра $\overline{F}$ от конусности щели и q_{ϑ_0} приведена на рис. 5. При движении стенки в сторону уменьшения зазора $\overline{F}$ по мере увеличения $|q_{\vartheta_0}|$ возрастает, при движении стенки в обратном направлении – падает. Причем функция $\overline{F} = f(k)$ имеет экстремум при $k = 1, 2$. При этом $\overline{F}_{max} = 1 - 0{,}0267q_{\vartheta_0}$.

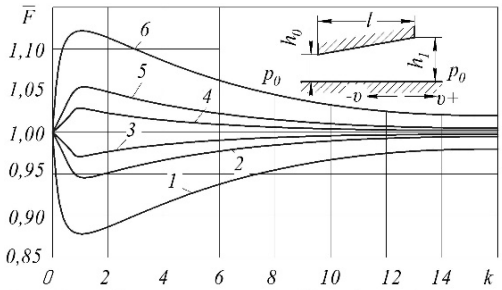

Рис. 5. График зависимости $F = f(k, q_{\vartheta_0})$ при безнапорном течении жидкости через конусную щель с подвижной стенкой:
$1 - q_{\upsilon_0} = 5$; $2 - q_{\upsilon_0} = 2$; $3 - q_{\upsilon_0} = 1$;
$4 - q_{\upsilon_0} = -1$; $5 - q_{\upsilon_0} = -2$; $6 - q_{\upsilon_0} = -5$

Точка максимума (минимума) давления находится на расстоянии $k = 1$, $q_{\vartheta_0} = 10$, $\overline{x}_p = 0{,}52$, $x_1 \approx 0{,}313l$ от входа в щелевой зазор.

Абсцисса приложения равнодействующей силы давления в этом случае определяется следующим образом:

$$\overline{x}_p = \frac{k^3(2+k) + q_{\vartheta_0}\left[2(3+2k)ln(1+k) - k(6+k)\right]}{2k\left\{k^2(2+k) + q_{\vartheta_0}\left[2k - (2+k)ln(1+k)\right]\right\}}. \qquad (26)$$

Для $k = 1$, $q_{\vartheta_0} = 1$, $\overline{x}_p = 0{,}51$. Для $k = 1$, но $q_{\vartheta_0} = 10$, $\overline{x}_p = 0{,}52$.

Выводы. 1. Исследованы гидродинамические параметры потока вязкой рабочей жидкости в плоскопараллельных и конических зазорах в приводах электроэнергетических систем.

2. Найдено общее выражение для определения закономерности изменения скорости потока в зазорах бесконтактных уплотнений, а также рассмотрены частные случаи.

3. В случае фрикционного перемещения одной из стенок в зазоре наблюдается течение Куэтта.

4. При напорном воздействии на жидкость в зазоре наблюдается параболическое распределение скорости с максимумом в середине канала.

5. При совместном воздействии фрикционного перемещения стенки и напорного течения в канале наблюдается расслоение движения жидкости в противоположные стороны.

6. В конических зазорах при фрикционном течении жидкость движется в направлении возрастающего давления. В сужающихся зазорах это происходит до сечения, где давление достигает максимального значения. В расширяющихся каналах – от сечения, где наблюдается минимум давления. Вследствие этого, начиная с некоторого сечения, движение жидкости вблизи верхней наклонной стенки будет происходить в направлении, противоположном движению нижней подвижной стенки.

7. Фрикционное течение в конусных щелях, когда жидкость движется только в одном направлении, возможно при значении конусности –0,5…1,0. Во всех остальных случаях поток в щели будет иметь два противоположных направления течения.

8. Когда направление движения подвижной стенки противоположно потоку, вызванному перепадом давления Δp, то возле подвижной стенки частицы жидкости, увлекаемые силами трения, движутся вместе со стенкой. Наличие двух противоположных потоков внутри щели может быть и для случая, когда направление движения подвижной стенки совпадает с направлением напорного течения. Это вызвано повышением давления внутри зазора.

9. Найдено общее решение для силы давления в зазорах, которая стремится раздвинуть стенки, т. е. раскрыть уплотняющие поверхности. Выполнен анализ силы давления для различных случаев щелевого зазора и при различном воздействии фрикционного течения и напорного давления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крестин Е.А., Серебряков Г.В.* Гидродинамический расчет бесконтактных уплотнений с плоскими щелевыми зазорами приводов электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2021. № 2. Т.11. С. 171–177. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.02.22.

2. *Никитин Г.А., Черкун В.Е., Дидур В.А.* Повышение качества сборки плунжерных пар золотниковых распределителей // Технология и организация производства. Киев,1971. № 1. С. 77–80.

3. *Крестин Е.А.* Определение утечек жидкости через зазор бесконтактного уплотнения поршня гидравлического вибратора // Научное обозрение. 2014. № 5. С. 108–110.

4. *Васильев В.А.* Метод расчета гидродинамических сил в щелевых уплотнениях роторов мощных питательных насосов // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Машиностр. 2004. № 5. С. 115–120.

5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта и др. 5-е изд., стер. М.: Альянс, 2011. 422 с.

6. Численное исследование устойчивости течения Тейлора между двумя цилиндрами в двумерном случае / О. М. Белоцерковский [и др.] // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2009. № 4. С. 754–768.

7. Уплотнительные устройства в машиностроении / Б. Жирных [и др.]. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2017. 24 с.

8. *Никитин О.Ф.* Рабочие жидкости и уплотнительные устройства гидроприводов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 288 с.

9. Машиностроительный гидропривод / под ред. В. Н. Прокофьева; авт.: *Л.* А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев, В. Я. Скрицкий, В. *Л.* Сосонкин. М.: Машиностроение,1978. 495 с.

10. *Найгерт К.В., Редников С.Н., Япарова Н.М.* Процессы полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. Челябинск, 2016. № 46. С. 125–123.

REFERENCES

1. Krestin E.A., Serebryakov G.V. Hydrodynamic Calculation of Contactless Seals with Plane Slots in Drives of Electric Power Systems. *Gradostroitel'stvo i architektura* [Urban Construction and Architecture], Samara, 2021, no. 2(vol.11), pp. 171-177. (in Russian)

2. Nikitin G.A., Cherkun V.E., Didur V.A. Improving the quality of assembly of plunger pairs of spool valves. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva* [Technology and organization of production], Kiev,1971, no. 1, pp. 77-80.

3. Krestin E.A. Determination of fluid leaks through the gap of the contactless piston seal of the hydraulic vibrator. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review], 2014, no. 5, pp. 108-110. (in Russian)

4. Vasil'yev V.A. Method for calculating hydrodynamic forces in slot seals of rotors of powerful feed pumps. Vestnik YUUrGU. Seriya *Mashinostroyeniye* [Mechanical engineering industry]. 2004, no. 5, pp. 115-120. (in Russian)

5. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. M.: Al'yans, 2011. 422 p.

6. Belocerkovskij O. M. and others. Chislennoe issledovanie ustoychivosti techeniya Teylora mezhdu dvumya tsilindrami v dvumernom sluchae. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 2009, no. 4, pp. 754-768. (in Russian)

7. *Uplotnitel'nye ustroystva v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [Sealing devices in mechanical engineering]. M.: Izdatel'stvo MGTU im. Baumana, 2017. 24 p.

8. Nikitin O.F. *Rabochie zhidkosti i uplotnitel'nye ustroystva gidroprivodov* [Working fluids and sealing devices for hydraulic drives]. M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2013. 288 p.

9. Kondakov L. A., Nikitin G. A., Prokof'yev V. N., Skritskiy V. Ya., Sosonkin V. L. *Mashinostroitel'nyy gidroprivod* [Mechanical hydraulic drive]. M.: Mashinostroenie,1978. 495 p. (in Russian)

10. Naygert K.V. , Rednikov S.N., Yaparova N.M. The processes of polymerization of the working medium in the gaps of the spool pairs. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika: sbornik statey* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2016, no. 46, pp. 125-123. (in Russian)

Об авторах:

КРЕСТИН Евгений Александрович
кандидат технических наук, профессор
кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: krestin@bk.ru

SERЕБРЯКОВ Григорий Владимирович
студент 4 курса, факультет инженерных систем
и природоохранного строительства, направление:
гидротехническое строительство, группа Г-81
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: karately123@mail.ru

KRESTIN Evgeny A.
PhD in Engineering Science, Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: krestin@bk.ru

SEREBRYAKOV Grigoriy V.
Student
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: karately123@mail.ru

Для цитирования: *Крестин Е.А., Серебряков Г.В.* Исследование динамических характеристик потока в плоскопараллельных и конических зазорах приводов электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 4. С. 169–175. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.04.21.
For citation: Krestin E.A., Serebryakov G.V. Study of Dynamic Characteristics of Flow in Plane-Parallel and Taper Clearances of Drives of Electric Power Systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021. Vol. 11, no. 4. Pp. 169–175. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.04.21.