

## ОБОСНОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ВЫТЕСНИТЕЛЬНОЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМ ГИДРОВРАЩАТЕЛЯ ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА

**Волошина А.А.**, д.т.н., доцент

Таврический государственный агротехнологический университет

*Работа посвящена исследованию влияния зазоров между элементами вытеснительной и распределительной систем гидровращателя планетарного типа на его работоспособность.*

**Ключевые слова:** *высокомоментный гидровращатель планетарного типа, вытеснительная система, распределительная система, радиальный зазор, торцевой зазор, течение рабочей жидкости.*

**Постановка проблемы.** Физические, динамические и гидравлические процессы, протекающие в гидроагрегатах и их элементах в процессе эксплуатации, связаны с движением рабочей жидкости в трубопроводах, по каналам с местными сопротивлениями, а также через рабочие окна и щели гидравлических машин и агрегатов (возникновение колебаний давления и расходов из-за сжимаемости рабочих жидкостей, воздействие потоков жидкостей на элементы гидроагрегатов и т.д.). Поэтому наряду с основными потоками рабочей жидкости, необходимых для функционирования гидравлической системы, возникают дополнительные течения в зазорах между деталями механизмов и узлами гидравлической аппаратуры.

В этой связи возникает важная научная проблема исследования влияния гидравлических, гидродинамических и механических процессов, протекающих в вытеснительной и распределительной системах гидровращателя планетарного типа на его работоспособность.

Возможность реализации поставленной научной проблемы открывается при системном подходе, когда конструкция основных узлов, законы движения элементов вытеснительной и распределительной систем, течение рабочей жидкости в проточных частях распределительной системы, процесс заполнения рабочей жидкостью рабочих камер вытеснительной системы, гидравлические, гидродинамические и механические процессы исследуются как единое целое.

**Анализ последних исследований.** Физические, динамические и гидравлические процессы, протекающие в гидроагрегатах и их элементах [1-8] в процессе эксплуатации, связаны с движением рабочей жидкости в трубопроводах, по каналам с местными сопротивлениями, а также через рабочие окна и щели гидравлических машин и агрегатов (возникновение колебаний давления и расходов из-за сжимаемости рабочих жидкостей, воздействие потоков жидкостей на элементы гидроагрегатов и т.д.) [4].

Поэтому наряду с основными потоками рабочей жидкости,

необходимых для функционирования гидравлической системы, возникают дополнительные течения в зазорах между деталями механизмов и узлами гидравлической аппаратуры.

Анализ конструктивных особенностей гидровращателей планетарного типа показал, что в этих гидромашинах вытеснительная и распределительная системы выполнены так, что элементы вытеснительной системы одновременно являются элементами распределительной системы.

**Цель работы.** Обеспечение работоспособности гидровращателя планетарного типа путем исследования величины зазоров между элементами вытеснительной и распределительной систем.

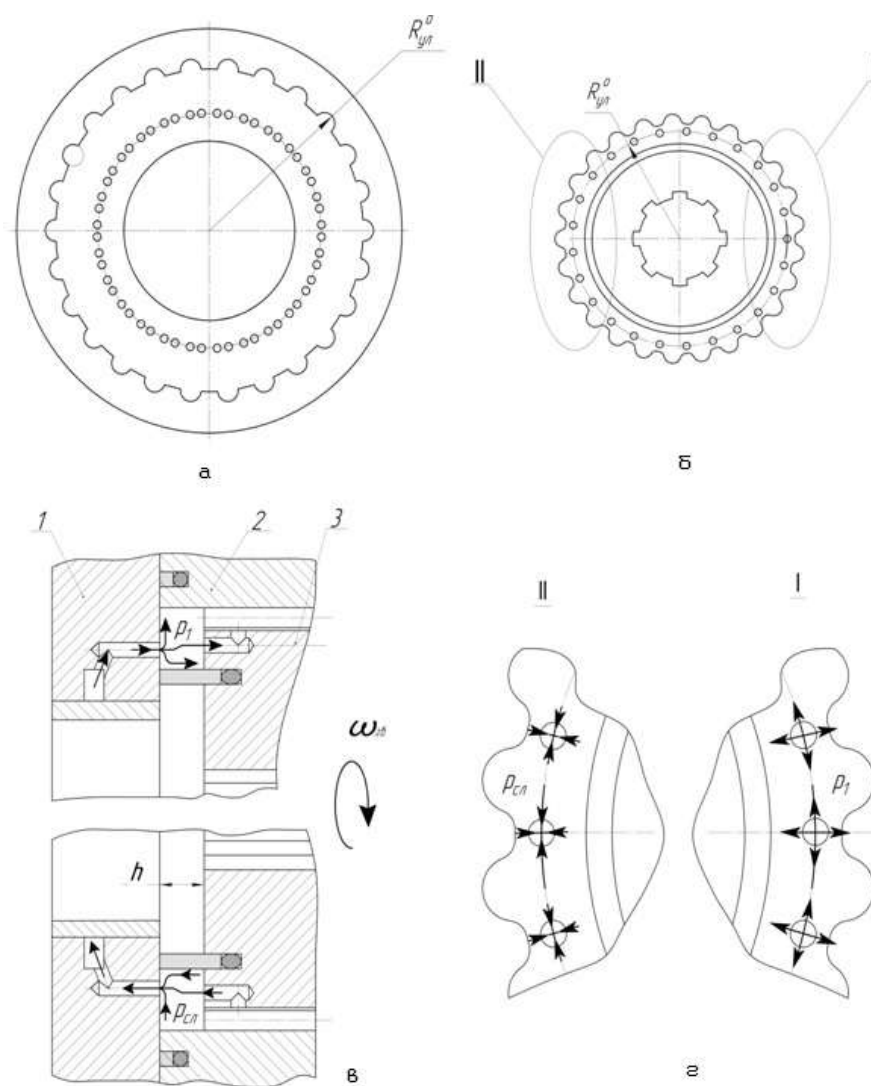
**Результат исследований.** Учитывая специфическую конструкцию гидровращателя планетарного типа определено, что торцевые утечки в исследуемой конструкции практически отсутствуют, поэтому в гидровращателе отсутствует и дренажная магистраль. Необходимо отметить, что шестерня не имеет никаких жестких кинематических связей с направляющей и поэтому при работе самоустанавливается. Таким образом, перетечки через радиальный зазор, образованный вытеснительными элементами гидровращателя планетарного типа, отсутствуют.

При определении давления и перетечек в торцевом зазоре, рассматривалось течение рабочей жидкости между вращающейся шестерней и неподвижными крышками. Считается, что течение в тонкой пленке зазора является стационарным ламинарным течением несжимаемой жидкости.

Известно, что давление рабочей жидкости между контактирующими поверхностями шестерни и крышек определяется суммой статического и динамического усилий. При этом статическое давление создает значительную часть уравновешивающей силы, а динамическая составляющая давления усиливает действие уравновешивающей силы, действующей в зазоре между торцевыми поверхностями шестерни и крышек.

При расчетах непосредственного распределения рабочей жидкости гидровращателях планетарного типа, основную трудность представляет определение перетечек через торцевой зазор образованный вытеснительными и распределительными элементами гидровращателя, а так же определение величины давления рабочей жидкости, в этом зазоре, значение которого зависит от ряда конструктивных и технологичных факторов (точности изготовления элементов вытеснительной и распределительной систем, качества рабочей жидкости и др.). Поэтому определение и нормирование торцевых зазоров в вытеснительных и распределительных элементах планетарного гидровращателя является неотъемлемой составляющей в общей цепочке факторов требующих проведения теоретических исследований.

Взяв за основу методики [9-14] определим расход рабочей жидкости через торцевой зазор и давление, действующее в нем рассмотрев течение рабочей жидкости в зазоре высотой  $h$ , образованном двумя параллельными поверхностями крышек 1 и шестерни 3 (рис. 1).



**Рис. 1. Расчетная схема определения течения рабочей жидкости в зазоре, образованном: 1 – крышками, 2 – направляющей и 3 – шестерней**

На рис. 1, а представлены торцевая поверхность одной из крышек 1 гидровращателя планетарного типа и торцевая поверхность шестерни 3 (рис. 1, б), выполняющие роль распределительного устройства. Причем, количество распределительных окон шестерни в двое меньше, чем количество окон крышки. На рис. 1, в и рис. 1, г изображены схемы движения рабочей жидкости в торцевом зазоре планетарного гидровращателя, образованном торцевыми поверхностями шестерни и крышек.

Рассмотрим течение рабочей жидкости между торцевыми поверхностями крышек, которые неподвижны и торцевой поверхностью шестерни, совершает возвратно-поступательное движение со скоростью  $\frac{dh}{dt}$  в своей плоскости (рис. 1).

Считаем, что течение в тонкой пленке зазора по кольцу, ограниченному внутренним радиусом  $R_n^0$  направляющей и внешним

радиусом уплотнения  $R_{yn}^0$  (Рис. 1) является стационарным ламинарным течением несжимаемой жидкости. Принимаем составляющую скорости вдоль оси равной  $v_z = 0$ , по окружности –  $v_\varphi = 0$ , в направлении радиуса –  $v_r = v(r, z, t)$ .

Для расчета течений рабочей жидкости в зазорах между торцевыми поверхностями элементов вытеснительной и распределительной систем гидровращателя используем известные уравнения движения несжимаемой вязкой жидкости, уравнение энергии и уравнения сплошности [12,13].

С учетом принятых допущений уравнения движения, энергии и сплошности примут вид:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v) \pm \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{dh}{dt} \right) = 0, \quad (4)$$

где  $\frac{\partial v_r}{\partial t}$  – локальная составляющая ускорения, учитывающая неустановившийся характер течения рабочей жидкости;

$v_r$  – скорость потока рабочей жидкости;

$\rho$  – плотность рабочей жидкости;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости;

$p$  – давление рабочей жидкости;

$t$  – время.

Обозначим через  $R_{cp}$  радиус, на котором давление жидкости между плоскостями, возникающее за счет скорости  $\frac{dh}{dt}$  и ускорения  $\frac{d^2h}{dt^2}$ , имеет экстремальное значение.

Из условия постоянства расхода жидкости [13] через внешний и внутренний радиусы получим

$$R_{cp} = \sqrt{\frac{R_{yn}^{0\ 2} + R_n^{0\ 2}}{2}}, \quad (5)$$

а из условий сохранения массы, рассматривая процесс, как квазистатический

$$\left| v_r \right|_{cp} = \frac{(R_{cp}^2 - r^2) dh}{2r \cdot h dt}. \quad (6)$$

Используя уравнение (6) для замены в выражении (1)  $v_r$ ,  $\frac{\partial v_r}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial v_r}{\partial r}$  и

$\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}$  получим

$$\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} = \frac{1}{v} \left[ \frac{d^2 h}{dt^2} \left( \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h} - \frac{r}{2h} \right) - \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \left( \frac{R_{cp}^4}{2r^3 \cdot h^2} + \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h^2} - \frac{r}{h^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dr} \right]. \quad (7)$$

Граничные условия:  $v_r = 0$  при  $z = 0$  и  $z = h$ . (8)

После интегрирования уравнения (7) будем иметь

$$v_r = \frac{(z^2 - h \cdot z)}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{v} \frac{d^2 h}{dt^2} \cdot \left( \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h} - \frac{r}{2h} \right) - \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \left( \frac{R_{cp}^4}{2r^3 \cdot h^2} + \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h^2} - \frac{r}{h^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dr} \right\}. \quad (9)$$

Из условий сохранения массы следует

$$-\pi \cdot (R_{cp}^2 - r^2) \frac{dh}{dt} = \int_0^h 2\pi \cdot r \cdot v_r \cdot dz. \quad (10)$$

Подставив в это уравнение значение  $v_r$  из выражения (9) и проинтегрировав, получим

$$\frac{dh}{dt} \frac{(R_{cp}^2 - r^2)}{2r} = \frac{h^3}{12} \cdot \frac{1}{v} \left[ \frac{d^2 h}{dt^2} \cdot \left( \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h} - \frac{r}{2h} \right) - \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \left( \frac{R_{cp}^4}{2r^3 \cdot h^2} + \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h^2} - \frac{r}{h^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz} \right) \right]. \quad (11)$$

Откуда

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dr} = \mu & \left[ \frac{6(R_{cp}^2 - r^2)}{r \cdot h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \right] - \rho \left[ \frac{d^2 h}{dt^2} \cdot \left( \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h} - \frac{r}{2h} \right) + \right. \\ & \left. + \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \left( \frac{R_{cp}^4}{2r^3 \cdot h^2} + \frac{R_{cp}^2}{2r \cdot h^2} - \frac{r}{h^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя уравнение (12) в выражение (9) будем иметь

$$v_r = \frac{3(R_{cp}^2 - r^2)}{r \cdot h^3} \cdot (z^2 - h \cdot z) \frac{dh}{dt}. \quad (13)$$

Теперь, используя равенство (13) для замены  $v_r$ ,  $\frac{\partial v_r}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial v_r}{\partial r}$  и  $\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}$  в

уравнении (1), получим его в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} = \frac{1}{v} & \left[ \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + \frac{9r \cdot z^4}{h^6} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 - \frac{18r \cdot z^3}{h^5} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right) \pm \frac{3r \cdot z^2}{h^3} \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} \mp \frac{3r \cdot z}{h^2} \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} + \right. \\ & + \frac{6r \cdot z}{h^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \mp \frac{3R_{cp}^2 \cdot z^2}{h^3} \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} - \frac{9R_{cp}^4 \cdot z^4}{h^6 \cdot z^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 + \frac{18R_{cp}^4 \cdot z^3}{h^5 \cdot z^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \mp \\ & \left. \mp \frac{3R_{cp}^2 \cdot z}{h^2 \cdot r} \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{9R_{cp}^2 \cdot z^2}{h^4 \cdot r} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 - \frac{9R_{cp}^4 \cdot z^2}{h^4 \cdot r^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 - \frac{6R_{cp}^2 \cdot z}{h^3 \cdot r} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Проинтегрировав уравнение (14) с учетом граничных условий (8), получим выражение для  $v_r$ ,

$$\begin{aligned}
v_r = \frac{1}{v} & \left[ \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot (z^2 - h \cdot z) + \frac{3r}{10s^6} \cdot (z^6 - h^5 \cdot z) \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 - \frac{9r \cdot (z^5 - h^4 \cdot z)}{10h^5} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \mp \right. \\
& \mp \frac{r \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4h^3} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{r \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{2h^2} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{r \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{h^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \mp \\
& \mp \frac{R_{cp}^2 \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4s^3 \cdot r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{3R_{cp}^4 \cdot (z^6 - h^5 \cdot z)}{10h^6 \cdot r^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 + \frac{9R_{cp}^4 \cdot (z^5 - h^4 \cdot z)}{10h^5 \cdot r^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \pm \\
& \pm \frac{R_{cp}^2 \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{2h^2 \cdot r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{3R_{cp}^2 \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4h^4 \cdot r} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 - \frac{3R_{cp}^4 \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4h^4 \cdot r^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 - \\
& \left. - \frac{R_{cp}^2 \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{h^3 \cdot r} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \right]. \quad (15)
\end{aligned}$$

Интегрируя обе части уравнения (4) по  $z$  в пределах от 0 до  $h$ , получаем

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \int_0^h r \cdot v_r dz \right) \pm \frac{dh}{dt} = 0. \quad (16)$$

После интегрирования этого уравнения по  $r$  будем иметь

$$\int_0^h r \cdot v_r dz = \pm \frac{r^2}{2} \cdot \frac{dh}{dt} + C, \quad (17)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Подставив в левую часть выражения (17) значение  $v$  из равенства (15) и вычислив интеграл, получим

$$\begin{aligned}
\pm \frac{r^2}{2} \cdot \frac{dh}{dt} + C = \frac{1}{v} & \left[ -\frac{h^3}{12\rho} \cdot \frac{dp}{dr} - \frac{2r \cdot h}{35} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \pm \frac{r \cdot h^2}{20} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \right. \\
& \mp \frac{R_{cp}^2 \cdot h^2}{20r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{9R_{cp}^4 \cdot h}{280r^3} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 + \left. \frac{R_{cp}^2 \cdot h}{40r} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \right], \quad (18)
\end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned}
\frac{dp}{dr} = \rho & \left[ -\frac{24r}{35h^2} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \pm \frac{3r}{5h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2}{5h \cdot r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \right. \\
& \left. + \frac{27R_{cp}^4}{40r^3 \cdot h^2} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 + \frac{3R_{cp}^2}{10r \cdot h^2} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \right] \mp \frac{6r \cdot \mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} - \frac{12\mu \cdot C}{r \cdot h^3}. \quad (19)
\end{aligned}$$

После интегрирования равенства (19) с учетом граничных условий:

Граничные условия для рассматриваемого случая:

$$\left. \begin{aligned} p &= p_{cl} \quad npu \quad r = R_{yn}^0 \\ p &= p_1 \quad npu \quad r = R_n^0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

определим величину  $C$

$$\begin{aligned}
C = & \frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0}} \cdot \left\{ \rho \left[ -\frac{12(R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{35h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \pm \frac{3(R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{10h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \right. \right. \\
& \mp \frac{3R_{cp}^2}{5h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{27R_{cp}^4}{140h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{R_n^{02}} - \frac{1}{R_{yn}^{02}}\right) + \frac{3R_{cp}^2}{10h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \frac{1}{\ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0}} - \\
& \left. \left. - (p_1 - p_{ca}) \right] \pm \frac{3\mu}{5h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02}) \right\}. \tag{21}
\end{aligned}$$

Подставив в уравнение (19) значение  $C$  получим

$$\begin{aligned}
\frac{dp}{dr} = & \rho \left[ -\frac{24r}{35h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \pm \frac{3r}{5h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2}{5h \cdot r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{27R_{cp}^4}{70r^3 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + \frac{3R_{cp}^2}{10r \cdot h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \right] \mp \\
& \mp \frac{6r \cdot \mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} - \frac{\rho}{r \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0}} \cdot \left[ -\frac{12(R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{35h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \pm \frac{3(R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{10h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2}{5h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \right. \\
& \left. - \frac{27R_{cp}^4}{140h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{R_n^{02}} - \frac{1}{R_{yn}^{02}}\right) + \frac{3R_{cp}^2}{10h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0} - \frac{(p_1 - p_{ca})}{\rho} \mp \frac{3\nu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02}) \right]. \tag{22}
\end{aligned}$$

Заменив в равенстве (15)  $\frac{dp}{dr}$  его значением из выражения (22),

получим

$$\begin{aligned}
v_r = & \frac{1}{\nu} \left\{ \frac{(z^2 - h \cdot z)}{2} \cdot \left[ -\frac{24r}{35h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \pm \frac{3r}{5h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2}{5h \cdot r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{27R_{cp}^4}{70r^3 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + \frac{3R_{cp}^2}{10r \cdot h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \right] \mp \frac{3r \cdot \nu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (z^2 - h \cdot z) - \right. \\
& - \frac{(z^2 - h \cdot z)}{2r \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0}} \cdot \left[ -\frac{12(R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{35h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \pm \frac{3(R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{10h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2}{5h} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{27R_{cp}^4}{140h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{R_n^{02}} - \frac{1}{R_{yn}^{02}}\right) + \right. \\
& \left. + \frac{3R_{cp}^2}{10h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0} - \frac{(p_1 - p_{ca})}{\rho} \mp \frac{3\nu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02}) \right] + \frac{3r}{10h^6} \cdot (z^6 - h^5 \cdot z) \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 - \frac{9r}{10h^5} \cdot (z^5 - h^4 \cdot z) \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \mp \\
& \mp \frac{r \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4h^3} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{r \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{2h^2} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{r \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{2h^2} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \mp \frac{R_{cp}^2 \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{2h^3 \cdot z} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{3R_{cp}^4 \cdot (z^6 - h^5 \cdot z)}{10h^6 \cdot r^3} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + \\
& + \frac{9R_{cp}^4 \cdot (z^5 - h^4 \cdot z)}{10h^5 \cdot r^3} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \pm \frac{R_{cp}^2 \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{2h^2 \cdot r} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} + \frac{3R_{cp}^2 \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4h^4 \cdot r} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 - \\
& \left. - \frac{3R_{cp}^4 \cdot (z^4 - h^3 \cdot z)}{4h^4 \cdot r^3} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 - \frac{R_{cp}^2 \cdot (z^3 - h^2 \cdot z)}{h^3 \cdot r} \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \right\}. \tag{23}
\end{aligned}$$

Среднее значение скорости течения рабочей жидкости в зазоре, образованном торцевыми поверхностями крышек и шестерни

$$\begin{aligned}
v_{cp} = \frac{1}{h} \int_0^h v \, dh = \frac{1}{h \cdot v} \left\{ \pm \frac{r \cdot v}{2} \cdot \frac{dh}{dt} + \frac{1}{12r \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0}} \cdot \left[ - \frac{12h \cdot (R_n^{02} - r_1^2)}{35} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \pm \right. \right. \\
\pm \frac{3h^2 \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{10} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2 \cdot h^2}{5} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{27R_{cp}^4 \cdot h}{140} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{R_n^{02}} - \frac{1}{R_{yn}^{02}} \right) + \\
\left. \left. + \frac{3R_{cp}^2 \cdot h}{10} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0} - \frac{h^3 \cdot (p_1 - p_{ca})}{\rho} \mp 3v \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02}) \right] \right\}. \quad (24)
\end{aligned}$$

Рабочая жидкость через каналы в крышках поступает в распределительные отверстия шестерни, а затем в рабочие камеры гидровращателя. Шестерня (выполняющая роль распределителя) движется между двумя крышками с равномерным (в результате уравнивания) зазором. Отработанная жидкость сливается аналогично в обратном порядке.

Таким образом, перетечки рабочей жидкости в торцевом зазоре гидровращателя можно определить выражениями:

$$\begin{aligned}
Q_{z6.n} = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot v_{cp} = \frac{2\pi \cdot r}{v} \cdot \left\{ \pm \frac{r \cdot v}{2} \cdot \frac{dh}{dt} + \frac{1}{12r \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0}} \cdot \left[ - \frac{12h \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{35} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \pm \right. \right. \\
\pm \frac{3h^2 \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02})}{10} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} \mp \frac{3R_{cp}^2 \cdot h^2}{5} \cdot \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{27R_{cp}^4 \cdot h}{140} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{R_n^{02}} - \frac{1}{R_{yn}^{02}} \right) + \\
\left. \left. + \frac{3R_{cp}^2 \cdot h}{10} \cdot \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \cdot \ln \frac{R_n^0}{R_{yn}^0} - \frac{h^3 \cdot (p_1 - p_{ca})}{\rho} \mp 3v \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (R_n^{02} - R_{yn}^{02}) \right] \right\}. \quad (25)
\end{aligned}$$

Решая уравнение (25) относительно  $p_1$ , получим выражение для определения давления рабочей жидкости в торцевом зазоре вытеснительных элементов гидровращателя.

Поскольку дифференциальные уравнения, описывающие течение рабочей жидкости, являются линейными, то гидростатодинамическую задачу можно разделить на две [15]. Давление жидкости между поверхностями шестерни и крышек является суммой статического и динамического давлений. При этом статическое давление создает значительную часть уравнивающей силы, а динамическое поле давлений усиливает действие уравнивающей силы, действующей в зазоре между поверхностями шестерни и крышек.

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволяют нормировать и обеспечить оптимальную величину торцевых зазоров, обеспечивающего работоспособность проектируемого гидровращателя планетарного типа.



**Выводы.** Математическое описание течения рабочей жидкости в зазорах между элементами вытеснительной и распределительной систем представляет собой систему дифференциальных, алгебраических, трансцендентных уравнений и неравенств, учитывает нелинейности, ограничения и погрешности моделируемых элементов, соответствующие физике их функционирования.

Проведенные теоретические исследования позволяют нормировать и обеспечить оптимальную величину торцевого зазора, обеспечивающего работоспособность проектируемого гидровращателя планетарного типа.

#### Список использованных источников

1. Зайончковський Г.Й. Оцінка динамічних властивостей гідромеханічних рульових слідкуючих приводів // Г.Й. Зайончковський / Гідравліка і пневматика, 2008. – № 1 (19). – С. 5-11.
2. Проектирование гидроагрегата с планетарным гидромотором с заданными выходными характеристиками // А.И. Панченко, В.Н. Кюрчев, А.А. Волошина, Г.И. Иванов / Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2007. – Вип. 7. – Т.4. – С. 9-23.
3. Результаты моделирования процесса перемещения жидкости в планетарных гидромашинах // А.И. Панченко, В.Н. Кюрчев, П.В. Обернихин / Труды Харьковского ДТУСГ. – Харьков, 1999.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: Учебник для вузов по специальностям «Гидропневмоавтоматика и гидропривод» и «Гидравлические машины и средства автоматизации». – 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Прокофьев В.Н. Аксиально-поршневой регулируемый гидропривод / В.Н. Прокофьев, Ю.А. Данилов, П.А. Кондаков и др. – М.: Машиностроение, 1969. – 312 с.
6. Струтинський В.Б. Імітаційне математичне моделювання дисипативних характеристик гідромеханічних систем // В.Б. Струтинський, О.В. Колот / Промислова гідравліка і пневматика, 2003. – №2. – С. 63-68.
7. Динамика планетарного гидромотора в составе гидроагрегата // А.И. Панченко, А.А. Волошина / Промислова гідравліка і пневматика, 2010. – №3(29). – С. 70-83.
8. Панченко А.І. Обґрунтування параметрів гідроприводів великої потужності для мобільної техніки // А.І. Панченко, А.А. Волошина, Г.І. Иванов, А.І. Засядько / Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2009. – Вип. 9. – Т.5. – С.47-54.
9. Визначення об'ємних витрат торцевої розподільної системи планетарної гідромашини // А.А. Волошина, С.В. Кюрчев, І.І. Мілаєва / Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2000. – Вип.2. – Т.17. – С. 95-102.
10. Скорость течения вязкой жидкости в постоянном зазоре узла поршень-цилиндр объемной гидромашини // З.Я. Лурье, И.Г. Лищенко / Вестник Харьковского государственного политехнического университета, 1999. – Вып.85. – С. 66-73.

11. Скорость течения вязкой жидкости в переменном по длине зазоре поршневой пары высокомоментного радиально-поршневого гидромотора многократного действия // З.Я. Лурье, И.Г. Лищенко / Вестник Харьковского государственного политехнического университета, 2000. – Вып.95. – С. 43-49.

12. Осипов А.Ф. Объемные гидравлические машины коловратного типа: теория, конструкция, проектирование / А.Ф. Осипов – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.

13. Осипов А.Ф. Объемные гидравлические машины: основы теории и расчет гидродинамических и тепловых процессов / А.Ф. Осипов. – М.: Машиностроение, 1966. – 160 с.

14. Панасенко С.М. Объемные потери торцового распределения аксиально-поршневой гидромашины гидропривода трансмиссии трактора // С.М. Панасенко / Сборник научных трудов Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства. – Харьков, 1999. – С. 113-120.

15. Бажин И.И. Определение зазора и потерь мощности в гидростатических опорах поршневых насосов // И.И. Бажин, Л.А. Ищенко, А.Я. Оксененко / Вестник машиностроения, 1980. – №3. – С. 8-12.

**Волошина А.А. Обґрунтування величина зазору між елементами витіснювальний і розподільчих систем гідровращателя планетарного типу**

Робота присвячена дослідженню впливу зазорів між елементами витіснювальної і розподільної систем гідрообертача планетарного типу на його працездатність.

**Ключові слова:** високомоментного гідровращатель планетарного типу, витіснювальний система, розподільна система, радіальний зазор, торцевої зазор, протягом робочої рідини.

**Voloshina A.A. Evaluation to the rational clearance between elements of displacing and distribution systems in planetary hydraulic rotors**

The article describes results of research to evaluate the rational clearance between elements of displacing and distribution systems in planetary hydraulic rotors and its efficiency.

**Keywords:** high-torque gidrovraschatel planetary type, exclusion system, the distribution system, the radial clearance, end clearance, during the working fluid.