

**А. И. ПАНЧЕНКО, А. А. ВОЛОШИНА, И. А. ПАНЧЕНКО, Ю. П. ОБЕРНИХИН**

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВРАЩАТЕЛЯ ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА**

Разработаны математический аппарат и алгоритм расчета, позволяющие определить взаимосвязь геометрических параметров распределительной системы и выходных характеристик гидровращателя планетарного типа. Представлено более полное математическое описание процессов, происходящих в распределительной системе непосредственного типа, позволяющее исследовать статические и динамические характеристики гидровращателя планетарного типа, работающего в составе гидроагрегата, с учетом влияния на него конструктивных особенностей распределительной системы.

**Ключевые слова:** высокомоментный гидровращатель планетарного типа, распределительная система, рабочие процессы, математическая модель, геометрические параметры, выходные характеристики.

**Введение.** На сегодняшний день развивающийся гидропривод мобильной сельскохозяйственной техники, предъявляет новые требования к гидромашинам вращательного действия, необходимы гидромашин с очень большими (более 5000 Н·м) крутящими моментами и очень низкими (до 10 мин<sup>-1</sup>) частотами вращения. Таким требованиям удовлетворяют гидровращатели планетарного типа, которые представляют собой совершенно новое направление в развитии планетарных гидромашин вращательного действия.

Повышения выходных характеристик гидровращателей планетарного типа при их проектировании или модернизации можно достичь путем постановки и решения важной проблемы – усовершенствование теории расчета и проектирования рабочих поверхностей распределительной системы гидровращателя планетарного типа на базе исследования влияния геометрических параметров и рабочих процессов, протекающих в распределительной системе на изменение выходных характеристики гидровращателя планетарного типа.

**Анализ основных достижений и литературы.** Одним из основных узлов гидромашин планетарного типа является распределительная система, представляющая собой устройство для подачи рабочей жидкости в рабочие камеры в строго определенной последовательности, зависящей от положения ротора в рабочей полости и ее слива.

Распределение рабочей жидкости в планетарных гидромашин может быть торцевым [1–3] путем вращающегося или неподвижного торцевого распределителя, при помощи цапфенного распределителя [4], героторным [5] и непосредственным [6, 7], когда распределение жидкости осуществляется непосредственно самим ротором.

Торцевое распределение рабочей жидкости применяется в низкооборотных гидромашин с частотой вращения выходного вала 40–50 мин<sup>-1</sup>; в среднеоборотных гидромашин с частотой вращения выходного вала 50–500 мин<sup>-1</sup>; высокооборотных гидромашин с частотой вращения выходного вала 500–1500 мин<sup>-1</sup>.

Цапфенное распределение рабочей жидкости

применяется: в среднеоборотных гидромашин с частотой вращения выходного вала 200–500 мин<sup>-1</sup>; в высокооборотных гидромашин с частотой вращения выходного вала 500–2500 мин<sup>-1</sup>.

Непосредственное распределение рабочей жидкости применяется в высокомоментных низкооборотных гидромашин (гидровращателях) с частотой вращения выходного вала 0,5–50 мин<sup>-1</sup>.

От конструкции и исполнения распределительного устройства зависят такие параметры гидромашин, как гидравлический и объемный КПД, максимальное и минимальное число оборотов, расход рабочей жидкости, а также пропускная способность гидромашин.

Априорный анализ показал, что в настоящее время планетарная гидромашин с непосредственным распределением рабочей жидкости [6, 8, 9] является наиболее компактной, простой и надежной.

При разработке общей математической модели рабочих процессов гидровращателя планетарного типа необходимо учитывать конструктивные и функциональные особенности его распределительной системы. Анализ исследований [10–12], позволил выявить важные неучтенные факторы, влияющие на полноту описания математической модели рабочих процессов распределительной системы гидровращателя планетарного типа: математическое описание потерь при течении рабочей жидкости в проточных частях распределительной системы планетарного гидровращателя при определении его геометрических параметров и выходных характеристик; повышение точности расчета гидравлических, механических и объемных потерь в планетарном гидровращателе; определение геометрических параметров элементов распределительной системы непосредственного типа для планетарных гидравлических вращателей; исследование рабочих процессов распределительной систем на базе усовершенствования математической модели гидровращателя планетарного типа в составе гидроагрегата, включающей функциональные выражения, ограничения и критерии, описывающие рабочие процессы и функционирование распределительной системы и взаимодействие ее элементов с рабочей жидкостью.

Таким образом, для исследования рабочих процессов и выходных характеристик планетарного гидровращателя, работающего в составе гидроагрегата, необходимо разработать математическую модель, описывающую рабочие процессы, происходящие в распределительной системе гидровращателя планетарного типа с учетом ее конструктивных и функциональных особенностей.

**Целью работы** является улучшение выходных характеристик гидровращателя планетарного типа, работающего в составе гидроагрегата, путем исследования рабочих процессов распределительной системы и их влияния на выходные характеристики планетарного гидровращателя на базе уточненных физической и математической моделей, учитывающих особенности функционирования и взаимное влияние элементов распределительной системы, а также особенностей рабочей жидкости.

**Основная часть.** При проектировании высокомоментного гидравлического вращателя планетарного типа, работающего в составе гидроагрегата очень важно исследовать влияние геометрических параметров элементов

распределительной системы этого гидровращателя на его выходные характеристики. Для определения геометрических параметров элементов распределительной системы, а также для изучения их влияния на изменение выходных характеристик гидровращателя планетарного типа, необходимо провести теоретические исследования системы распределения рабочей жидкости планетарных гидромашин [1, 4, 7, 13, 14].

Работу непосредственной распределительной системы схематично можно представить следующим образом: рабочая жидкость под давлением поступает в отверстия нагнетания 6 (рис. 1), выполненные в правой и левой крышках 3. Далее жидкость через распределительные отверстия 5, выполненные в шестерни поступает в рабочие камеры 4, которые образованы внутренней поверхностью направляющей 1 с роликами и внешней поверхностью шестерни 2. Под действием давления жидкости направляющая 1 начинает осуществлять сложное плоскопараллельное движение, обкатываясь по шестерне 2 и одновременно сообщая ей вращательное движение.

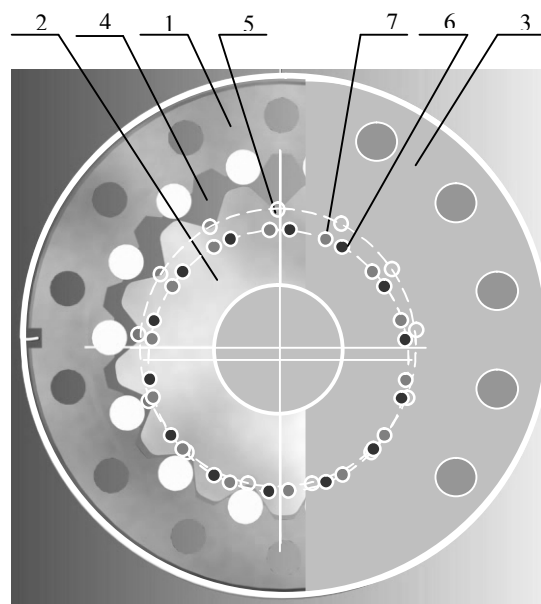


Рис. 1 – Схема непосредственной распределительной системы гидравлического вращателя планетарного типа:  
1 – корпус (направляющая); 2 – ротор (шестерня); 3 – крышки; 4 – рабочие камеры; 5 – окна распределительного устройства;  
6, 7 – окна нагнетания и слива золотникового устройства

Крышки 3 (рис. 1) представляют собой многофункциональное устройство, образующее торцевые замыкатели с элементами распределения рабочей жидкости (золотниковое устройство). Для обеспечения фазной подачи рабочей жидкости в рабочие камеры внутренней поверхности золотникового устройства (крышек 3) имеют зеркальное отражение. Характерное (плоскопараллельное с вращением) движение шестерни 2 относительно торцевых поверхностей золотникового устройства (крышек 3) обуславливает перемещение распределительных отверстий 5, выполненных в шестерни 2 (распределительное устройство) по торцевой поверхности крышки 3, в

котором выполнены отверстия нагнетания 6 и слива 7 золотникового устройства. Все это и представляет собой непосредственную распределительную систему. Основной характеристикой распределительной системы является ее пропускная способность (расход рабочей жидкости), т. е. площадь проходного сечения системы. Площадь проходного сечения складывается из площадей перекрытия окон золотникового устройства окнами распределительного устройства. Площадь проходного сечения распределительной системы зависит от количества распределительных окон, от их формы и геометрических параметров.

Под распределительным устройством понимается поверхность шестерни, на которой выполнены распределительные окна, под золотниковым устройством – поверхность крышки, на которой выполнены окна нагнетания и слива.

Для анализа работы непосредственной распределительной системы условно считаем, что крышка 1 (рис. 1) выполняет функцию золотникового устройства, которое неподвижно, а шестерня 2 –

функцию распределительного устройства, которое совершает плоскопараллельное движения с вращением.

На рис. 2 представлено наложение окон распределительного устройства на окна золотникового, при котором и происходит перекрытие распределительных окон в одно из мгновенных положений.

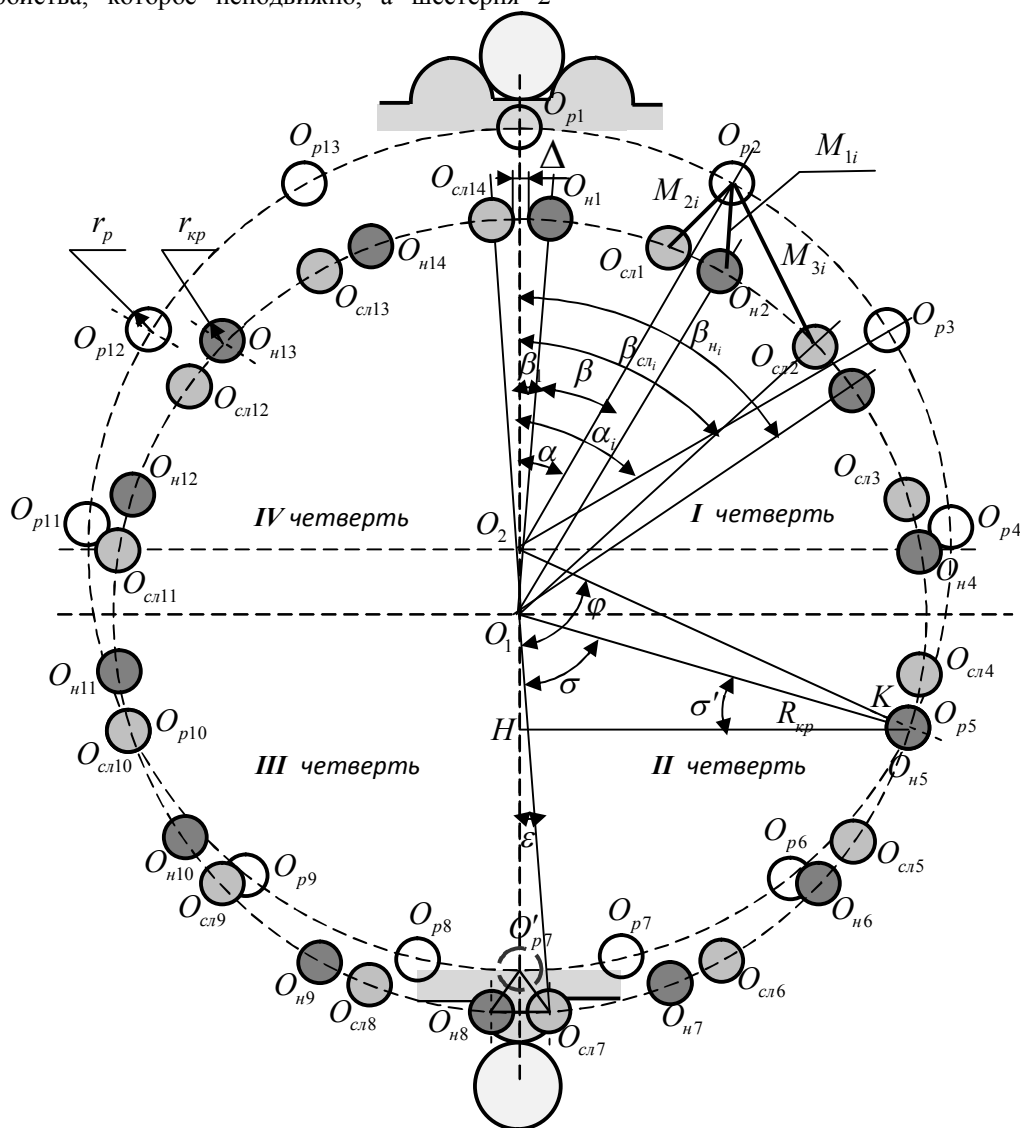


Рис. 2 – Расчетная схема определения геометрических параметров распределительной системы (крышки и шестерни) гидровращателя планетарного типа

Так же рис. 2 можно представить, как перемещение одного окна распределительного устройства по поверхности золотникового, представленной окнами нагнетания и слива, поочередно их, перекрывая и совершая гипоциклоидальное движение. Линия центров  $OO'$  (рис. 2) условно разделяет распределительную систему на зону нагнетания и зону слива, которые расположены строго симметрично, причем справа распределительные окна соединяются с окнами

нагнетания золотникового устройства, а слева – с окнами слива.

Количество окон распределительного устройства  $Z_p$  определяется количеством зубьев шестерни  $Z_w$ , т.е.  $Z_p = Z_w$ . Количество пар окон (нагнетания и слива) золотникового устройства  $Z_3$  определяется количеством зубьев направляющей  $Z_{напр.}$ , т.е.  $Z_3 = Z_{напр.}$ .

Между количеством зубьев шестерни  $Z_u$  и направляющей  $Z_{напр.}$  существует взаимосвязь  $Z_n = Z_u + 1$ , а между количеством окон распределительного  $Z_p$  и золотникового  $Z_3$  устройств –  $Z_3 = 2 \cdot (Z_p + 1)$ . Причем  $Z_3 = Z_n + Z_{сл}$ , где  $Z_n$  – количество окон нагнетания и  $Z_{сл}$  – количество окон слива золотникового устройства.

Количество циклов  $Z_u$ , обусловленное кинематическими параметрами гидровращателя планетарного типа, определяется количеством зубьев направляющей  $Z_{напр.}$ , т.е.  $Z_u = Z_{напр.}$ , при этом  $Z_3$  равно  $Z_3 = 2Z_u$ .

Примем, что окна золотникового устройства радиусом  $r_{кр}$  расположены на окружности радиусом  $R_{кр}$ , центр которой расположен в точке  $O_1$ , окна распределительного устройства радиусом  $r_p$  – на окружности радиусом  $R_u^0$  (рис. 2), центр которой расположен в точке  $O_2$ , а расстояние между центрами окружностей равно  $O_1O_2 = e$ .

При работе распределительного устройства центр  $O_2$  описывает окружность радиусом  $e$  вокруг центра  $O_1$  неподвижного золотникового устройства. При этом, за один оборот, окно радиусом  $r_p$  переместится на угол  $\alpha_1$  или совершит один цикл.

Определим основные геометрические параметры, характеризующие непосредственную распределительную систему гидровращателя планетарного типа.

Угол между окнами распределительного устройства в статическом положении равен  $\alpha = \frac{2\pi}{Z_p}$ , угол между окнами нагнетания и слива золотникового устройства –  $\beta = \frac{2\pi}{Z_3}$ .

Угол исходного смещения окон распределительного устройства от оси  $OO'$  равен  $\alpha_1 = 0$ , а золотникового устройства –  $\beta_1$ .

Текущие углы расположения окон распределительного устройства  $\alpha_i$  определяются из выражения:

$$\alpha_i = \frac{2\pi}{Z_p}(i-1), \quad (1)$$

где  $i$  – номер текущего окна распределительного устройства (шестерни).

Минимальный угол расположения первого окна нагнетания  $\beta_{1min}$  золотникового устройства определяется из выражения (рис. 2):

$$\sin \beta_{1min} = \frac{\frac{\Delta}{2} + r_{кр}}{R_{кр}}, \quad (2)$$

$$\beta_{1min} = \arcsin \left( \frac{\frac{\Delta}{2} + r_{кр}}{R_{кр}} \right). \quad (3)$$

Максимальный угол расположения первого окна нагнетания  $\beta_{1max}$  золотникового устройства определяется из выражения:  $\beta_{1max} = \frac{\pi}{Z_2}$ , т.е. угол расположения первого окна нагнетания  $\beta_1$  должен

$$\text{располагаться в пределах } \frac{\frac{\Delta}{2} + r_{кр}}{R_{кр}} \leq \beta_1 \leq \frac{\pi}{Z_2}.$$

Углы расположения текущих окон нагнетания  $\beta_{ni}$  и слива  $\beta_{сли}$  золотникового устройства будут равны:

$$\beta_{ni} = \beta_1 + \frac{2\pi}{Z_n} \cdot (i-1), \quad \beta_{сли} = \frac{2\pi}{Z_{сл}} \cdot (i-1) - \beta_1, \quad (4)$$

где  $i$  – номер текущего окна (нагнетания или слива) золотникового устройства (крышки).

Для определения радиуса  $R_{кр}$  расположения окон золотникового устройства (крышки) и радиуса  $R_u^0$  расположения окон распределительного устройства (шестерни) считаем, что окно нагнетания золотникового устройства полностью перекрыто окном распределительного устройства (т.  $K$  – центр перекрытых окон) (рис. 2).

Если радиус  $R_u^0$  расположения окон распределительного устройства известен, то радиус  $R_{кр}$  расположения окон золотникового устройства определяем из  $\Delta O_1KH$ :

$$R_{кр} = \sqrt{O_1H^2 + HK^2}, \quad O_1H = O_2H - O_1O_2,$$

где  $O_1O_2 = e$  – эксцентриситет;  $O_2H = R_u^0 \cdot \cos \varphi$ ;

$$HK = R_u^0 \cdot \sin \varphi, \quad \varphi = \pi - \alpha_i = \pi - \frac{2\pi}{Z_1} \cdot (i-1).$$

Тогда,

$$R_{кр} = \sqrt{(R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) - e)^2 + (R_u^0 \cdot \sin(\pi - \alpha_i))^2}, \quad (5)$$

$$R_{кр} = \sqrt{R_u^{02} \cdot \cos^2(\pi - \alpha_i) - 2R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) \cdot e + e^2 + R_u^{02} \cdot \sin^2(\pi - \alpha_i)} = \\ = \sqrt{R_u^{02} \cdot (\cos^2(\pi - \alpha_i) + \sin^2(\pi - \alpha_i)) - 2R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) \cdot e + e^2}.$$

Так как,  $\cos^2(\pi - \alpha_i) + \sin^2(\pi - \alpha_i) = 1$ , то

$$R_{кр} = \sqrt{R_u^{02} - 2R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) \cdot e + e^2}. \quad (6)$$

Если радиус  $R_{кр}$  расположения окон золотникового устройства известен, то определяем радиус  $R_u^0$  расположения окон распределительного устройства.

$$R_{кр}^2 = R_u^0 - 2R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) \cdot e + e^2,$$

$$R_u^0 - 2R_u^0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{Z_1} \cdot n\right) \cdot e - (R_{кр}^2 - e^2) = 0. \quad (7)$$

Обозначим,  $\cos(\pi - \alpha_i) \cdot e = B$  и  $R_{кр}^2 - e^2 = C$ .

Тогда уравнение (7) примет вид:

$$R_u^0 - 2R_u^0 \cdot B - C = 0. \quad (8)$$

Отсюда,

$$R_u^0 = B + \sqrt{B^2 + C},$$

$$R_u^0 = \cos(\pi - \alpha_i) \cdot e + \sqrt{\cos^2(\pi - \alpha_i) \cdot e^2 + R_{кр}^2 - e^2}. \quad (9)$$

При расположении распределительных окон (рис. 2) должно выполняться условие:

$$O'_{p7}O_{сг7} = r_p + r_{кр} + 0,02.$$

При определении угла между центрами окон золотникового и распределительного устройств (рис. 3) рассмотрим  $\Delta HKO_1$ .

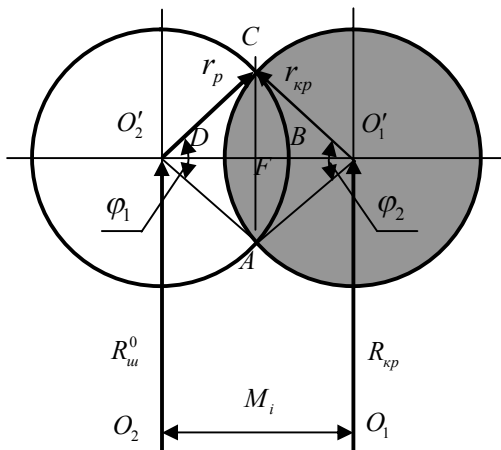


Рис. 3 – Расчетная схема определения площади перекрытия окон золотникового устройства (крышки) окнами распределительного устройства (шестерни)

$$\text{Из } \Delta HKO_1: \angle HO_1K = \varepsilon + \sigma = \frac{\pi}{2} - \sigma', \quad (10)$$

где  $\gamma$  – угол между центрами окон золотникового и распределительного устройств;

$$\sigma = \pi - \beta_{н_1} - \beta_1.$$

Из выражения (10) угол между центрами окон золотникового и распределительного устройств равен

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \sigma' - \sigma. \quad (11)$$

$$\text{Из } \Delta HKO_1: \sin \sigma' = \frac{O_1H}{O_1K},$$

где  $O_1H = O_2H - e$ ;  $O_2H = R_u^0 \cdot \cos \varphi$ ;  $O_1K = R_{кр}$ .

Тогда,

$$\sigma' = \arcsin \frac{R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) - e}{R_{кр}}, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_u^0 \cdot \cos(\pi - \alpha_i) - e}{R_{кр}} - (\pi - \beta_{н_1} - \beta_1).$$

Для определения площади перекрытия окон золотникового устройства (крышки) окнами распределительного устройства (шестерни) рассмотрим рис. 3.

Площадь перекрытия распределительных окон  $S_i$ , соответствующая площади фигуры  $ABCD$  равна:

$$S_i = S_{1i} + S_{2i}, \quad (13)$$

где  $S_{1i}$  – площадь сегмента  $ABC$ ;

$S_{2i}$  – площадь сегмента  $CDA$ .

Площадь сегмента  $ABC$  можно представить в виде разности площадей сектора  $CO_2'A$  и треугольника  $\Delta CO_2'A$ , т.е.

$$S_{1i} = S_{CO_2'A} - S_{\Delta CO_2'A}. \quad (14)$$

Площадь сектора  $CO_2'A$  равна [15]:

$$S_{CO_2'A} = \frac{\pi \cdot r_p^2 \cdot \varphi_{1i}}{360^\circ} = \frac{\pi \cdot r_p^2 \cdot \varphi_{1i}}{2\pi},$$

где  $\varphi_{1i}$  – угол, ограничивающий величину сектора  $CO_2'A$ .

После преобразований получим:

$$S_{CO_2'A} = \frac{1}{2} r_p^2 \cdot \varphi_{1i}. \quad (15)$$

$$\text{Из } \Delta CO_2'A: S_{\Delta CO_2'A} = \frac{1}{2} O_2'C \cdot O_2'A \cdot \sin \varphi_{1i}.$$

Так как  $O_2'C = O_2'A = r_u$ , то

$$S_{\Delta CO_2'A} = \frac{1}{2} r_p^2 \cdot \sin \varphi_{1i}. \quad (16)$$

Таким образом,

$$S_{1i} = \frac{r_p^2}{2} (\varphi_{1i} - \sin \varphi_{1i}). \quad (17)$$

Площадь сегмента  $CDA$  определяется аналогично:

$$S_{2i} = S_{CO_1'A} - S_{\Delta CO_1'A},$$

$$S_{CO_1'A} = \frac{1}{2} r_{кр}^2 \cdot \varphi_{2i}, S_{\Delta CO_1'A} = \frac{1}{2} r_{кр}^2 \cdot \sin \varphi_{2i},$$

где  $\varphi_{2i}$  – угол, ограничивающий величину сектора  $CDA$ .

Таким образом,

$$S_{2i} = \frac{r_{кр}^2}{2} (\varphi_{2i} - \sin \varphi_{2i}). \quad (18)$$

Тогда площадь перекрытия  $S_i$  распределительных окон золотникового и распределительного устройств, соответствующая площади фигуры  $ABCD$  равна [15]:

$$S_i = \frac{r_p^2}{2} (\varphi_{1i} - \sin \varphi_{1i}) + \frac{r_{кр}^2}{2} (\varphi_{2i} - \sin \varphi_{2i}), \quad (19)$$

а площадь проходного сечения будет равна:

$$S_{n.c.} = \sum S_i. \quad (20)$$

Для определения угла  $\varphi_{1i}$  рассмотрим  $\Delta O_1'CO_2'$ :

$$\cos \frac{\varphi_{1i}}{2} = \frac{O_1'O_2'^2 + r_p^2 - r_{kp}^2}{2O_1'O_2' \cdot r_p},$$

где  $O_1'O_2' = M_i$  – межцентровое расстояние между окнами распределительного и золотникового устройств, находящихся в перекрытии; причем должно выполняться условие  $0 \leq M_i \leq |r_p + r_{kp}|$ , иначе окна перекрываются не будут.

Тогда,

$$\varphi_{1i} = 2 \arccos \left( \frac{M_i^2 + r_p^2 - r_{kp}^2}{2M_i \cdot r_p} \right). \quad (21)$$

Для определения угла  $\varphi_{2i}$  рассмотрим  $\Delta O_1'FA$ ,

где  $AF = r_{kp} \cdot \sin \frac{\varphi_{2i}}{2}$ . Из  $\Delta O_1'FA$ :  $AF = r_p \cdot \sin \frac{\varphi_{1i}}{2}$ .

Тогда

$$\varphi_{2i} = 2 \arcsin \left( \frac{r_p}{r_{kp}} \cdot \sin \frac{\varphi_{1i}}{2} \right). \quad (22)$$

Таким образом, пропускная способность распределительной системы непосредственного типа будет определяться выражением [16, 17]:

$$S_i = \frac{r_p^2}{2} \cdot \left[ 2 \arccos \left( \frac{M_i^2 + r_p^2 - r_{kp}^2}{2M_i \cdot r_p} \right) - \sin \left( 2 \arccos \left( \frac{M_i^2 + r_p^2 - r_{kp}^2}{2M_i \cdot r_p} \right) \right) \right] + \quad (23)$$

$$+ \frac{r_{kp}^2}{2} \cdot \left[ 2 \arcsin \left( \frac{r_p}{r_{kp}} \cdot \sin \frac{\varphi_{1i}}{2} \right) - \sin \left( 2 \arcsin \left( \frac{r_p}{r_{kp}} \cdot \sin \frac{\varphi_{1i}}{2} \right) \right) \right],$$

Межцентровое расстояние между окнами распределительного и окнами нагнетания  $M_{1i}$  и слива  $M_{2i}$  золотникового устройств определяется из выражений [16] в зависимости от четверти расположения распределительных окон:

- в первой четверти при условии:

$$0 \leq \alpha_i \leq \frac{\pi}{2}; \quad 0 \leq \beta_{ni} \leq \frac{\pi}{2}; \quad 0 \leq \beta_{cti} \leq \frac{\pi}{2},$$

$$M_{1i} = \sqrt{[\pm R_{1u}^0 \cdot \cos \alpha_i \pm e \mp R_{1p} \cdot \cos \beta_{ni}]^2 + [R_{1u}^0 \cdot \sin \alpha_i - R_{1p} \cdot \sin \beta_{ni}]^2}; \quad (24)$$

$$M_{2i} = \sqrt{[R_{2u}^0 \cdot \cos \alpha_i + e - R_{2p} \cdot \cos \beta_{cti}]^2 + [\pm R_{2u}^0 \cdot \sin \alpha_i \mp R_{2p} \cdot \sin \beta_{cti}]^2}$$

- во второй четверти при условии:

$$\frac{\pi}{2} < \alpha_i \leq \pi; \quad \frac{\pi}{2} < \beta_{ni} \leq \pi; \quad \frac{\pi}{2} < \beta_{cti} \leq \pi,$$

$$M_{1i} = \sqrt{[\pm R_{1u}^0 \cdot \cos \alpha_i \mp e \mp R_{1p} \cdot \cos \beta_{ni}]^2 + [\pm R_{1p} \cdot \sin \beta_{ni} \mp R_{1u}^0 \cdot \sin \alpha_i]^2}; \quad (25)$$

$$M_{2i} = \sqrt{[\pm R_{2p} \cdot \cos \beta_{cti} \mp R_{2u}^0 \cdot \cos \alpha_i \pm e]^2 + [\pm R_{2u}^0 \cdot \sin \alpha_i \mp R_{2p} \cdot \sin \beta_{cti}]^2}$$

- в третьей четверти при условии:

$$\pi < \alpha_i \leq \frac{3\pi}{2}; \quad \pi < \beta_{ni} \leq \frac{3\pi}{2}; \quad \pi < \beta_{cti} \leq \frac{3\pi}{2},$$

из выражения (25);

- в четвертой четверти при условии:

$$\frac{3\pi}{2} < \alpha_i \leq 2\pi; \quad \frac{3\pi}{2} < \beta_{ni} \leq 2\pi; \quad \frac{3\pi}{2} < \beta_{cti} \leq 2\pi,$$

из выражения (24).

В результате проведенных исследований разработан математический аппарат и методика определения геометрических параметров элементов непосредственной распределительной системы гидровращателя планетарного типа, позволяющая определить количественное изменение площади проходного сечения в зависимости от изменения геометрических параметров элементов распределительной системы.

**Выводы.** В результате проведенных исследований разработан математический аппарат и алгоритм расчета, позволяющие определить взаимосвязь геометрических параметров распределительной системы и выходных характеристик гидровращателя планетарного типа; выполненное более полное математическое описание процессов, происходящих в распределительной системе открывает возможность исследования статических и динамических характеристик гидровращателя планетарного типа, работающего в составе гидроагрегата и определения влияния на них конструктивных особенностей распределительной системы.

Разработанная математическая модель является основой, для решения поставленной в работе научной проблемы – усовершенствование теории расчета и проектирования рабочих поверхностей распределительной системы гидровращателя планетарного типа на базе исследования влияния геометрических параметров и рабочих процессов, протекающих в распределительной системе на изменение выходных характеристики гидровращателя планетарного типа.

**Список литературы:** 1. Панченко А. И. Математическая модель торцевой распределительной системы с окнами в форме паза / А. И. Панченко, А. А. Волошина, В. М. Верещага [и др.] // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Т. 6, вип. 11. – С. 322–331. 2. Панченко А. И. Исследование влияния изменения конструктивных параметров распределительных систем на выходные характеристики планетарного гидромотора / А. И. Панченко, А. А. Волошина, И. И. Милаева // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2006. – Вип. 37. – С. 72–82. 3. Панченко А. И. Экспериментальне обґрунтування величини перекриття розподільних вікон / А. І. Панченко, В. М. Кюрчев, А. А. Волошина [та ін.] // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2001. – Т. 19, вип. 2. – С. 13–17. 4. Панченко А. И. Обоснование путей улучшения выходных характеристик планетарных гидромашин малой мощности / А. И. Панченко, А. А. Волошина, А. А. Зуев [и др.] // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Т. 3, вип. 12. – С. 15–27. 5. Волошина А. А. Конструктивные особенности и принцип работы героторных гидромашин // Науковий вісник ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Т. 5, вип. 2. – С. 220–226. – Режим доступа : <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf2t5/12vaahmo.pdf>. – Дата обращения : 5 января 2015. 6. Панченко А. И. Конструктивные особенности и принцип работы гидровращателей планетарного типа / А. И. Панченко, А. А. Волошина, В. П. Кувачев [и др.] // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Т. 3, вип. 12. – С. 174–184. 7. Панченко А. И. Обоснование путей улучшения выходных характеристик гидровращателей планетарного типа / А. И. Панченко, А. А. Волошина, И. И. Милаева [и др.] // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2009. – Т. 5, вип. 9. – С. 68–74.

8. Волошина А. А. Классификация планетарных гидромашин, применяемых в силовых гидроприводах мобильной техники / А. А. Волошина // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Т. 1, вип. 11. – С. 67–85. 9. Погорілець О. М. Гідропривод сільськогосподарської техніки / О. М. Погорілець, М. С. Волянський, В. Д. Войтюк [та ін.]. – К. : Вища освіта, 2004. – 368 с. 10. Башта Т. М. Гідравліка, гидромашини, гидроприводы : учебник для ВТУЗов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с. 11. Воронов С. А. Исследование изменения стыкового зазора в распределительном узле аксиально-поршневой гидромашини / С. А. Воронов, А. Н. Густомясов, А. Ю. Рыбаков [и др.] // Изв. вузов Машиностроения. – 1988. – № 1. – С. 77–81. 12. Панченко А. И. Математическая модель гидропривода вращательного действия / А. И. Панченко, А. А. Волошина // Науковий вісник ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Т. 1, вип. 1. – С. 10–21. – Режим доступа : <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/pdf/t1/11paidra.pdf>. – Дата обращения : 5 января 2015. 13. Волошина А. А. Влияние конструктивных особенностей распределительных систем на выходные характеристики планетарных гидромашин / А. А. Волошина // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Т. 5, вип. 12. – С. 3–9. 14. Волошина А. А. Исследование влияния формы окон торцевой распределительной системы на выходные характеристики планетарных гидромашин / А. А. Волошина, В. М. Вережца, В. В. Тарасенко [и др.] // Науковий вісник ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Т. 3, вип. 1. – С. 177–185. Режим доступа : <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/pdf/t3/11VAAPHM.pdf>. – Дата обращения : 5 января 2015. 15. Панченко А. И. Математическая модель торцевой распределительной системы с цилиндрическими окнами / А. И. Панченко, А. А. Волошина, Д. С. Титов [и др.] // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Т. 1, вип. 11. – С. 11–22. 16. Панченко А. И. Методика проектирования элементов распределительных систем гидровращателей планетарного типа / А. И. Панченко, А. А. Волошина, А. И. Засядько // Праці ТДАТУ. – Мелітополь. – 2013. – Т. 6, вип. 13. – С. 82–101. 17. Панченко А. И. Методологические основы проектирования гидравлических вращателей планетарного типа / А. И. Панченко, А. А. Волошина, И. А. Панченко // MOTROL. – Vol. 16, № 3. – P. 179–186.

**Bibliography (transliterated):** 1. Panchenko, A. I., et al. "Matematicheskaja model' torcevoj raspredelitel'noj sistemy s oknami v forme paza." *Praci TSATU*. Melitopol, 2011. No. 6.11. 322–331. Print. 2. Panchenko, A. I., A. A. Voloshina and I. I. Milaeva. "Issledovanie vlijaniya izmenenija konstruktivnyh parametrov raspredelitel'nyh sistem na vyhodnye karakteristiki planetarnogo gidromotora." *Praci TSATU*.

Melitopol, 2006. No. 37. 72–82. Print. 3. Panchenko, A. I., et al. "Eksperimental'ne obruntuvannja velichini perekrittja rozpodil'nih vikon." *Praci TSATU*. – Melitopol, 2001. No. 19.2. 13–17. Print. 4. Panchenko, A. I., et al. "Obosnovanie putej uluchshenija vyhodnyh charakteristik planetarnykh gidromashin maloj moshnosti." *Praci TSATU*. Melitopol, 2012. No. 3.12. 15–27. Print. 5. Voloshina, A. A. "Konstruktivnye osobennosti i princip raboty gerotornyx gidromashin." *Naukovij visnik TSATU*. Melitopol, 2012. No. 5.2. 220–226. Web. 5 January 2015 <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/pdf/t5/12vaahmo.pdf>. 6. Panchenko, A. I., et al. "Konstruktivnye osobennosti i princip raboty gidrovrashhatelej planetarnogo tipa." *Praci TSATU*. Melitopol, 2012. No. 3.12. 174–184. Print. 7. Panchenko, A. I., et al. "Obosnovanie putej uluchshenija vyhodnyh charakteristik gidrovrashhatelej planetarnogo tipa." *Praci TSATU*. Melitopol, 2009. No. 5.9. 68–74. Print. 8. Voloshina, A. A. "Klassifikacija planetarnykh gidromashin, primenjaemykh v silovykh gidroprivodakh mobil'noj tehniki." *Praci TSATU*. Melitopol, 2011. No. 1.11. 67–85. Print. 9. Pogorilec', O. M., et al. *Gidroprivod sil's'kogospodars'koj tehniki*. Kiev : Vishha osvita, 2004. Print. 10. Bashta, T. M., et al. *Gidravlika, gidromashiny, gidroprivody*. Moscow : Mashinostroenie, 1982. Print. 11. Voronov, S. A., et al. "Issledovanie izmenenija stykovogo zazora v raspredelitel'nom uzle aksial'no-porshnevoj gidromashiny." *Izv. vuzov Mashinostroenija*. No. 1. 1988. 77–81. Print. 12. Panchenko, A. I., and A. A. Voloshina. "Matematicheskaja model' gidroprivoda vrashhatelej nogo dejstvija." *Naukovij visnik TSATU*. Melitopol, 2011. No. 1.1. 10–21. Web. 5 January 2015 <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/pdf/t1/11paidra.pdf>. 13. Voloshina, A. A. "Vlijanie konstruktivnykh osobennostej raspredelitel'nykh sistem na vyhodnye karakteristiki planetarnykh gidromashin." *Praci TSATU*. Melitopol, 2012. No. 5.12. 3–9. Print. 14. Voloshina, A. A., et al. "Issledovanie vlijaniya formy okon torcevoj raspredelitel'noj sistemy na vyhodnye karakteristiki planetarnykh gidromashin." *Naukovij visnik TSATU*. Melitopol, 2011. – No. 3.1. 177–185. Web. 5 January 2015 <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/pdf/t3/11VAAPHM.pdf>. 15. Panchenko, A. I., et al. "Matematicheskaja model' torcevoj raspredelitel'noj sistemy s cilindricheskimi oknami." *Praci TSATU*. Melitopol, 2011. No. 1.11. 11–22. Print. 16. Panchenko, A. I., A. A. Voloshina and A. I. Zasad'ko. "Metodika proektirovaniya jelementov raspredelitel'nyh sistem gidrovrashhatelej planetarnogo tipa." *Praci TSATU*. Melitopol, 2013. No. 6.13. 82–101. Print. 17. Panchenko, A. I., A. A. Voloshina and I. A. Panchenko. "Metodologicheskiye osnovy proyektirovaniya gidravlicheskikh vrashhatelej planetarnogo tipa." *MOTROL*. No. 16.3. 179–186. Print.

Поступила (received) 13.02.15

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Панченко Анатолій Іванович** – доктор технічних наук, професор, Тавричеський державний аграрно-технологічний університет, завідувач кафедри мобільних енергетических засобів, г. Мелітополь; тел.: (097) 554-05-00; e-mail: [tia\\_tgata@bk.ru](mailto:tia_tgata@bk.ru).

**Panchenko Anatoly Ivanovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Tavria State Agrotechnological University, Head at the Department of mobile power means, Melitopol; tel.: (097) 554-05-00; e-mail: [tia\\_tgata@bk.ru](mailto:tia_tgata@bk.ru).

**Волошина Анжела Анатольевна** – доктор технічних наук, професор, Тавричеський державний аграрно-технологічний університет, професор кафедри мобільних енергетических засобів, г. Мелітополь; тел.: (097) 526-26-03, e-mail: [voloshinaa2012@gmail.com](mailto:voloshinaa2012@gmail.com).

**Voloshina Angela Anatolievna** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Tavria State Agrotechnological University, Professor at the Department of mobile power means, Melitopol; tel.: (097) 526-26-03; e-mail: [voloshinaa2012@gmail.com](mailto:voloshinaa2012@gmail.com).

**Панченко Ігорь Анатольевич** – асистент, Тавричеський державний аграрно-технологічний університет, асистент кафедри мобільних енергетических засобів, г. Мелітополь; тел.: (096) 121-40-87, e-mail: [tia\\_tgata@bk.ru](mailto:tia_tgata@bk.ru).

**Panchenko Igor Anatolievich** – Assistant, Tavria State Agrotechnological University, Assistant at the Department of mobile power means, Melitopol; tel.: (096) 121-40-87, e-mail: [tia\\_tgata@bk.ru](mailto:tia_tgata@bk.ru).

**Обернихин Юрий Павлович** – аспірант, Тавричеський державний аграрно-технологічний університет, аспірант кафедри мобільних енергетических засобів, г. Мелітополь; тел.: (097) 751-92-58; e-mail: [tia\\_tgata@bk.ru](mailto:tia_tgata@bk.ru).

**Obernikhin Yuriy Pavlovich** – Graduate student, Tavria State Agrotechnological University, Graduate student at the Department of mobile power means, Melitopol; tel.: (097) 751-92-58, e-mail: [tia\\_tgata@bk.ru](mailto:tia_tgata@bk.ru).