

УДК 625.745.55

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ГИДРОЦИКЛОНА

**Бушуев Юрий Алексеевич**

магистрант

**Дьячков Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент

[dsv13.06@mail.ru](mailto:dsv13.06@mail.ru)

**Соловьёв Сергей Владимирович**

доктор сельскохозяйственных наук, доцент

[sergsol6800@yandex.ru](mailto:sergsol6800@yandex.ru)

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

**Аннотация.** В статье рассмотрены результаты теоретических исследований гидроциклона. В результате проведенных теоретических исследований для дополнительной очистки гидравлической жидкости в гидроприводе транспортно-технологических машин авторами предложено использование гидроциклона.

**Ключевые слова:** транспортно-технологические машины, гидропривод, гидроциклон, масла, очистка масел.

Гидропривод позволяет: реализовать большие передаточные отношения от ведущего звена источника энергии к рабочим механизмам и органам машины без применения громоздких и сложных по кинематике устройств, обеспечивать простое преобразование вращательного движения в поступательное, применять автоматическое и полуавтоматическое управление, использование которого улучшает условия труда машиниста и повышает качество выполняемых работ [1, 2].

Критически важной для гидропривода является очистка рабочей жидкости от содержащихся в ней (и постоянно образующихся в процессе работы) абразивных частиц. Поэтому системы гидропривода обязательно содержат фильтрующие устройства (например, масляные фильтры).

Используемые в настоящее время различные технические средства для очистки отработанных масел не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям к качеству очистки. Поэтому актуальны исследования по разработке технического средства для дополнительной очистки масла в гидроприводе, применение которого повысит срок его эксплуатации [2, 3].

Рассмотрим процесс очистки рабочей жидкости гидроагрегатов в гидроциклоне. На частицу, находящуюся в потоке рабочей жидкости в гидроциклоне, действуют следующие силы (рисунок 1): центробежная  $P_{ц}$ , отбрасывающая частицу к периферии; радиальная сила  $P_r$ , возникающая от действия радиального потока жидкости и действующая в направлении оси аппарата; сила Кориолиса  $P_k$  которая перемещает частицу в окружном направлении относительно потока; сила сопротивления среды  $P_c$  препятствующая осаждению частицы; сила инерции  $P_{и}$ , образующаяся вследствие изменения скорости осаждения. Под действием данных сил, скорость движения частицы в любой точке гидроциклона может быть разложена на следующие три составляющие (рисунок.2):  $v_l$  - тангенциальную скорость, направленную перпендикулярно радиусу вращения в данной точке на горизонтальной плоскости;  $v_r$ - радиальную скорость, направленную по радиусу

гидроциклона внутрь его;  $v_z$ - осевую или вертикальную скорость, направленную под прямым углом к  $v_t$  и  $v_r$  вдоль оси гидроциклона.

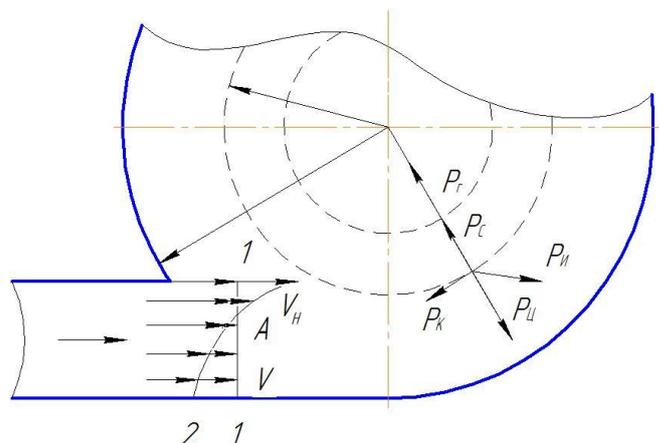


Рисунок 1 - Силы, действующие на частицу в спиральном потоке в гидроциклоне

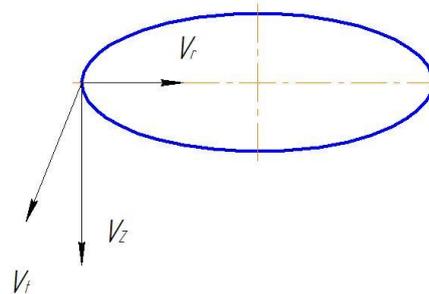


Рисунок 2 - Скорости, действующие на частицу в гидроциклоне

В каждой точке гидроциклона в плоскости, перпендикулярной его оси, скорость частицы загрязнений  $v$  можно разложить на две составляющие (рисунок 2): тангенциальную  $v_t$  и радиальную  $v_r$  скорости. Исходя из этого, уравнение радиального движения частицы в гидроциклоне можно записать следующим образом [4, 5]:

$$m_{\text{ч}} \frac{d^2 r}{dt^2} = m_{\text{ч}} \left( \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right) \frac{v_t^2(r)}{r} - \mu \left( \frac{dr}{dt} - v_t(r) \right) + \xi(t), \quad (1)$$

где  $m_{\text{ч}}$ - масса частицы, кг;

$r$  - радиус вращения частицы, м;

$\rho_{\text{ч}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$ -плотность, соответственно частицы и жидкой среды, кг/м<sup>3</sup>;

$v_t(r)$  - функция, описывающая распределение тангенциального компонента скорости частицы в потоке;

$\mu$  - кинематическая вязкость среды, м<sup>2</sup>/с;

$v_r(r)$  - функция, описывающая распределение радиального компонента скорости частицы в потоке;

$\xi(t)$  - функция времени, учитывающая случайную составляющую скорости, вызванную стесненностью движения частиц и их взаимными столкновениями.

С учетом граничных условий  $W(t,r) = 0$  при  $r = ztga$  и  $r=r_0$ , и безразмерных параметров, влияющих на процесс отделения частицы  $\bar{r}_0, \bar{\alpha}, \bar{\gamma}$  уравнение движения частицы принимает вид

$$\frac{d\bar{W}}{d\bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left[ - \left( \frac{l}{r^3} - \frac{\bar{\gamma}}{\bar{r}} \right) \bar{W} + \frac{1}{2a} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} \right] \quad (2)$$

Тогда унос частиц через сливной патрубков, выраженный в долях единицы от общего числа частиц, поступающих с очищаемым маслом:

$$\bar{G}(\bar{t}, \bar{r}) = \left[ - \left( \frac{l}{r^3} - \frac{\bar{\gamma}}{\bar{r}} \right) \bar{W} + \frac{1}{2a} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} \right] \quad (3)$$

Тогда количество выносимых частиц, % [5, 6],

$$S_B(\bar{t}) = \frac{1}{2a} \int_0^1 \bar{G}(\bar{t}, \bar{r}) dt, \quad (4)$$

где  $R_{\omega}$  - радиус гидроциклона, м;  $r$  - радиус вращения частицы, м;  $\bar{\alpha}$ - параметр, характеризующий очищаемый материал;  $\bar{\gamma}$ - параметр, характеризующий пропускную возможность гидроциклона;  $t$  - время нахождения частицы в гидроциклоне, ч.

Таким образом, качество очистки, определяемое массовым содержанием частиц в потоке масла, удаляемого через нижнее сливное отверстие, зависит от времени  $t$  нахождения частицы в гидроциклоне и радиуса  $r = r_0$ , то есть, от радиуса поверхности нулевой осевой скорости, определяющей разделение потока масла и унос частиц через верхнее или нижнее сливные отверстия.

Примем, что частица в потоке гидроциклона должна находиться во взвешенном состоянии на определенном расстоянии от центра вращения, где будет выполняться условие  $P_{\omega} = P_r$  (центробежная сила равна радиальной). В этом случае формируется ряд поверхностей траекторий перемещения групп частиц по их весу: тяжелые частицы будут располагаться ближе к периферии, а легкие - к центру гидроциклона [7, 8].

Совпадение поверхности частиц с плоскостью нулевой вертикальной скорости определяет степень очистки. Качество очистки (доля частиц

примесей, попавших в поток очищенного масла) в таком случае будет формироваться пространственно-геометрическими параметрами поверхности нулевой вертикальной скорости [9]. Сформулировав уравнение плоскости нулевой вертикальной скорости частиц, можно обосновать оптимальные конструктивные размеры гидроциклона и рациональные технологические режимы его работы для заданного качества и производительности очистки масла.

Осевая скорость частицы в потоке гидроциклона

$$V_z = \frac{L}{4\pi \cos \frac{\alpha_1}{2}} \int_0^{H-H_I} \int_0^{2\pi} \frac{\left[ \left( R_0 - htg \frac{\alpha_1}{2} \right) - \left( R_0 - htg \frac{\alpha_1}{2} \right) R \cos \beta \right]}{\left[ (h-z)^2 + \left( R_0 - htg \frac{\alpha_1}{2} \right)^2 + R^2 - 2R \cos \beta \left( R_0 - htg \frac{\alpha_1}{2} \right) \right]^{3/2}} dz d\beta \quad (5)$$

где  $L = 2\pi r v_1 = \text{const}$  - циркуляция скорости на единицу высоты тороида,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $R_0$  - радиус поверхности нулевых осевых скоростей на границе цилиндрической и конической частей гидроциклона, м;  $R_r$  - радиус гидроциклона, м;  $r_0$  - радиус воздушного столба ( $r_0 = 0,606r_c$ ), м;  $r_c$  - радиус отвода очищенного масла, м;  $r_n$  - радиус сливного патрубка, м;  $\alpha_1$  - угол конусности гидроциклона, град.;  $\beta$  - угол смещения точки при движении в вихревом слое на высоту  $(h-z)$ , град;  $h$  - расстояние от рассматриваемого кольцевого сечения от начала вихревого слоя (т.е. до верхней крышки цилиндрической части гидроциклона), м;  $H$  - высота конической части гидроциклона, м;  $H_I$  - высота цилиндрической части гидроциклона, м.

Поскольку перемещение частицы зависит от радиальной скорости, т. е. от центробежной и радиальной сил, определим, в какой точке координат по линии  $R$  радиуса выбранного сечения тороида, центробежная сила будет либо превосходить радиальную, либо будет меньше её. Соответственно, в числовом выражении, это перемещение будет определять изменение математического знака скорости либо в положительную, либо в отрицательную сторону. Таким образом, в том случае, если скорость будет иметь отрицательное значение, частица, находящаяся в вихревом потоке, будет отброшена к стенке гидроциклона и удалена через нижнее сливное отверстие. В том случае, если

скорость положительная, то частица будет подхвачена внутренним вихревым потоком и вынесена через верхнее выходное отверстие.

Координата, соответствующая точке изменения отрицательного значения скорости на положительное, будет являться координатой нулевой вихревой поверхности в заданном (или рассматриваемом) горизонтальном сечении гидроциклона и будет определять степень очистки продукта от примесей.

После определения координат изменения положения частицы в потоке гидроциклона и расчета коэффициентов регрессии получено квадратичное уравнение осевой скорости частицы в потоке. После подстановки в него граничных значений переменных, определенных для данных конкретных условий

( $h = 0,01-0,18$  м,  $R_0 = 0,02$  м,  $r_0 = 0,017$  м,  $\alpha = 5^\circ 2'$ ,  $H+H_0 = 0,302$  м,  $\beta = 100-120^\circ$ ,  $R = 0,018-0,046$  м), и преобразования, получена теоретическая зависимость осевой скорости частицы в потоке, от конструктивно-технологических параметров гидроциклона в зависимости от необходимых значений качества очистки масла:

$$V_z = U = -274,524 - 19769,382r - 138,852z + 31610,804C + \quad (6)$$

$$+ 1373,869R_0 + 227914,938r^2 - 17399,748z^2 - 158262,452C^2 - 88475,754R^2$$

Для расчетов радиуса граничного слоя (нулевой поверхности), получена зависимость параметров гидроциклона: радиуса  $R$ , высоты (как функции производительности)

$C$  от координаты частицы в потоке очистки  $z$ :

$$R = 0,0385 - 0,833r - 0,0072z - 0,347C, \quad (7)$$

Заменив диаметр гидроциклона  $D$  на  $2R_0$  получим:

$$\delta_{ч.min} = \sqrt{\frac{36v_c \mu R_0}{2,5v_H^2 \rho_{ч}}} \quad (8)$$

Полученная зависимость наглядно показывает связь каждой величины, входящей в подкоренное выражение, с размером частиц, сепарируемых в спиральном потоке гидроциклона. При этом, с увеличением радиуса нулевой поверхности размер отделяемых частиц будет увеличиваться. Поэтому, для

улавливания мелкодисперсных частиц следует применять гидроциклоны уменьшенных диаметров. Увеличение начальной скорости потока очищаемого масла  $V_H$  также способствует сепарации более мелких частиц.

Теоретические исследования проводились на основании задания граничных условий указывающих на отсутствие перемещения частицы вдоль радиуса вращения ( $r$ ) при достижении ими стенки  $r = R_{ц}$  гидроциклона, границы зоны противотока  $r = r_0$ , соответствующее радиусу воздушного столба ( $r_0$ ), определяющие унос частиц в приспособление для отвода очищенного масла и перемещения частицы в спиральном потоке гидроциклона (рисунок 3).

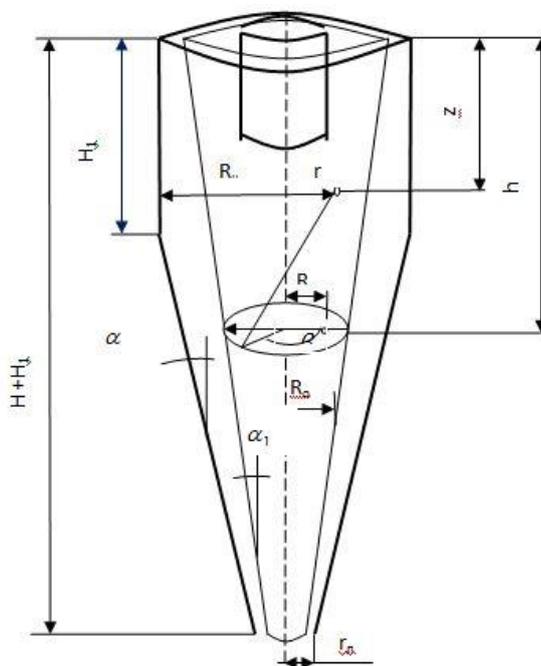


Рисунок 3 - Расчетная схема определения перемещения частицы в потоке гидроциклона

Предположив, что отсутствует вертикальное воздействие на частицу в потоке гидроциклона, то каждая частица будет находиться во взвешенном состоянии на определенном расстоянии от центра вращения, то есть на расстоянии, где центробежная сила будет равна радиальной силе  $R_{ц} = Pr$ . Более тяжелые частицы будут располагаться ближе к периферии гидроциклона, а легкие – у его центра [5, 7, 8]. Во внутренней конической полости гидроциклона траектории каждой группы частиц, находящихся в потоке масла, при движении будут образовывать криволинейную поверхность. Точки нулевой

вертикальной скорости, то есть границы смены знаков вертикальной скорости, тоже создают криволинейную поверхность. Пересечение или совпадение плоскости вертикальной скорости с плоскостью какой-либо группы частиц даст величину граничного зерна, причем большее зерно будет уходить в слив, а меньшее – в чистый поток. Определив уравнение плоскости нулевой вертикальной скорости, можно рассчитать основные геометрические размеры гидроциклона, обеспечивающие заданную степень очистки.

В результате проведенных теоретических исследований было установлено, что качество очистки, определяемое массовым содержанием частиц в потоке масла, удаляемого через нижнее сливное отверстие, зависит от времени нахождения частицы в гидроциклоне и радиуса поверхности нулевой осевой скорости, определяющей разделение потока масла и унос частиц через верхнее или нижнее сливные отверстия. На основании этого качество очистки формируется пространственно-геометрическими параметрами поверхности нулевой вертикальной скорости. Далее получаем уравнение плоскости нулевой вертикальной скорости частиц, на основании которого обосновываем оптимальные конструктивные размеры гидроциклона и рациональные технологические режимы его работы для заданного качества и производительности очистки масла. По полученному радиусу нулевой поверхности можно определить размер граничного (отделяемого) зерна примеси [7]:

$$d_{ч. \min} = \sqrt{\frac{36v_c \mu R_o}{2,5v_n^2 \rho_ч}}$$

где  $d_{ч}$ - диаметр отделяемой частицы, м;  $V_c$  - скорость сепарации, м/с;  $\mu$  - кинематическая вязкость масла, м<sup>2</sup>/с;  $R_o$  - радиус нулевой поверхности гидроциклона, м;  $V_n^2$  - начальная скорость потока масла на входе в гидроциклон, м/с;  $\rho_ч$  - плотность частицы нерастворимой примеси, кг/м<sup>3</sup>.

Полученная зависимость показала, что с уменьшением радиуса нулевой поверхности размер отделяемых частиц уменьшается.

На основании проведенных теоретических исследований был создан опытный образец гидроциклона, на котором были проведены испытания в лабораторных условиях.

В результате установлены оптимальные конструктивные параметры гидроциклона и рациональные технологические режимы, которые обеспечивают степень очистки масел в пределах 88 ... 92 %.

Это дает основание считать предложенный гидроциклон перспективным при использовании в сельскохозяйственных, автотранспортных предприятиях и организациях занимающихся переработкой и утилизацией нефтяных отходов.

В результате проведенных теоретических исследований нами предложен гидроциклон с высокой степенью очистки от нерастворимых примесей для высоковязких отработанных технических масел; установлена зависимость степени очистки от конструктивных параметров гидроциклона; установлены оптимальные конструктивные параметры гидроциклона и рациональные технологические режимы, которые обеспечивают степень очистки масел в пределах 88 ... 92 %; выявлено, что с увеличением радиуса нулевой поверхности размер отделяемых частиц будет увеличиваться. Поэтому, для улавливания мелкодисперсных частиц следует применять гидроциклоны уменьшенных диаметров.

#### **Список литературы:**

1. Глущенко, А.А. Результаты испытаний гидроциклона для очистки масел/ А.А. Глущенко // Известия СПбГАУ/ , - СПб, 2008. - № 12 . – С. 254-258.
2. Исследование параметров устройства выгрузки вертикальных компостирующих установок / М.С. Колдин, В.В. Миронов, К.А. Манаенков // Вестник сельского развития и социальной политики. - 2017. - № 2 (14). - С. 24-30.

3. К вопросу об очистке сахарной свеклы при уборке в условиях ЦЧР / В.И. Горшенин, П.Н. Кузнецов, Н.В. Михеев, С.В. Соловьёв // Наука в центральной России. – 2017. – № 2 (26). С. 13-21.
4. Дроздов, В.С. Техническое средство консервации машин для разбрасывания пескосоляной смеси при постановке их на длительное хранение/ В.С. Дроздов, С.В. Соловьёв // Наука и образование – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 207.
5. Глущенко, А.А., Обоснование параметров гидроциклона для очистки отработанных масел / А.А. Глущенко // Вестник МГАУ./ Агроинженерия. 2009.- №3, С. 82-85.
6. Консервация машин для разбрасывания пескосоляной смеси / В.И. Горшенин, В.Ю. Ланцев, С.В. Соловьёв, [ и др.] //Наука и Образование. – 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 45.
7. Теоретические предпосылки к исследованию устройства для нанесения антигравийных покрытий на кузовные элементы транспортно-технологических машин / А.А Кондрашин, С.В. Дьячков, С.В. Соловьёв, А.А. Бахарев, А.Г. Абросимов // Наука и образование. – 2020. – Т.3. - №2. – С. 189
8. Гутман, Б. М. Расчет гидроциклонных установок для нефтедобывающей промышленности/ Б.М. Гутман, В.П. Ершов, А.М. Мустафьев. – Баку: Азернешр, 1983. - №3- 109 с.
9. Горшенин, В.И. Машина для бесконтактной мойки дорожных ограждений / В.И. Горшенин, В.Ю. Ланцев, С.В. Дьячков, С.В. Соловьёв // Наука и образование– 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 24.

**UDC 625.745.55**

## **THEORETICAL BACKGROUND TO THE STUDY OF THE HYDROCYCLONE**

**Bushuev Yuri Alekseevich**

master's student

**Dyachkov Sergey Vladimirovich**

candidate of Technical Sciences, Associate Professor of

[dsv13.06@mail.ru](mailto:dsv13.06@mail.ru)

**Solovyov Sergey Vladimirovich**

doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor

[sergsol6800@yandex.ru](mailto:sergsol6800@yandex.ru)

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

**Annotation.** The article considers the results of theoretical studies of the hydrocyclone. As a result of the theoretical studies carried out, the authors proposed the use of a hydrocyclone for additional cleaning of hydraulic fluid in the hydraulic drive of transport and technological machines.

**Key words:** transport and technological machines, hydraulic drive, hydrocyclone, oils, oil purification.