

**К ВОПРОСУ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ ОТ
НЕРАСТВОРИМЫХ ПРИМЕСЕЙ В ГИДРОЦИКЛОНЕ**
Глушченко А.А., Молочников Д.Е., Яковлев С.А., Гаязиев И.Н.

Реферат. Рассмотрена возможность использования для очистки отработанных масел гидроциклонных установок. Теоретически обоснована зависимость степени очистки отработанных масел от нерастворимых примесей, определяемое массовым содержанием частиц в потоке масла, удаляемого через нижнее сливное отверстие, 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.

Ключевые слова: гидроциклон, очистка масла, силы, действующие на частицу, критерий сепарации, геометрические параметры.

Введение. Рациональное и экономное применение нефтепродуктов и обострившиеся проблемы охраны окружающей среды ставят задачи по вторичному использованию отработанных продуктов нефтяной промышленности. Регенерация и возвращение в оборот отработанных моторных масел – один из эффективных путей решения этой актуальной задачи.

Анализ и обсуждения результатов. Одним из важнейших этапов восстановления отработанных масел является их очистка от различного рода загрязнений (продуктов износа, термического разложения масел и др.). В настоящее время наиболее широко в виде технических средств очистки используются сепараторы и центрифуги. Однако, при высокой эффективности, они имеют ряд недостатков. Наиболее перспективным является использование для этих целей гидроциклонов.

Гидроциклон (рисунок 1) представляет собой аппарат, состоящий из цилиндрической части 1, к которой снизу примыкает широким основанием коническая часть 7, а сверху крепится промежуточная сливная камера 3 с патрубком для отвода верхнего продукта. Между цилиндрической частью и сливной камерой устанавливается диафрагма 6, а в нижней части конуса закрепляются сменные насадки 8 [1].

Процесс разделения отработанных масел на фракции в гидроциклоне может быть представлен следующим образом. На частицу, находящуюся в потоке жидкости в гидроциклоне, действуют следующие силы (рисунок 2): центробежная $P_{ц}$, отбрасывающая частицу к периферии; радиальная сила P_r , возникающая от действия радиального потока жидкости и направленная к оси аппарата; сила Кориолиса P_k .

Данная сила перемещает частицу в окружном направлении относительно потока; сила сопротивления среды P_c , препятствующая осаждению частицы; сила инерции P_u , образую-

щаяся вследствие изменения скорости осаждения [2].

Если вследствие малости частицы, принять, что она увлекается потоком во вращательное движение с угловой скоростью ω , то основная действующая на нее сила – центробежная [3]:

$$P_{ц} = m_{ч} \omega^2 r_{г} = \frac{\pi d_{ч}^2 \rho_{ч} \omega^2 r_{г}}{6} = \frac{\pi d_{ч}^2 \rho_{ч} v^2}{6 r_{г}}, \quad (1)$$

где $m_{ч}$ – масса частицы, кг; ω – угловая скорость вращения, c^{-1} ; $r_{г}$ – радиус вращения частицы, м; $\rho_{ч}$ – плотность частицы, $кг/м^3$; v – линейная локальная скорость потока, м/с.

Сила инерции P_u обусловлена изменением относительной скорости частицы в потоке среды при перестройке профиля скорости частицы на входе в цилиндрическую часть гидроциклона. Поток жидкости входит в циклон с начальной скоростью v_i (скорость жидкости во входном патрубке циклона); затем профиль скорости изменяется по линии 1-1 (рисунок

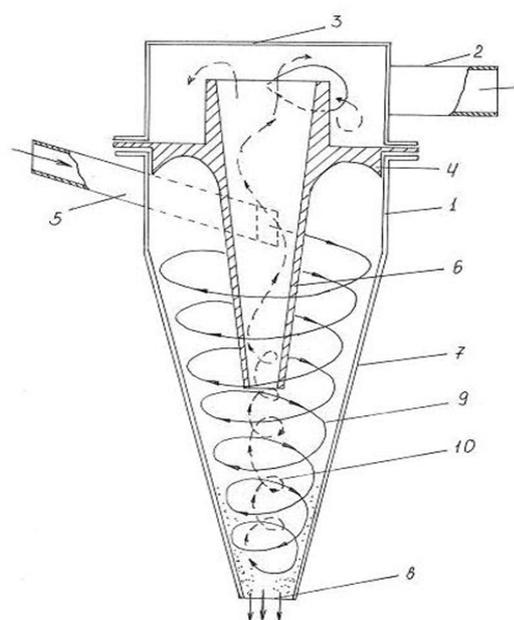


Рисунок 1 – Схема гидроциклона

2).

При переходе жидкости в искривленный канал входного патрубка, профиль скорости v изменяется (рисунок 2 линия 2-2) и ее распределение по сечению входного канала соответствует закону [4]:

$$vr^n = const, \quad (2)$$

где n – показатель свободы.

Большинство исследователей принимает $n = 1$ [1-5].

Скоростью сепарации частиц называют вектор \overline{v}_c , равный разности векторов [6]:

$$\overline{v}_c = \overline{v}_n - \overline{v}(r), \quad (3)$$

где \overline{v}_n – вектор скорости потока на входе в цилиндрическую часть гидроциклона, м/с; $\overline{v}(r)$ – вектор скорости частицы по радиусу гидроциклона, м/с.

Вследствие изменения скорости сепарации частицы появляется дополнительная сила инерции [7]:

$$P_u = m_{\text{ч}} \left(\frac{d \overline{v}_c}{d \tau} \right), \quad (4)$$

где τ – время сепарации частицы, ч.

Вектор скорости v_c изменяет свое направление в различных зонах потока. Ниже точки A он направлен к периферии циклона, а выше – к его оси. Поэтому учесть силу инерции P_u при анализе очень сложно; обычно этой силой пренебрегают, что и является основной причиной расхождения экспериментальных данных с расчетными.

На частицу, перемещающуюся во вращающемся потоке, действует сила Кориолиса:

$$P_k = 2 m_{\text{ч}} \omega \overline{v}_c. \quad (5)$$

Так как изменение скорости \overline{v}_c в направлении центробежной силы P_k невелико, то силой Кориолиса можно пренебречь.

Сила сопротивления потока среды:

$$P_c = \frac{\xi S_{\text{ч}} \rho_{\text{ж}} v_c^2}{2}, \quad (6)$$

где ξ – коэффициент лобового сопротивления частицы; $S_{\text{ч}}$ – площадь сечения частицы по нормали к ее движению. м².

Радиальная сила [8]:

$$P_r = \frac{3 \mu Q d_{\text{ч}}}{2 h r}, \quad (7)$$

где μ – кинематическая вязкость масла, м²/с; Q – производительность гидроциклона, м³/ч; h – высота воздушного столба гидроцикло-

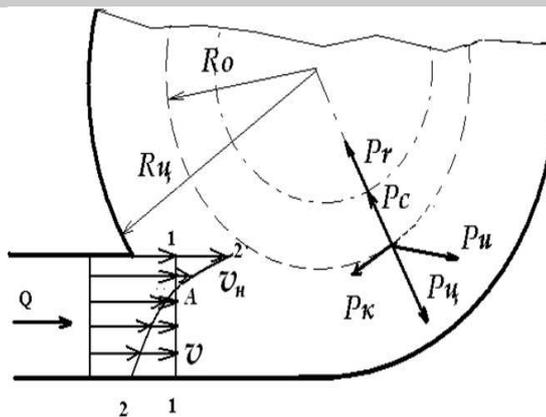


Рисунок 2 – Силы, действующие на частицу в спиральном потоке в гидроциклоне

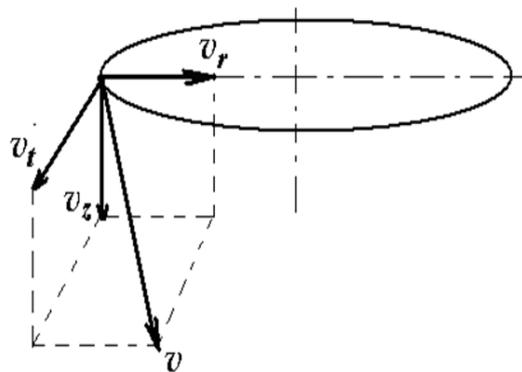


Рисунок 3 – Составляющие скорости движения частицы в гидроциклоне

на, м.

Под действием указанных выше сил, скорость движения частицы в любой точке гидроциклона может быть разложена на следующие три составляющие (рисунок 3):

v_t – тангенциальную скорость, направленную перпендикулярно радиусу вращения частицы 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.

Поскольку на частицу, находящуюся в потоке жидкости, в гидроциклоне действуют в основном две силы: центробежная $P_{\text{ц}}$ и радиальная P_r , то в каждой точке гидроциклона в плоскости, перпендикулярной его оси, частица будет иметь скорость v (рис. 3), состоящую из тангенциальной v_t и радиальной v_r скоростей. Исходя из этого, уравнение радиального движения частицы в цилиндрическом гидроциклоне можно записать следующим образом:

$$m_{\text{ч}} \frac{d^2 r}{dt^2} = m_{\text{ч}} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{м}}} - 1 \right) \frac{v_t(r)}{r} - \mu \left(\frac{dr}{dt} - v_r(r) \right) + \xi(t), \quad (8)$$

где $v_t(r)$ – функция, описывающая распределение тангенциального компонента скорости

сти частицы в потоке; $v_r(r)$ – 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.

Предположив обратную пропорциональность тангенциальной $v_t(r)$ и радиальной $v_r(r)$ компонент скорости жидкости радиальной координате, в условиях отсутствия относительного движения частицы в окружном направлении и ускорения их при радиальном перемещении и, определив силу сопротивления по линейному закону Стокса, уравнение (8) можно записать в виде [9]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d_v^2 \left(\frac{\rho_v}{\rho_m} - 1 \right) A^2}{18 v_c} \frac{1}{r^3} - \frac{\gamma}{r} + \frac{\xi(t)}{3\pi d_v \rho_v v_c}, \quad (9)$$

где A – параметр, характеризующий геометрические характеристики гидроциклона

$$A = v_t R_t, \quad (10)$$

где v_t – тангенциальная скорость частицы на участке, м/с; R_t – радиус, на котором выполняется соотношение $V_t = const$, м; γ – параметр, характеризующий пропускную возможность гидроциклона.

$$\gamma = A \left(\frac{d_{ex}}{8HR_t} - 4C^2 \right), \quad (11)$$

где d_{ex} – диаметр входного патрубка гидроциклона, м; H – высота конической части гидроциклона, м; C – постоянная величина, характеризующая зависимость производительности от высоты гидроциклона;

$$C = Q/2\pi l, \quad (12)$$

где Q – производительность гидроциклона, м³/ч; l – высота гидроциклона от сливного патрубка до верхнего среза диафрагмы, м.

Если предположить, что функция $\xi(t)$, учитывающая случайную составляющую скорости, вызванную стесненностью движения частиц и их взаимными столкновениями, определяется функцией времени с нулевым средним значением, то описываемое уравнением (9) случайное перемещение частицы вдоль радиуса гидроциклона, в любом его сечении, является простым процессом и может быть представлено одномерной плотностью вероятности $W(t, r)$. Тогда величина $W(t, r)dr$, характеризует относительное число частиц, находящихся в момент времени t в сечении $r+dr$, а функция $W(t, r)$ может быть истолкована как концентрация частиц в этот момент времени в данном сечении и определена уравнением [10]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(-aW + \frac{b}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right), \quad (13)$$

с соответствующими уравнению коэффициентами:

$$a = \frac{r^3 d_v^2 \left(\frac{\rho_v}{\rho_m} - 1 \right) A^2}{18 v_c} - \frac{\gamma}{r}, \quad (14)$$

и

$$b = \frac{4,8 \cdot 10^{-15} \left(\frac{d_{ex}}{d_c} \right)^{0,65}}{9 \pi^2 d_v^2 \rho_m^2 v_c^2}, \quad (15)$$

где d_c – диаметр сливного патрубка, м.

Граничные условия, указывающие на отсутствие перемещения частицы вдоль радиуса вращения (r) при достижении ими стенки $r = R_{\text{ци}}$ гидроциклона, а также границы зоны противотока $r = r_o$, соответствующее радиусу воздушного столба (r_o), определяющие унос частиц в приспособление для отвода очищенного масла, могут быть записаны в виде [10]:

$$W(t, r) = 0 \text{ при } r = R_{\text{ци}} - z \tan \alpha \text{ и } r = r_o, \quad (16)$$

где z – координата точки по высоте гидроциклона, м; α – угол конусности гидроциклона, град.

С учетом граничных условий и безразмерных параметров, влияющих на процесс отделения частицы

$\bar{r}_o, \bar{\alpha}, \bar{\gamma}$ дифференциальное уравнение (13) принимает вид [11]:

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left[- \left(\frac{1}{\bar{r}^3} - \frac{\bar{\gamma}}{\bar{r}} \right) \bar{W} + \frac{1}{2\bar{\alpha}} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} \right]. \quad (17)$$

Тогда унос частиц через сливной патрубок, выраженный в долях единицы от общего числа частиц, поступающих с очищаемым маслом, может быть определен как безразмерная величина потока частиц:

$$\bar{G}(\bar{t}, \bar{r}) = \left[- \left(\frac{1}{\bar{r}^3} - \frac{\bar{\gamma}}{\bar{r}} \right) \bar{W} + \frac{1}{2\bar{\alpha}} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}} \right], \quad (18)$$

зависимостью:

$$S_a(\bar{t}) = \frac{1}{2\bar{\alpha}} \int_0^{\bar{t}} \bar{G}(\bar{t}, \bar{r}) d\bar{t}. \quad (19)$$

Выводы. 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 зоны противотока $r = r_o$, то есть от радиуса поверхности нулевой осевой скорости, определяющей разделение потока масла и унос частиц через верхнее или нижнее сливные отверстия.

Литература

1. Глушенко А.А. Результаты испытаний гидроциклона для очистки масел// Известия СПб ГАУ/ , - СПб, 2008. - № 12. - С. 254-258.
2. Глушенко А.А., Обоснование параметров гидроциклона для очистки отработанных масел// Вестник МГАУ./ Агроинженерия. 2009.- №3, С. 82-85.
3. Шестов Р.Н. Гидроциклоны. – Л.: «Машиностроение», 1967. – С.80.
4. Бонет М. Разделение двух жидкостей в гидроциклоне/ М. Бонет.– М.: ВИНТИ, 1974. – 30 с.
5. Гутман, Б. М. Расчет гидроциклонных установок для нефтедобывающей промышленности/ Б.М. Гутман, В.П. Ершов, А.М. Мустафьев. – Баку.: Азернешр, 1983. - №3- 109 с.
6. Измайлова А.Н. Экспериментальное исследование работы гидроциклонов на тонкодисперсных суспензиях./А.Н. Измайлова// Химическое и нефтяное машиностроение. – 1976. - №5. – С. 15-18.
7. Шестов Р.Н. О воздушном столбе в гидроциклонах// Известия ВУЗов СССР. Пищевая технология, 1965.– №2 – С.156-159.
8. Мустафьев А.М., Гутман Б.М. Гидроциклоны в нефтедобывающей промышленности. – М.: Недра, 1981. – 260 с.
9. Boner C.J. Gear and transmission Lubricants. London:, Press Reliz, 2001. – 98 a.p.
10. Hillard J.C. Fuel Economy in Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines/ J.C. Hillard, G.S. Springer. Plenum Press New York and London, 1988. - 600 a.p.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

Сведения об авторах:

Глушенко Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: oildel@yandex.ru
 Молочников Денис Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: denmol@yandex.ru
 Яковлев Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: jakseal@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина», г. Ульяновск, Россия.
 Гаязиев Ильнар Наилевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: gazel.81@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» г. Казань, Россия.

**TO THE QUESTION OF CLEANING OF EXHAUST OIL FROM NON-SOLUBLE IMPURITIES
 IN A HYDROCYCLONE**

Gluschenko A.A., Molochnikov D.E., Yakovlev S.A., Gayaziev I.N.

Abstract. The possibility of using hydrocyclone plants for cleaning used oils is considered. The dependence of the degree of purification of waste oil on insoluble impurities is determined theoretically, determined by the mass content of particles in the oil flow removed through the lower drainage hole, from the time of the particle in the hydrocyclone and the radius of the surface of zero axial velocity, which determines the separation of the oil flow and the entrainment of particles through the upper or lower discharge holes.

Key words: hydrocyclone, oil purification, forces acting on the particle, separation criterion, geometric parameters

References

1. Glushchenko, A.A. Results of hydrocyclone tests for cleaning oils. [Rezultaty ispytaniy gidrotsyklona dlya ochistki masel]. // *Izvestiya SPb GAU. – News of St.Petersburg State Agrarian University.* - SPb, 2008. - № 12- P. 254-258.
2. Gluschenko A.A. Justification of hydrocyclone parameters for purification of used oils. [Obosnovanie parametrov gidrotsyklona dlya ochistki otrabotannykh masel]. // *Vestnik MGAU. – The Herald of Moscow State Agrarian University.* Agroinzheniya. 2009. - №3, P. 82-85.
3. Shestov R.N. *Gidrotsiklony*. [Hydrocyclones]. L.: “Mashinostroenie”, 1967. – P. 80.
4. Bonet M. *Razdelenie dvukh zhidkostey v gidrotsyklone*. [Separation of two liquids in a hydrocyclone]. M. Bonet. - M.: VINITI, 1974. – P. 30.
5. Gutman B. M. *Raschet gidrotsiklonnykh ustanovok dlya nefte dobyvayushey promyshlennosti*. [Calculation of hydrocyclone installations for the oil-extracting industry]. / B.M. Gutman, V.P. Ershov, A.M. Mustafev // Baku: Azerneshr, 1983. - №3 – P. 109.
6. Izmaylova A.N. Experimental study of the work of hydrocyclones on finely dispersed suspensions. [Eksperimentalnoe issledovanie raboty gidrotsiklonov na tonkodispersnykh suspenziyakh]. / A.N. Izmaylova // - *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroyenie. - Chemical and petroleum engineering.* 1976. - №5. – P. 15-18.
7. Shestov R.N. On the air column in hydrocyclones. [O vozdushnom stolbe v gidrotsiklonakh]. // *Izvestiya VUZov SSSR*. // *Pischevaya tekhnologiya. - Nutrition Technology.* 1965. - №2 - P. 156-159.
8. Mustafev A.M., Gutman B.M. *Gidrotsiklony v nefte dobyvayushey promyshlennosti*. [Hydrocyclones in the oil industry]. M.: Nedra, 1981. – P. 260.
9. Boner, C.J. Gear and transmission Lubricants. London:, Press Reliz, 2001. – 98 a.p.
10. Hillard, J.C. Fuel Economy in Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines/ J.C. Hillard, G.S. Springer. Plenum Press New York and London, 1988. - 600 a.p.
11. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya*. [The theory of the boundary layer]. – М.: Наука, 1974. – P. 711.

Authors:

Gluschenko Andrey Anatolevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: oildel@yandex.ru
 Molochnikov Denis Evgenyevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: denmol@yandex.ru
 Yakovlev Sergey Aleksandrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: jakseal@mail.ru
 Ulyanovsk State Agricultural University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russia
 Gayaziev Inar Nailevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: gazel.81@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.