

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРИФУГИ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ МАСЕЛ

Ленивцев Геннадий Александрович, канд. техн. наук, проф. кафедры «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВПО «Самарская государственная сельскохозяйственная академия».

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Спортивная, 8.

Тел.: 8(84663) 46-3-46.

Бажутов Денис Николаевич, ассистент кафедры «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВПО «Самарская государственная сельскохозяйственная академия».

446435, Самарская область, г. Кинель, ул. Украинская, 44.

Тел.: 8(84663) 46-3-46.

Ключевые слова: центробежный, очиститель, гидравлическая, система, масло, метод, конечный, элемент.

В статье отражены особенности применения метода конечных элементов при анализе процесса центробежной очистки масла. Приведены результаты исследований по обоснованию конструктивных параметров центробежного очистителя.

Возникшие новые тенденции в центрифугальной технике обусловили появление многообразных конструкций центрифуг, некоторые из которых известным расчетным путем оценить затруднительно.

В свою очередь успешная разработка аппаратов центробежного разделения и внедрение их в промышленность связана с проблемами разработки конструкций аппаратов и определения условий реализации в них процессов, способствующих решению тех или иных актуальных технологических задач [3, 4]. Имеющаяся информация по данному вопросу носит эмпирический или полуэмпирический характер, что не позволяет использовать ее с достаточной степенью надежности при проектировании центробежного оборудования. Поэтому эти задачи могут считаться фактически решенными в том случае, если будут созданы надежные методы аналитического расчета процессов центробежного разделения.

Целью данного исследования является оценка влияния размерных параметров ротора центрифуги на эффективность очистки масел.

Исходя из поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- смоделировать процесс центробежной очистки посредством программ вычислительной гидродинамики;
- определить характер влияния размерных параметров центрифуги на эффективность очистки масла.

Объектом исследований является процесс центробежного разделения низкоконтцентрированных суспензий. В рамках этого объекта предметом исследований служит гидродинамика потока суспензии в роторе осадительной центрифуги при различных значениях параметров, определяющих физические условия в них.

Метод конечных объемов, средствами которого предлагается решить поставленные задачи, является аналитической процедурой. Ключевая идея метода при анализе поведения конструкций и сред заключается в следующем: сплошная среда моделируется путем разбиения ее на области (конечные объемы), в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих напряжения и перемещения в указанной области [8].

Метод конечных объемов широко применяют в компьютерном проектировании. Программный комплекс SolidWorks2009 предоставляет необходимый инструмент для решения широкого круга задач по анализу эффективности применения средств очистки рабочих жидкостей в реальных условиях эксплуатации.

Традиционно в SolidWorks2009 применяется метод конечных объемов и сопряженный алгебраический многосеточный решатель. Конечные объемы содержат дополнительные точки интегрирования, что позволяет добиваться большей устойчивости решения и лучшей сходимости.

Фундаментальные законы сохранения массы, импульса, энергии позволяют вывести дифференциальные уравнения, которые совместно с дополнительными условиями позволяют сформулировать задачу математически.

Расчет течения жидкости в современных программных продуктах выполняется путем численного решения системы уравнений, описывающих движение жидкой среды [5, 6].

Рассмотрим движение жидкости в роторе центрифуги, отвлекаясь пока от осаждения твердой фазы. Для этого воспользуемся системой дифференциальных уравнений, включающей уравнение неразрывности потока и гидродинамические уравнения (уравнения Навье-Стокса) для установившегося движения в цилиндрической системе координат [9]:

$$\frac{\partial rv}{\partial r} + \frac{\partial rw}{\partial z} + \frac{\partial ru}{r\partial\varphi} = 0, \quad (1)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{r\partial\varphi} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2}{r} = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + v \left(\nabla v - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial\varphi} \right), \quad (2)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{r\partial\varphi} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{v \cdot u}{r} = F_\varphi - \frac{1}{\rho \cdot r} \frac{\partial P}{\partial\varphi} + v \left(\nabla u - \frac{u}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial\varphi} \right), \quad (3)$$

$$v \frac{\partial w}{\partial r} + u \frac{\partial w}{r\partial\varphi} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \nabla w, \quad (4)$$

где $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; F_r , F_φ , F_z – проекции массовых сил; ρ – плотность жидкости; P – давление жидкости; v – кинематическая вязкость жидкости; w , v , u – компоненты вектора скорости.

Для прогнозирования процесса разделения неоднородных систем на центрифугах, а также полного изучения гидродинамики в роторе центрифуги необходимо рассматривать движение двухфазного потока.

Модель дисперсных частиц. Этот подход используется для моделирования двухфазных течений, в которых вещество одной из фаз представлено в виде дисперсных частиц, причем объемная доля, занимаемая этими частицами, невелика (до 10% общего объема). Вещество, присутствующее в потоке в виде дискретных частиц, не образует сплошную среду, отдельные частицы взаимодействуют с потоком основной фазы и друг с другом дискретно. Для моделирования движения частиц рассеянной фазы в роторе центробежного очистителя используем подход Лагранжа, т.е. отслеживается движение отдельно взятых частиц рассеянной фазы под действием сил со стороны потока основной фазы [11].

На первом этапе решается задача разработки модели и расчетных алгоритмов для описания гидродинамических процессов в роторе центрифуги. На втором этапе определяются технологические и размерные параметры ротора центрифуги, обеспечивающие требуемую эффективность разделения.

Исследование процесса очистки в центробежном поле фильтра проводилось с использованием программного пакета вычислительной гидродинамики COSMOSFloWorks, EFD.Lab комплекса SolidWorks2009, математической основой которого является метод конечных элементов [1].

В начале решения задачи в CAD-системе Catia v.5 была построена трехмерная твердотельная модель центробежного очистителя с возможностью последующего изменения ее основных конструктивных параметров. Далее модель импортировалась в препроцессор программы COSMOS FlowWorks, где осуществлялась ее оптимизация и разбиение расчетной области внутренних объемов ротора на сетку конечных объемов в сеточном генераторе. Общее число конечных объемов расчетной области составило 185 685 [1]. Принято, что граничными условиями являются: жесткое закрепление модели через ось ротора, внутренние поверхности ротора и его основания, вращающиеся с одинаковой частотой; давление рабочей жидкости на входе и расход на выходе. Далее описываются основные физико-химические свойства жидкости (рабочей гидравлической жидкости) и дисперсной фазы.

В результате анализа гидродинамики в роторе центрифуги, проведенного посредством программы вычислительной гидродинамики, были получены численные значения и картины изменения давлений, скоростей и температур потока. Установлено наличие зон высокой турбулентности и зон обратного тока в пристеночных областях ротора [1].

В ходе аналитических расчетов и экспериментальных исследований при постоянной производительности центрифуги определен максимальный диаметр осаждающихся частиц для различных частот вращения ротора центрифуги.

Для определения критического диаметра воспользуемся следующей формулой [4]:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{9\mu Q}{\pi \Delta\rho \omega^2 r_g^2 L}}, \quad (5)$$

где μ – вязкость жидкости, Па·с; Q – производительность центрифуги, м³/с; $\Delta\rho$ – разность плотностей твердой и жидкой фаз, кг/м³; ω – угловая скорость, рад/с; r_g – внутренний радиус слоя жидкости в роторе, м; L – длина зоны осаждения, м.

На рисунке 1 представлены зависимости критического диаметра от частоты вращения ротора центрифуги, полученные по различным методикам.

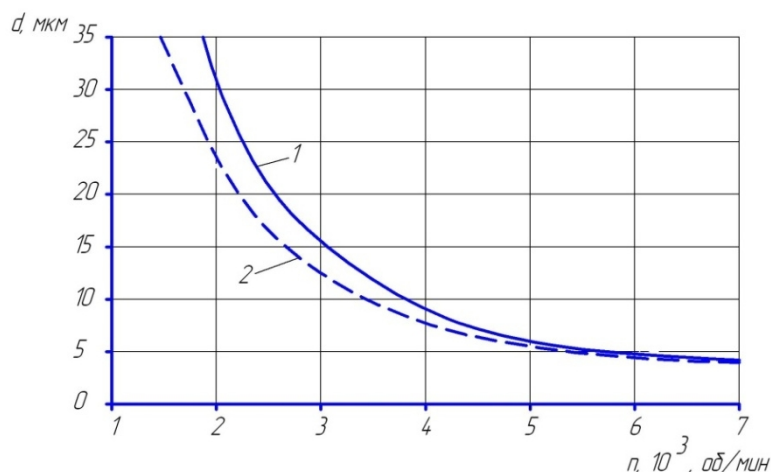


Рис. 1. Зависимость критического диаметра от частоты вращения ротора ($Q=32$ л/мин):
1 – результаты вычислений по формуле; 2 – результаты численного эксперимента

В процессе анализа зависимостей была выявлена удовлетворительная согласованность – расхождение результатов составила в среднем 7 %.

Таким образом, можно заключить, что применяемый численный метод исследования гидродинамики в роторе центрифуги является вполне эффективным для решения задач процесса осаждения суспензии.

На основе представленной модели течения и реализации ее численного решения получены данные о структуре течения рабочей жидкости и твердых частиц в центробежном очистителе [1]. Оценено влияние некоторых размерных параметров ротора на эффективность разделения суспензии.

Варьирование геометрическими характеристиками контура ротора центрифуги позволило выявить параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность разделения суспензии, и подобрать их наилучшее соотношение для конкретной суспензии.

Оценено влияние высоты и диаметра ротора на эффективность разделения суспензии. В качестве допущения принято, что суспензия монодисперсная.

Для более точной оценки получаемых данных подвергнут рассмотрению спектр траекторий движения частиц, так как анализ результатов показывает, что структура движения частиц при постоянной скорости вращения ротора и производительности центрифуги зависит от радиуса поступления частиц во входное сечение ротора.

Проанализировано влияние высоты ротора на эффективность разделения суспензии при неизменных остальных размерных параметрах ротора центрифуги. Определена высота ротора центрифуги, при которой все частицы определенного диаметра осаждаются на внутреннюю поверхность ротора. На рисунке 2 представлена зависимость степени разделения $\eta = (C_{\text{исх}} - C_{\text{ф}})/C_{\text{исх}}$ суспензии от высоты ротора центрифуги H при различных диаметрах частиц дисперсной фазы. При этом расход суспензии и частота вращения ротора оставались постоянными. Как видно из рисунка 2, для более тонкого разделения требуется увеличение высоты ротора центрифуги.

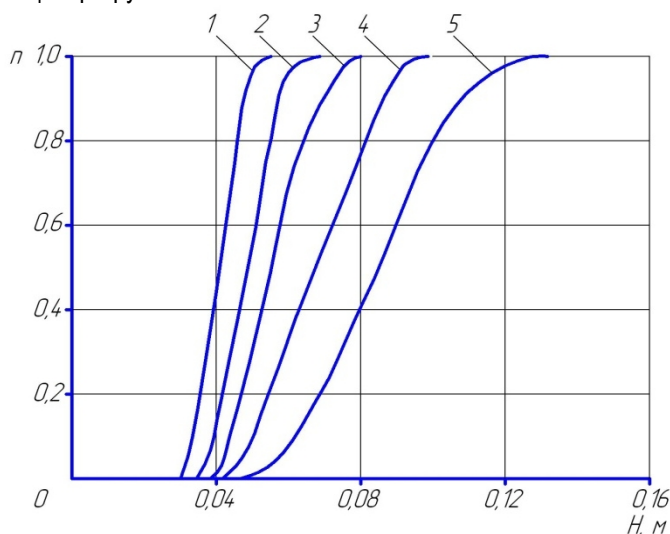


Рис. 2. Зависимость степени разделения суспензии от высоты ротора ($n=5000$ об/мин, $Q=32$ л/мин):
1 – 25 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 15 мкм; 4 – 10 мкм; 5 – 5 мкм

Проведено исследование влияния диаметра ротора центрифуги на эффективность осаждения частиц твердой фазы. График зависимости содержащихся твердых частиц в фугате при различных диаметрах ротора представлен на рисунке 3.

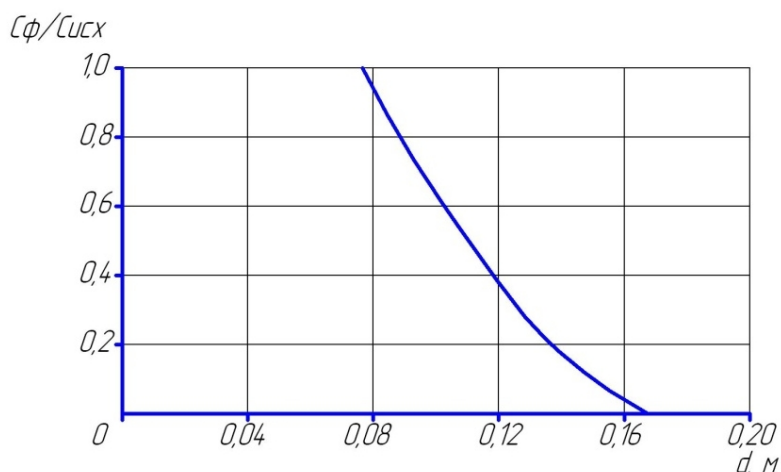


Рис. 3. Зависимость относительного уноса частиц от диаметра ротора ($n=5000$ об/мин, $Q=32$ л/мин, $d=8$ мкм)

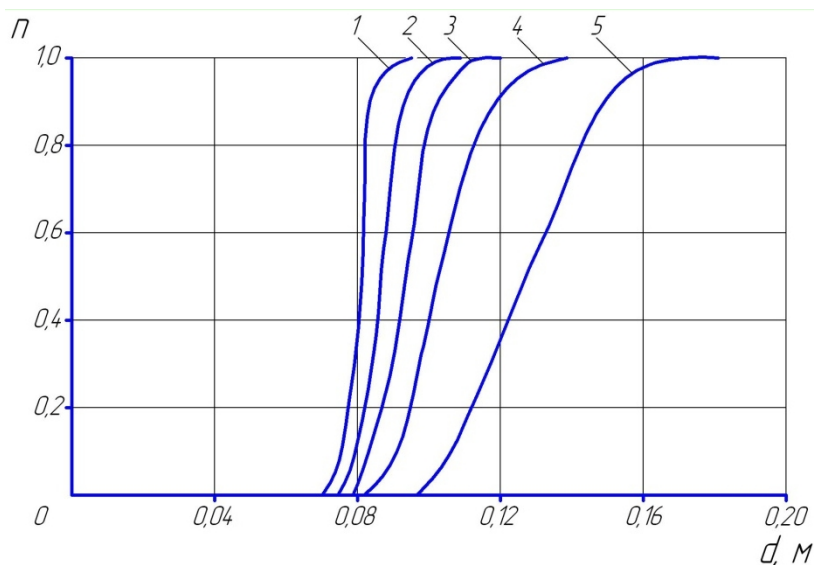


Рис. 4. Зависимость степени разделения суспензии от диаметра ротора ($n=5000$ об/мин, $Q=32$ л/мин):
1 – 25 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 15 мкм; 4 – 10 мкм; 5 – 5 мкм

Для определения характера взаимного влияния рассматриваемых параметров проведены численные эксперименты, результаты которых представлены на рисунке 5.

Численные эксперименты проводились для частиц твердой фазы плотностью 2650 кг/м^3 (кварц). Расход суспензии и частота вращения ротора центрифуги оставались постоянными. С помощью полученных данных можно с достаточной для инженерной практики точностью определить габаритные размеры ротора центрифуги, при которых обеспечивается требуемое разделение суспензии.

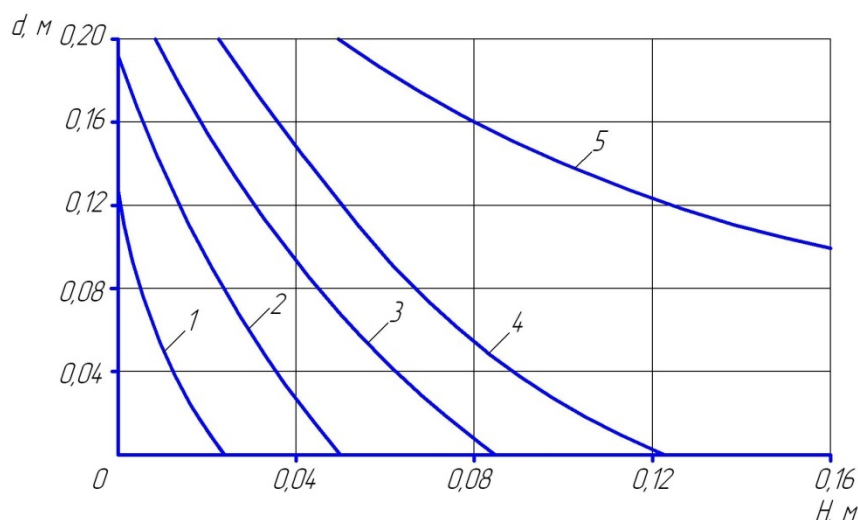


Рис. 5. Соотношение диаметра ротора и его высоты для обеспечения заданной эффективности разделения ($n=5000$ об/мин, $Q=32$ л/мин):
1 – 25 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 15 мкм; 4 – 10 мкм; 5 – 5 мкм

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы: проведен теоретический анализ процесса центробежной очистки методом конечных элементов в программах вычислительной гидродинамики (CFD); получены зависимости эффективности разделения суспензии от размерных параметров ротора центрифуги; установлено, что при высоте $H=137$ мм и диаметре $D=148$ мм ротора центрифуга обеспечивает заданную эффективность разделения, характерную для рабочих жидкостей гидросистем, с учетом параметров жидкости и твердых частиц.

Библиографический список

1. Бажутов, Д. Н. Модернизация гидравлической системы навесного оборудования трактора / Д. Н. Бажутов, Г. А. Ленивец, О. С. Володько // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара, 2011. – Т.13, №4. – С. 27-29.
2. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений / И. А. Белов, С. А. Исаев. – СПб., 2001. – 108 с.
3. Бродский, Г. С. Обоснование, выбор параметров и разработка систем фильтрации рабочих жидкостей для гидрофицированных горных машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.06 / Бродский Григорий Семёнович. – М., 2006. – 370 с.
4. Качанова, Л. С. Совершенствование очистки отработанного масла центробежными аппаратами : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Качанова Людмила Сергеевна. – зерноград, 2004. – 152 с.
5. Кочевский, А. Н. Расчет внутренних течений жидкости в каналах с помощью программного продукта FlowVision // Вестник СумГУ. – Сумы, 2004. – №2 (61). – С. 25-36
6. Кочевский, А. Н. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопастных гидромашинах / А. Н. Кочевский, В. Г. Неня // Вестник СумГУ. – Сумы, 2003. – №13 (59). – С. 195-210.
7. Павлова, Н. В. Исследование двухфазных течений в роторе осадительной центрифуги : дис. ...канд. техн. наук : 01.02.05 / Павлова Наталья Валерьевна. – Бийск, 2004. – 117 с.
8. Поляков, С. Н. Анализ эффективности пылеулавливания вихревого аппарата ВЗП-М200 с помощью программного комплекса ANSYS CFX [Электронный ресурс] // ANSYS Solutions : [сайт]. – URL: <http://ansyssolutions.ru> (дата обращения: 2.04.2013).
9. Тарапов, И. Е. Механика сплошной среды: общие законы кинематики и динамики. – Харьков : Золотые страницы, 2002. – 515 с.
10. Dehbi, A. Assessment of a new fluent model for particle dispersion in turbulent flows // 4th Int. Conf. on Multiphase Flow. – New Orleans, 2005. – pp. 703-720.