

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ В ВИХРЕВЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ****RESEARCH OF SEPARATION PROCESS IN ROTATIONAL
HYDRODYNAMIC MACHINES****В. Ю. Щербина***Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина.***Abstract**

Mathematical model for definition of speed fields and motion trajectories of material parts in hydrocyclone of main pumps is developed. Speed and trajectory is calculated for different fractions of material. Calculations are performed for hydrocyclone work effectiveness determination and results analysis is done.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сепарации гетерогенных систем являются основными для многих производств химической, нефтехимической, пищевой, горнорудной, биологической и других отраслей промышленности. Методы разделения выбирают в зависимости от характера составных частей системы и состояния фаз [1] с учетом физических и химических свойств среды, а также фазы, которая находится в мелкораздробленном состоянии. Наиболее распространенными аппаратами для сепарации являются циклонные вихревые аппараты. Это предопределено тем, что эти аппараты сочетают простоту устройств, компактность и надежность с высокой интенсивностью разделительных процессов, что позволяет значительно улучшить классификацию измельченных продуктов и выполнить обогащения.

Однако существуют факторы, которые усложняют процесс распространения вихревых гидродинамических разделительных аппаратов. Основными причинами ограниченного их использования считается отсутствие надежных методов расчета гидродинамики разделительных процессов и критериев перехода от лабораторных моделей к крупномасштабным установкам.

Несмотря на относительную конструктивную простоту и наличия большой экспериментальной информации [1-5] о структуре закрученных и рециркуляционных потоков и закономерностей процессов разде-

ления, которые протекают у них, их моделирование остается одной из главных проблем при проектировании промышленных установок. До сих пор много вопросов, связанных с расчетом промышленных вихревых аппаратов, остались нерешенными [3]. Чисто экспериментальный подход не решает проблему, потому что в этом случае отсутствует обобщенность результатов исследований, а теоретический обусловлен трудностями математического характера. Поэтому при решении указанная задача рассматривается в постановке при введении ряда упрощений, которые подчас искажают физику процесса [1, 3, 5, 6], что делает невозможным правильно оценивать новые конструкторские решения и найти границы переходных зон работы аппаратов, трудно определить, достигнута ли максимальная эффективность процесса разделения, и невозможно целенаправленно совершенствовать конструкцию и технологические параметры вихревых аппаратов и тем более оптимизировать параметры их работы [2].

Следует отметить, что важной особенностью этих задач является наличие многообразия сложных явлений, таких как детерминированно-стохастический характер движения частиц в турбулентном закрученном потоке, который усложнен взаимодействием частиц со стенками, одной с другими и несущим турбулентным потоком, неопределенностью входных условий, возможным изменением числа и размера частиц, в ре-

зультате дробления или коагуляции, изменением формы деформированных частиц, а также другими причинами, что влияют на решение задачи разделения. Поэтому разработка научно - обоснованных методов расчета гидродинамических процессов разделения гетерогенных сред с твердой фазой является актуальной задачей.

Постановка задачи исследования

Постановка проблемы. В насастройении циклонные сепараторы типа гидроциклон применяются для очистки среды, которая перекачивается (например нефть), от механических примесей, которые отводятся из проточной части насоса с целью увеличения ресурса его работы. Особенно актуальным в данное время стал вопрос повышения ресурса работы торцевых уплотнений нефтяных магистральных насосов типа НМ на подаче от 1250 м³/год до 12500 м³/год с напором от 210 м до 260 м, завод «НАСОС-ЭНЕРГОМАШ» (Украина). Нефть, которая перекачивается по магистральным нефтепроводам, содержит регламентированное количество механических примесей. Однако их количество приводит к преждевременному износу торцевых уплотнений насоса. Применение гидроциклонов для очистки дисперсионную среду, которая подается на торцевые уплотнения, от частиц размером 20 мкм и больше.

При этом ресурс работы торцевых уплотнений с 6300 часов может быть увеличено до 16500 часов, то есть в 2,6 раза. Достижение такого показателя с помощью применения достаточно простого устройства позволяет значительно уменьшить эксплуатационные расходы и потери от простоя магистральных насосов во время проведения ремонта концевых уплотнений.

Целью исследования является создание математической модели и исследование процесса сепарации гетерогенных систем в вихревых циклонных аппаратах.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обоснование принципа сепарирования

Для решения задач рационального выбора процесса, устройств и режима деления в

конкретных случаях, целесообразно описать физико-химическую сущность сепарирования гетерогенных систем из единых позиций.

Несмотря на притворные расхождения явлений, которые протекают, при делении гетерогенных систем они имеют ряд особенностей, которые оказываются независимо от способа осуществления деления. Это обстоятельство разрешает представить общий физико-химический механизм процессов деления гетерогенных систем.

Будем считать, что в результате сепарации со временем происходит заполнение некоторых рабочих зон - сборников рис.1, в которые попадают компонентами разделяемых продуктов или фазы сепарации разделяемой гетерогенной системы. Причем состав вещества, которое находится в этих сборниках, отличный от состава производной системы. Из этого следует, что во всех процессах деления имеет место направленный перенос массы.

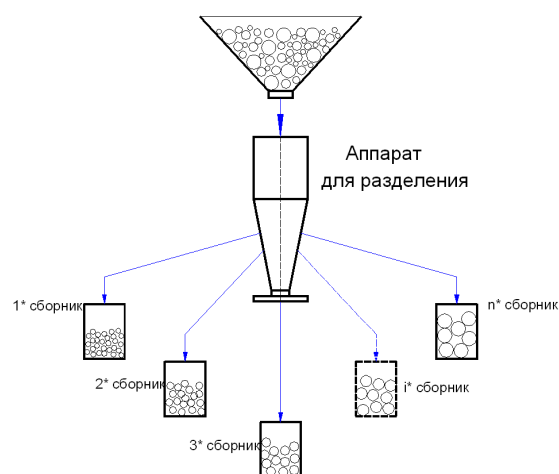


Рис. 1. Схема разделение частиц дисперсной фазы

Для анализа процесса сепарации будем рассмотреть движение частиц разделяемой системы. С этой целью вводим элементы массы разделяемых фаз, которые не подвергаются важным изменениям на протяжении всего процесса сепарации.

Так как в самом общем случае низменность гетерогенных систем может протекать при разделении твердых фаз к их следующему состоянию (вообще к уровню молекул), то для общности описания физико-химической сущности процессов сепарации

необходимо описывать движение каждой частицы разделяемой системы, а в случаях протекания химических реакций даже каждой молекулы или атома.

Для осуществления любого процесса деления необходимо и достаточно, чтобы разделяемые вещества в результате протекания процесса оказались в разных пространственных областях, попадаясь в предназначенные для них сборники.

Таким образом, сепарация гетерогенных систем осуществляется в том случае, если действующие силы обеспечивают относительное перемещение составных фаз. Это позволяет указать ряд физико-химических влияний, которые приводят к делению гетерогенных систем, и тем самым дает возможность проявить способы ее интенсификации.

В случае агрегативно стойких дисперсных систем вычисления можно проводить для отдельно взятых частиц, не расчленяя их на более мелкие элементы. Для грубодисперсных систем возможный случай детерминированного движения частиц. В данной работе рассматривается решение задачи для дисперсных систем, в случае движения детерминированных частиц.

Разработка математической модели и расчет

В данной работе рассматривается движение частицы в сечении вихревого аппарата. При этом непрерывное аэродинамическое поле заменяется дискретной сетевой моделью. В каждом узле сетки необходимо, чтобы были заданы составные скорости потока, плотность потока и число Рейнольдса. Эти составные можем получить, пользуясь методикой приведенной в [7].

Используя квазикласичне приближение, применяемое при температурах $T \geq 4^0 K$, можем записать в общем виде систему дифференциальных уравнений поступательного движения частиц, которые составляют делимую гетерогенную систему [Error! Reference source not found.]

$$m_k \frac{d^2 \vec{R}_k}{dt^2} = \sum \vec{F}_{B3_k} + \vec{F}_{3H_k} \quad (1)$$

где m_k - масса частицы k -той фазы; $\vec{R}_k$ - радиус вектор частицы, k -той фазы; $\vec{F}_{B3_k}$ - сила взаимодействия частицы k -той фазы с дру-

гими частицами; $\vec{F}_{3H_k}$ - равнодействующая внешних сил на частицу k -той дисперсной фазы. Это сила сопротивления среды и внешняя массовая сила (например, сила притяжения).

Систему дифференциальных уравнений (1) необходимо дополнить начальными условиями, то есть задать значение координат и скоростей частиц в момент поступления их в аппарат и скорость дисперсионной среды.

В нашем случае внешней массовой силой и $\vec{F}_{B3_k}$ можно пренебречь, потому что сила притяжения на несколько порядков меньше инерционных сил, которые возникают во время движения потока, а силы взаимодействия частиц при столкновении, для вихревых аппаратов что рассматриваются, очень незначительные.

Для определенной фазы имеем:

$$m_k \frac{d^2 \vec{R}_k}{dt^2} = m \cdot \dot{\vec{V}}_{(m)} \quad (2)$$

Где

$$\dot{\vec{V}}_{(m)} = \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} \frac{\partial x_{(m)}^i}{\partial \tau} \quad (3)$$

подставив в (2) получим:

$$m_k \frac{d^2 \vec{R}_k}{dt^2} = m \cdot \left[\frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i \right] \quad (4)$$

Равнодействующую внешних сил на частицу k - той фазы определяем из выражения:

$$\vec{F}_{3H_k} = F_{Di} \cdot n_i \quad (5)$$

где n - число частиц в единице объема, а F_{Di} - сила сопротивления среды.

Сила сопротивления среды - это сила, которая препятствует отклонению траектории частицы от траектории потока. Тело, которое движется в среде, будет сталкиваться с частицами, которые создают среду, и передавать им часть своего импульса. Скорость изменения импульса тела равняется силе сопротивления среды F_D . В общем виде, если использовать член $w^2/2$ для сферы диаметром d , будем иметь

$$F_D = [C_D \pi \rho_c d^2 w^2] / 8 \quad (6)$$

где C_D – коэффициент сопротивления среды.

Однако в общем случае $C_D=f(Re)[1]$.

$$C_D = \frac{24}{Re} * 1.24 \quad Re < 2 \quad (7)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad 2 < Re < 505 \quad (8)$$

$$C_D = 0.44 * 1.27 \quad 505 < Re < 2 \cdot 10^5 \quad (9)$$

Некоторое изменение коэффициентов можем трактовать как рассмотрение частиц, что имеют не идеальную шаровидную форму. Таким образом, моделирование движения частиц в гидроциклонах описанной конструкции возможно при использовании формул (7) – (9) для определения силы сопротивления среды F_D .

Исследуя траекторию движения частиц материала дисперсной фазы подставим в (6) значение (7). Получим следующее уравнение для ламинарного режима

$$F_D = \frac{24}{Re} \cdot \frac{\pi \rho_c d^2 w^2}{8 \left(\frac{\rho_{ж} \pi d^3}{6} \right)} m = \frac{18 \nu \rho_c}{\rho_{ж} d^2} w m = k_l w m \quad (10)$$

где m – масса частицы, k_l – коэффициент определенный по (6) и (9).

Аналогичным образом определяются уравнение для переходного и турбулентного режимов по (8), (9).

Уравнение (1) в этом случае, с учетом (4) и (10) будет иметь вид:

$$k_l w m - m \cdot \left[\frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i \right] = 0. \quad (11)$$

Поскольку w – скорость движения точки относительно потока, то:

$$w = \vec{V}_c - \vec{V}_{жс} \quad (12)$$

где $\vec{V}_c$ – скорость среды, $\vec{V}_{жс}$ – скорость частицы. Тогда

$$\frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i + k_l \vec{V}_{(m)} = k_l \vec{V}_{(c)} \quad (13)$$

Из уравнение (13) получим расчетную формулу для определения движения материала:

$$\frac{\partial V^i}{\partial \tau} + V^m \frac{\partial V}{\partial x^m} + V^m \Gamma_{mj}^i V^j + k_l V^i = k_l V_c^i \quad (14)$$

В этом уравнении Γ_{mj}^i – символ Кристоффеля 2 рода.

Окончательно определив значение в (14) в цилиндрических координатах получим:

$$\frac{\partial V^{i''}}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial V^{i''}}{\partial x^n} C_{m''}^n + \Gamma_{m''j''}^{i''} V^{j''} \right) V^{m''} + k_l V^{i''} = k_l V_c^{i''} \quad (15)$$

Или в цилиндрических координатах

$$\begin{cases} \frac{\partial V^{1''}}{\partial \tau} + V^{2''} \frac{\partial V^{1''}}{\partial x^n} + k_l V^{1''} = k_l V_c^{1''} \\ \frac{\partial V^{2''}}{\partial \tau} + \left(V^{2''} \frac{\partial V^{2''}}{\partial x^n} - r V^{3''} V^{3''} \right) + k_l V^{2''} = k_l V_c^{2''} \\ \frac{\partial V^{3''}}{\partial \tau} + \left(V^{2''} \frac{\partial V^{3''}}{\partial x^n} + 2 \frac{1}{r} V^{2''} V^{3''} \right) + k_l V^{3''} = k_l V_c^{3''} \end{cases} \quad (16)$$

Так как $r = x^{2''}$, $\Gamma_{3''2''}^{3''} = \Gamma_{2''3''}^{3''} = \frac{1}{r}$, $\Gamma_{3''3''}^{2''} = r$, а другие $\Gamma_{m''j''}^{i''}$ равны 0.

С помощью описанных методик и алгоритмов выполнены расчеты движения и определены траектории частиц дисперсной фазы. Расчет выполнялся для гидроциклона приведенного на рис.2 со скоростью дисперсионной среды на входе $v_3=(0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5.0, 10.0)$ м/с. Размер частиц составлял от 0.001 до 10.0 мм.

При моделировании процесса в каждый аппарат стохастическим методом вводились, и отслеживались траектории движения, приблизительно 1000 частиц определенной крупности. На рис.2 приведенные наиболее характерные скорости и траекторий перемещения частиц материала при скорости дисперсионной среды на входе $v_1=0.3$ м/с, $v_3=1.5$ м/с. Размер частиц 1, 10, 15, 20, 50 мк соответственно.

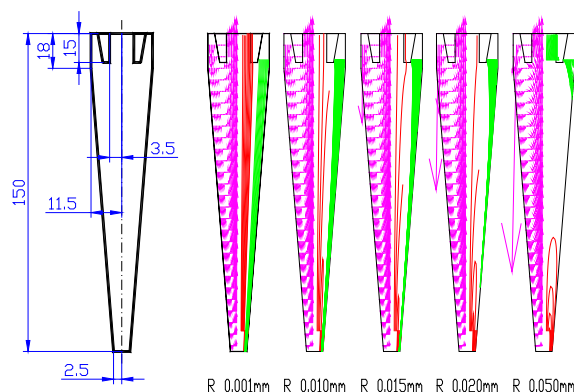


Рис. 2 Скорость ($v_1 + v_2$) и траектория движения частиц при $v_3=1.5$ м/с. (v_3 не показана)

Из рисунков видно, что в вихревых потоках образуются градиенты скорости, которые действуют как в радиальном, так и

осевом направлениях. Кроме того, в закрученном потоке происходит переход, от условий движения в свободном вихре к условиям движения в вынужденном, что является характерным для вихревого потока. В потоке возникают зоны рециркуляции с повышенным уровнем интенсивности турбулентности. Вблизи стенок развиваются большие радиальные осевые пограничные слои, которые ослабляют центробежные силы в этих местах. В зоне патрубка формируются тороидальные зоны рециркуляции, возникает турбулентность высокой интенсивности и образуется прецессирующее вихревое ядро.

Анализируя результаты численного эксперимента, можно, сделать вывод, что при уменьшении размера частицы влияние центробежных сил уменьшается, и при достаточно малых размерах поток не существенно отличается от потока несущей жидкости. Чем мельче частицы, на которые относительно большее влияние оказывает сопротивление среды, тем точнее совпадают траектории их движения с линиями тока жидкости.

Твердые частицы, которые находятся в гидроциклон вместе с потоком жидкости, втягиваются во вращательное движение со скоростью, близкой к окружной скорости жидкой фазы. При этом частицы двигаются относительно жидкости в радиальном и осевом направлениях в соответствии с действующими на них силами. В общем случае к этим силам относятся: центробежная сила, сила гравитации и силы, вызванные влиянием жидкости. Эффективность работы гидроциклона определялась возможностью свободного прохождения частицы от патрубка входа к отводному. Если частица попала на стенку, то считаем, что она попадет в разгрузочный патрубок за счет действия центробежных сил и потока. Нужно отметить, что данную методику можно использовать только для движения установившегося потока [5]. Потеря стойкости выражается в распаде осе симметричного вихревого ядра и возникновении, после зоны распада, нескольких типов возмущенного движения.

На рис. 3 приведенные результаты расчета эффективности сепарации гидроци-

клона (в %), в зависимости от скорости закрутки потока (v_3), и размера частиц дисперсной фазы.

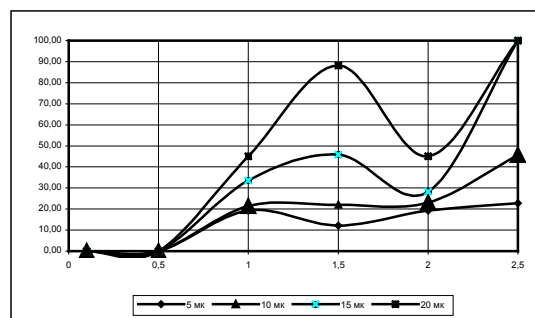


Рис. 3 Сепарация относительно размера частиц

Обработав полученные результаты, можем получить значение эффективности сепарации гидроциклона, в зависимости от скорости потока, размеров фракций, и проценту улавливания фракционных составляющих. Данные приведены на рис. 4.

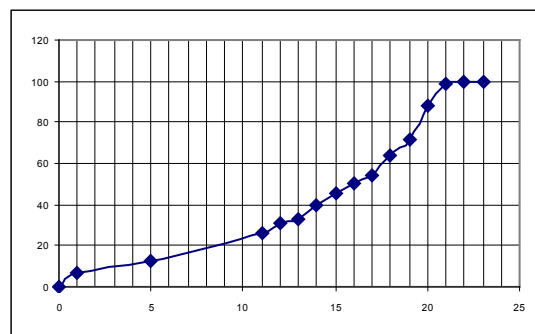


Рис. 4. Эффективность сепарации частиц в гидроциклоне

По графику, с достаточной степенью вероятности, можно определить степень попадания частиц конкретной фракции в отводной или разгрузочный патрубок при работе аппарата. Определение траектории частиц дает возможность установить время их пребывания не только в вихревом аппарате в целом, но и в различных зонах аппарата, что особенно важно для определения эффективности работы.

Анализируя полученные данные можем сделать вывод, что наиболее эффективным является гидроциклон в котором для закрутки потока используется скорость $v_3=1,5$ м/с. Так по рис.4 12,2% частиц фракции размером 5 мкм попадают в разгрузочный патрубок, соответственно 87,8% в отводный. Частицы фракций 15 мкм – 45,8% в разгрузочный

патрубок, 54,2% в отводный. Частицы фракций 20 мкм – 88,3% в разгрузочный патрубок, 11,7% в отводный. Частицы фракций 21 мкм полностью попадают в разгрузочный патрубок. Согласно полученным результатам скорость $v_3=1.5$ м/с является лучшей для показателей сепарации гидроциклона в рассмотренном ряду.

Таким образом, разработана математическая модель и алгоритм расчета позволяет достаточно полно описать поведение частиц материала в циклонных вихревых аппаратах, что дает возможность более полного моделирования и исследования процесса сепарации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатами работы могут быть сделаны следующие выводы:

- Предложена методика расчета позволяет адекватно отображать реальную картину рециркуляционных и закрученных течений, которые возникают в гидроциклоне магистрального насоса НМ 7000.
- Разработанная математическая модель может быть использована для исследования процесса сепарации и прогнозирования гидродинамики сложных течений в гидроциклонах аналогичных типоразмеров.
- Разработана и апробирована методика расчета разделительной способности гидроциклона, что позволяет учитывать влияние турбулентного вихревого потока на траекторию движения частиц и результаты разделения дисперсных фаз в гидроциклоне.

ВЫВОДЫ

- Разработана математическая модель для исследования процесса сепарации гетерогенных систем в циклонных вихревых аппаратах.
- Разработана и апробирована методика расчета разделительной способности ци-

клонных вихревых аппаратах позволяет учитывать влияние турбулентного вихревого потока на траекторию движения частицы и результаты деления дисперсных фаз.

- Предложенная методика численного расчета позволяет адекватно отображать реальную картину рециркуляционных и закрученных течений, представлены результаты численного эксперимента по определению параметров течений и разделения дисперсионной среды и дисперсной фазы в гидроциклоне магистрального насоса НМ-7000.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Ленинград. 1982.
- [2] Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технология. – М.: «Высшая школа» 1990. – 522с.
- [3] Иванов А.А. Расчет и конструирование вихревых сепарационных аппаратов на основе структурного анализа гидродинамики закрученных потоков. – Дисс. ... докт. техн. наук. - Дзержинск.: НГТУ, 1998. - 270 с.
- [4] Терновский И.Г., Кутепов А.М., Кузнецов А.А., Лагуткин М.Г. О распределении тангенциальных скоростей в гидроциклонах. - Химия и хим. технология. Известия вузов, 1979, т.22, вып.5, с.630-634.
- [5] Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. - М.: Наука, 1994. - 356с
- [6] Фафулин В.А. Гидродинамика и разделительная способность течений в гидромеханических устройствах и аппаратах. – Дисс. ... докт. техн. наук. - Казань.: КГТУ, 2003. - 255 с.
- [7] Сахаров А.С., Щербина В.Ю., Величко Ю.М. Сахаров В.А. Коротеева П.И. Математическая модель для исследования полей скоростей и давлений в механическом оборудовании промышленности строительных материалов //Будівельні матеріали, виробництва санітарна техніка. – 2000. – №15. – С. 11-16.
- [8] Соколов Н.В. Создание общей стохастической физико-химической теории процессов разделения гетерогенных систем: Дис... д-ра техн. наук. Киев.: КТИП, 1988. - 411 с.