

## Энергетика и электротехника

УДК 622.755

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ ЧАСТИЦ В ПОГРУЖНЫХ ГИДРОЦИКЛОНАХ

**Н.А. Антипина<sup>1</sup>, С.Н. Пещере́нко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ЗАО «Новомет-Пермь»

Россия, 614065, г. Пермь, ш. Космонавтов, 395

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

E-mail: antipina@novomet.ru

*Разработана методика расчета рабочего процесса погружных гидроциклонов. Течение жидкости описывается уравнениями Рейнольдса и k-ε моделью турбулентности; перенос твердых частиц – моделью Лагранжа. Для верификации методики проведена серия расчетов коэффициентов сепарации ряда гидроциклонов. Показано, что немонотонная зависимость коэффициента сепарации от подачи Q объясняется конкуренцией двух процессов: улучшением центробежной сепарации в шнеке при увеличении Q и усилением перемешивания потока в формирующихся крупномасштабных вихрях в области его поворота на 180°. Найдены геометрические параметры гидроциклона, изменяя которые можно подавить вихреобразование при повороте потока и увеличить коэффициент сепарации. Предложен критерий гидродинамического подобия гидроциклонов.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, погружные гидроциклоны, вычислительная гидродинамика, коэффициент сепарации.

В настоящее время наличие механических примесей (частиц породы и пропанта) в добываемой жидкости является типичным фактором, осложняющим добычу нефти, а доля отказов из-за засорения или износа погружных насосов составляет в среднем 30–50 % [1].

Для предотвращения попадания механических примесей в погружной насос используются фильтры объемного [2] и поверхностного [3] действия. Время работы объемных фильтров ограничено емкостью их порового пространства (обычно несколько десятков литров). До засорения они могут задержать не более  $\sim 10^2$  кг породы. Поэтому в последнее время такие фильтры применяются все реже. В фильтрах поверхностного действия, например щелевых, отделение механических примесей от жидкости происходит в щелях на поверхности фильтра. Хотя такие фильтры получили широкое распространение, они обладают недостаточной надежностью в условиях отложения солей, скрепляющих частицы с поверхностью каналов фильтра.

---

Наталья Анатольевна Антипина (к.т.н., доц.), ведущий математик лаборатории фильтрационных систем.

Сергей Николаевич Пещере́нко (д.ф.-м.н., проф.), профессор кафедры «Общая физика».

В этих более сложных условиях эффективны сепараторы механических примесей гравитационного или гидроциклонного типов.

В сепараторах гравитационного типа (рис. 1) отделение частиц происходит при повороте потока жидкости с твердыми частицами, движущегося сверху вниз, на  $180^\circ$ . Такие устройства имеют простую конструкцию, но тонкость очистки и коэффициент сепарации ( $k$ ) уменьшаются при увеличении подачи ( $Q$ ) [4].

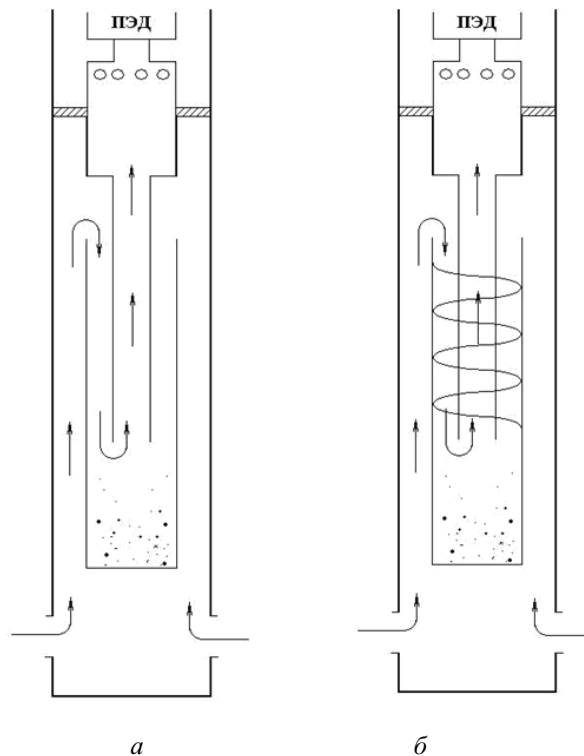


Рис. 1. Гравитационный сепаратор (а), гидроциклон (б)

В гидроциклонах (см. рис. 1) сепарация протекает под действием центробежных сил при движении жидкости в неподвижном спиральном канале вокруг центральной трубы. При повороте потока на  $180^\circ$ , когда движение вниз сменяется на движение вверх, происходит дополнительная гравитационная сепарация.

В работе [4] нами была предложена имитационная модель рабочего процесса гравитационного сепаратора, а в [5] – гидроциклона. Было показано, что на начальном участке, при малых  $Q$ , зависимость  $k(Q)$  – монотонно возрастающая. Однако, согласно экспериментальным данным, коэффициент сепарации гидроциклонов при увеличении подачи может изменяться немонотонно [7], [6]. Объяснение этих экспериментальных данных и описание рабочего процесса погружных гидроциклонов во всем диапазоне подач является целью данной работы.

### Математическая модель

Ламинарное течение жидкости в гидроциклонах при числах Рейнольдса, меньших 2000, что соответствует подачам  $40\text{--}50\text{ м}^3/\text{сут}$ , для самого распространенного 5-го габарита [8] описывали уравнениями непрерывности (1) и Навье – Стокса (2):

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_k}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_k}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right) + g_i, \quad (2)$$

где  $U_i$  – компоненты скорости;  $\rho$  – плотность;  $\mu$  – динамическая вязкость.

При больших подачах использовали уравнения непрерывности (3), Рейнольдса (4) и модель турбулентности  $k-\varepsilon$  (6), (7):

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{U}_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_j \bar{U}_k) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + g_i; \quad (4)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\tau} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left( C_{\tau 1} \left( \mu_t \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) \right) - C_{\tau 2} \rho \varepsilon \right), \quad (7)$$

где  $U_i$  – осредненная скорость;  $p$  – осредненное давление;  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\tau$ ,  $C_{\tau 1}$ ,  $C_{\tau 2}$  – константы модели.

Выбор модели турбулентности не является критичным. Как наши данные, так и исследования турбулентного течения в гидромашинах [9–11] показывают, что модели турбулентности  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ ,  $SST$  дают близкие результаты.

Расчетная сетка имела 15–20 ячеек поперек канала. На стенках размер ячеек соответствовал  $y^+ = 30...60$ , что удовлетворяет условиям применения модели турбулентности  $k-\varepsilon$ . Коэффициент роста ячеек от стенки в объем был равен 1,2. На входе в сепаратор задавали массовый расход, на выходе – статическое давление. Для модели турбулентности в качестве граничного условия задавали открытую границу на выходе и значения  $k$  и  $\varepsilon$  на входе в гидроциклон [11].

Моделировали только установившийся рабочий процесс, т. е. стационарное течение жидкости, для чего использовали метод установления: решали нестационарное уравнение Навье – Стокса или Рейнольдса с фиктивным [12] шагом по времени  $\Delta t$ , который выбирали из условия ускорения сходимости нестационарной задачи к стационарному решению [13]:

$$\Delta t \leq \frac{0.3 \cdot h}{\max(U_{bc}, U_{node})}, \quad (8)$$

где  $U_{bc}$  – среднее арифметическое скоростей на открытых границах,  $U_{node}$  – в объеме;  $h$  – минимальный размер ячейки.

Сходимость расчета контролировалась по невязкам компонент скорости в объеме расчетной области и на открытых границах:

$$\sqrt{\sum_n \frac{(u_i - u_{i-1})^2}{n}} \leq 10^{-5}, \quad (9)$$

где  $u_i$  – компоненты скорости на  $i$ -й итерации по времени;  $n$  – количество элементов в объеме или на открытых границах.

Для описания переноса механических примесей потоком жидкости был использован подход Лагранжа [13], согласно которому каждая частица движется в соответствии с уравнением Ньютона. Объемная доля частиц была порядка 0,3 %, поэтому считали, что частицы не взаимодействуют друг с другом и не влияют на течение жидкости. Ранее [7] нами было показано, что необходимо учитывать следующие силы, действующие на частицы: тяжести, сопротивления, Архимеда и «присоединенную массу жидкости» – т. е. явление увлечения жидкости движущейся частицей. Окончательно получаем уравнение

$$m_p \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = C_x S \rho_f \frac{\mathbf{w}|\mathbf{w}|}{2} + \frac{4}{3} \pi r^3 \mathbf{g}(\rho_p - \rho_f) + \frac{1}{2} m_f \left( \frac{d\mathbf{U}_f}{dt} - \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} \right), \quad (10)$$

где  $S$  – площадь сечения частицы;  $\mathbf{w} = \mathbf{U}_p - \mathbf{U}_f$  – разность скоростей частицы и жидкости;  $\rho_f$  – плотность жидкости;  $\rho_p$  – плотность частицы;  $m_p$  – масса частицы;  $m_f$  – масса жидкости, вытесненной частицей; коэффициент сопротивления  $C_x$  зависит от формы частицы и величины  $|\mathbf{w}|$ .

Конечной целью расчетов было нахождение коэффициента сепарации  $k$ , равного отношению массы отделившихся частиц к общей массе частиц на входе в сепаратор.

### Верификация модели

В качестве критерия адекватности предложенной гидродинамической модели гидроциклона выбрали соответствие измеренных и вычисленных значений коэффициента сепарации.

Стендовые испытания погружных сепараторов проводились нами на разработанном испытательном стенде, для чего была создана методика испытаний [14]. В качестве рабочей жидкости использовали смесь воды и 0,1 % мас. кварцевого песка, распределение частиц которого по размерам приведено в таблице.

**Распределение частиц песка по размеру**

|                         |     |     |     |     |     |      |      |      |      |     |     |     |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| Размер частиц, мм       | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 |
| Массовая доля частиц, % | 1,5 | 3,9 | 2,0 | 2,5 | 7,8 | 15,6 | 20,3 | 17,4 | 11,1 | 6,3 | 4,7 | 2,6 |

Первым был испытан разработанный нами гравитационный сепаратор 5-го габарита [15] в диапазоне подач 25–50 м<sup>3</sup>/сут. Полученные данные приведены на рис. 2. Видно, что в пределах ошибки эксперимента  $\pm 7$  % получено совпадение расчетных и экспериментальных данных.

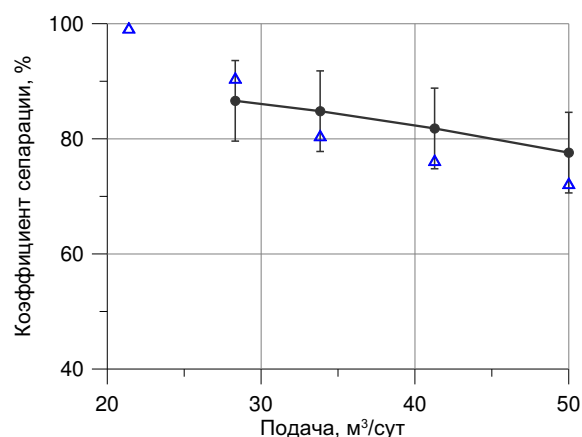


Рис. 2. Зависимость коэффициента сепарации гравитационного сепаратора от подачи:  
● — эксперимент;  $\Delta$  — расчет

На рис. 3 приведены траектории частиц в области поворота потока при подачах 25 и 50 м³/сут. Видно, что с увеличением подачи все большее число частиц увлекается восходящим потоком, поэтому сепарация ухудшается.

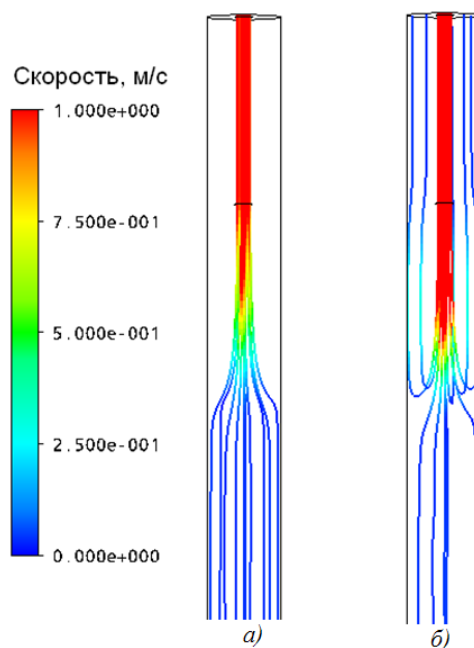


Рис. 3. Траектории частиц размером 750 мкм в области поворота потока в гравитационном сепараторе:  
а — при 25 м³/сут; б — при 50 м³/сут

Также был испытан разработанный нами погружной гидроциклон 5-го габарита [16] в диапазоне подач 100–600 м³/сут. Измеряли и рассчитывали зависимость коэффициента сепарации от подачи. Полученные данные приведены на рис. 4. Видно, что, как и в предыдущем случае, получено совпадение расчетных и экспериментальных данных с точностью  $\pm 7\%$ .

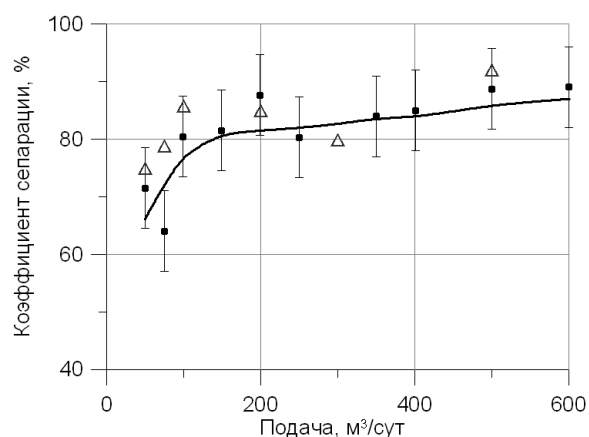


Рис. 4. Зависимость коэффициента сепарации гидроциклона от подачи:  
● – эксперимент; Δ – расчет

Дополнительно были проведены стендовые измерения и расчет коэффициента сепарации различных фракций твердых частиц в гидроциклоне при фиксированной подаче 100 м³/сут. Полученные результаты (рис. 5) также позволяют сделать вывод о приемлемом совпадении экспериментальных и расчетных данных.

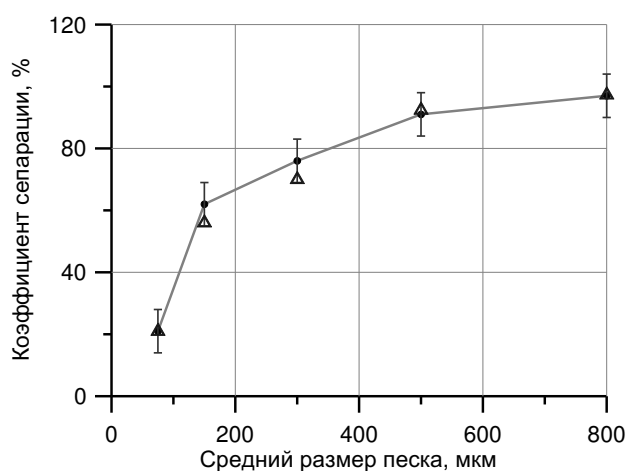


Рис. 5. Коэффициент сепарации разных фракций твердых частиц при фиксированной подаче жидкости:  
● – эксперимент, Δ – расчет

Устройство на основе выбранной конструкции гидроциклона было испытано в эксплуатационных условиях в ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз», опытно-промышленные испытания были признаны успешными [4].

#### **Объяснение немонотонной зависимости коэффициента сепарации от подачи в гидроциклонах**

Увеличение коэффициента сепарации с ростом подачи (см. рис. 5) обусловлено ростом центробежных сил, действующих на частицы механических примесей при их движении в спиральных каналах гидроциклона. Можно ожидать, что при больших подачах, особенно в области поворота потока на 180°, будут фор-

мироваться крупномасштабные вихри, что приведет к уменьшению коэффициента сепарации.

С целью проверки этого предположения нами были проведены расчеты зависимости  $k(Q)$  для гидроциклона 5-го габарита [16] при подачах до 4000 м<sup>3</sup>/сут, и действительно была получена немонотонная зависимость  $k(Q)$  (рис. 6). На повороте потока сформировались вихри (рис. 7).

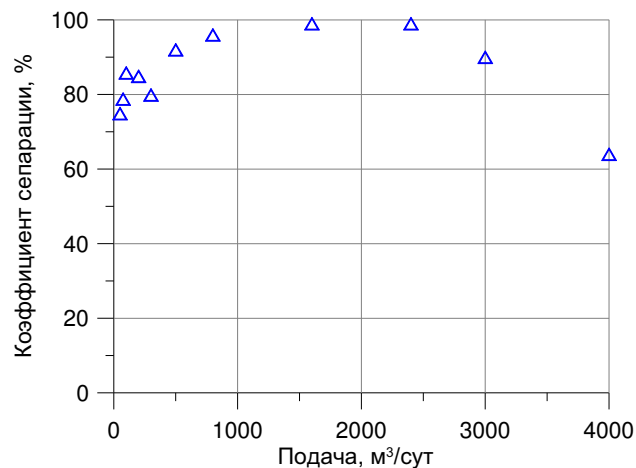


Рис. 6. Зависимость коэффициента сепарации гидроциклона 5-го габарита [16] от подачи в расширенном диапазоне подач

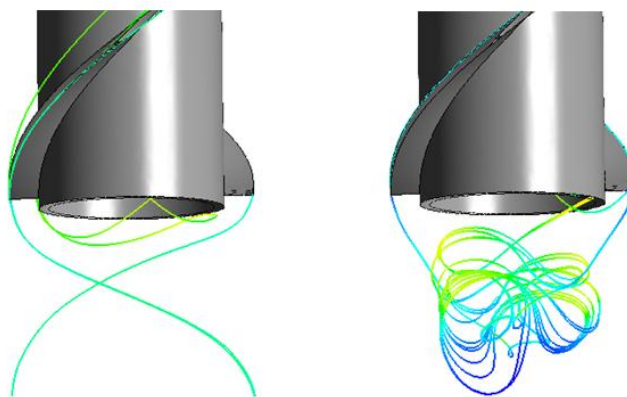


Рис. 7. Траектории частиц в области поворота потока на 180° при  $Q = 1600$  и  $4000$  м<sup>3</sup>/сут

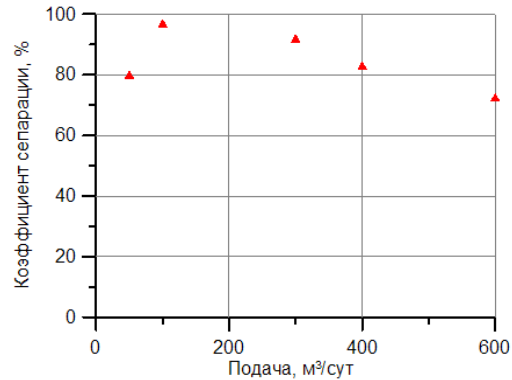
Аналогичная немонотонная зависимость была получена и на модельной конструкции гидроциклона (рис. 8). Следовательно, для гидроциклонов характерна именно немонотонная зависимость коэффициента сепарации от подачи.

Если продлить внутреннюю трубу, на которую навиваются лопасти, то образуется коаксиальный цилиндрический канал без лопастей, т. е. вихревая камера, в которой жидкость с частицами будет двигаться по спирали с уменьшающейся окружной компонентой скорости. Если длину вихревой камеры подобрать так, чтобы на выходе из камеры уже не было вращения жидкости, то можно ожидать уменьшения образования вихрей, а значит, улучшения сепарации. Расчеты подтвердили это предположение. На рис. 9 показаны линии тока в месте поворота потока, на рис. 10 приведены результаты расчета коэффициента сепарации. Из

рис. 10 видно, что чем больше размер частиц, тем большей должна быть длина вихревой камеры для получения максимальной сепарации.



*a*

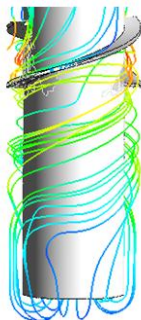


*б*

Рис. 8. Конструкция модельного гидроциклона (*a*); зависимость его коэффициента сепарации от подачи (*б*)



*a*



*б*

Рис. 9. Линии тока в месте поворота потока: *a* – в конструкции без вихревой камеры; *б* – с камерой

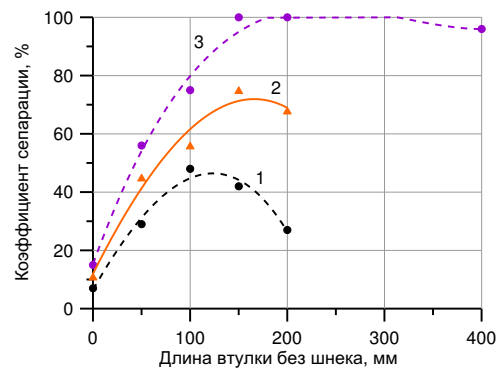


Рис. 10. Зависимость коэффициента сепарации от длины вихревой камеры при подаче 100 м³/сут для частиц размером: 1 – 90 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 500 мкм

### Критерий подобия погружных гидроциклонов

Теория подобия позволяет на основе проведенных испытаний получать закономерности, справедливые не только для данного сепаратора, но и для всей группы подобных изделий. Основные положения теории подобия [17] применительно к нашей задаче состоят в следующем:

- совокупность параметров, полностью описывающих рабочий процесс сепаратора – свойства жидкости, конструкцию и рабочие характеристики сепаратора, группируется в набор безразмерных комбинаций;
- рабочая характеристика сепаратора записывается в виде функциональной зависимости между этими безразмерными комбинациями (это утверждение носит название  $\pi$ -теоремы).

Для погружных сепараторов такими параметрами являются: кинематическая

вязкость  $\nu$ , плотность  $\rho$ , средняя скорость  $U$  жидкости, радиус  $R$ , плотность  $\rho_s$  твердых частиц, ускорение свободного падения  $g$ , геометрические размеры гидроциклона: диаметр  $D$  и длина  $L$  шнека, диаметр внутренней трубы  $d$ , высота лопасти  $h$ , толщина внутренней трубы  $\delta$ , число лопастей  $n$  и коэффициент сепарации  $k$ .

Из первых пяти физических параметров получаем основные критерии гидродинамического подобия – число Рейнольдса  $Re$  и число Фруда  $Fr$ :

$$Re = \frac{U \cdot h}{\nu}, \quad Fr = \frac{U^2}{R \cdot g}. \quad (11)$$

Согласно  $\pi$ -теореме коэффициент сепарации связан с безразмерными характеристиками следующей зависимостью:

$$k = f\left(Re, Fr, \frac{L}{D}, \frac{h}{D}, \frac{\delta}{D}, n\right). \quad (12)$$

В (12) первые два аргумента,  $Re$  и  $Fr$ , описывают режим работы; остальные –  $L/D$ ,  $h/D$ ,  $\delta/D$ ,  $n$  – конструкцию гидроциклона.

Для проверки возможности описания зависимости коэффициента сепарации от режимов работы выражением (1) были изготовлены два геометрически подобных гидроциклона в 5-ом и 3-ем габаритах. Они имели одинаковые значения аргументов  $L/D$ ,  $h/D$ ,  $\delta/D$ ,  $n$ , а при их испытаниях варьировали число Рейнольдса (в пределах от 160 до 2100) и число Фруда (в пределах от 0,7 до 4). Результаты испытаний приведены на рис. 11, откуда видно, что все экспериментальные значения образовали гладкую поверхность, т. е. была получена функция  $k = f(Re, Fr)$ , что подтверждает справедливость предложенного критерия подобия (1).

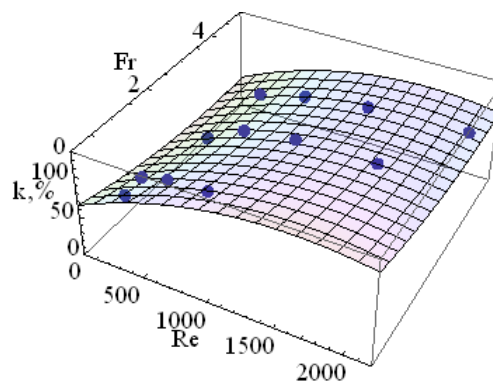


Рис. 11. Зависимость коэффициента сепарации от числа Рейнольдса и Фруда

### Заключение

Разработана и верифицирована имитационная модель рабочего процесса погружных сепараторов механических примесей, включающая выбор и обоснование уравнений движения жидкости и частиц механических примесей, граничных условий, требований к расчетной сетке, критериям сходимости расчета. Показано, что относительная ошибка расчета коэффициента сепарации не превышает  $\pm 7\%$  во всем диапазоне подач.

Установлено, что в погружных гидроциклонах увеличение коэффициента сепарации  $k$  с ростом подачи  $Q$  объясняется ростом центробежных сил, действу-

ющих на частицы механических примесей при их движении в спиральных каналах гидроциклона. Рост заканчивается, когда при увеличении  $Q$  формируются крупномасштабные вихри в области поворота потока на  $180^\circ$ . Поэтому в целом зависимость  $k(Q)$  немонотонная.

Показано, что изменяя длину вихревой камеры можно улучшить сепарацию за счет подавления вихреобразования в области поворота потока на  $180^\circ$ .

Предложен критерий гидродинамического подобия для погружных гидроциклонов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ахметгареев Р.Ф.* Опыт работы с осложненным фондом скважин на месторождениях ООО «РН-Пурнефтегаз» // Инженерная практика. – 2012. – № 12.
2. *Тимашиев Г.В., Калинин О.Ж.* Скважинный фильтр. Авторское свидетельство № 587242. Опубл. 05.01.1978. Бюл. № 1.
3. *Захаров Б.С., Чигряй В.А., Ильяхин В.В.* Фильтр спирально-щелевой скважинного глубинного насоса (варианты). Патент на полезную модель РФ № 56 947. Опубликовано 27.09.2006. Бюл. № 27.
4. *Антипина Н.А., Каплан А.Л., Пещереко С.Н.* Погружные сепараторы механических примесей // Бурение и нефть. – 2011. – № 12. – С. 39–42.
5. *Антипина Н.А., Пещереко С.Н.* Математическое моделирование движения твердых частиц в погружных сепараторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физико-математические науки. – 2012. – № 2(146). – С. 62–68.
6. *Булат А.В.* Повышение эффективности работы скважинного насосного оборудования за счет применения сепараторов механических примесей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 2013.
7. *Сабиров А. А.* Стендовые испытания скважинных сепараторов механических примесей // Инженерная практика. – 2011. – № 5. – С. 150–155.
8. *Антипина Н.А., Пещереко С.Н.* Математическое моделирование движения твердых частиц в погружных сепараторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физико-математические науки. – 2012. – № 2(146). – С. 62–68.
9. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 72 с.
10. *Алексенский В.А., Жарковский А.А., Пугачев П.В.* Исследование структуры потока и прогнозирование характеристик секционного центробежного насоса низкой быстроходности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 13. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2011. – № 1(2). – С. 407–410.
11. *Алексенский В.А., Жарковский А.А., Пугачев П.В.* Расчетное определение кавитационных характеристик центробежных насосов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 13. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2011. – № 1(2). – С. 411–414.
12. *Свобода Д.Г., Жарковский А.А., Пугачев П.В., Донской А.С.* Исследование влияния параметров расчетного трехмерного вязкого течения на прогнозные характеристики осевого насоса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 14. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2012. – № 1(2). – С. 685–688.
13. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.
14. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide.* – Canonsburg, 2006. – 312 p.
15. *Антипина Н.А.* Моделирование рабочих процессов в устройствах защиты нефтяных насосов от засорения с целью повышения их эффективности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 2012.
16. *Антипина Н.А., Каплан А.Л., Пещереко С.Н. и др.* Гравитационный сепаратор для очистки скважинной жидкости. Патент на полезную модель RU 108 799, опубл. 27.09.2011. Бюл. № 27.
17. *Антипина Н.А., Пещереко С.Н.* Гравитационный сепаратор для очистки скважинной жидкости. Патент на полезную модель RU 102 057, опубл. 10.02.2011. Бюл. № 4.
18. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 1. Механика. – М.: Наука, 1979. – 520 с.

*Статья поступила в редакцию 8 апреля 2014 г.*

## SIMULATION OF PARTICLE SEPARATION IN SUBMERSIBLE HYDROCYCLONES

***N.A. Antipina<sup>1</sup>, S.N. Peshcherenko<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> Novomet-Perm  
395, Shosse Kosmonavtov, Perm, 614065, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University  
29, Komsomolskiy prospect, Perm, 614990, Russian Federation

*The paper deals with the development of the work process calculation method for submersible hydrocyclones. Fluid workflow is described by the Reynolds equation and  $k-\varepsilon$  turbulence model. Transportation of solid particles is described by the Lagrange model. Series of separation ratio calculations was carried out to verify the method. The research shows that nonmonotonic dependence between the separation ratio and  $Q$  supply can be explained by the competition of two processes: improvement of centrifugal separation in screw feeder when  $Q$  is increased and enhancement of the flow intermixing in large-scale vortices in the area where they turn 180 degrees. Geometrical parameters of hydrocyclon are identified; by changing these parameters the vortex formation during the stream turn can be eliminated and the separation ratio can be increased. The paper also proposes the criterion of hydrodynamic similarity of the submersible hydrocyclones.*

**Keywords:** oil industry, submersible hydro cyclones, separation ratio, computational fluid dynamics.