

Описание рабочего процесса погружных гидроциклонов

Н.А. Антипина, к.т.н.,
(ЗАО «Новомет-Пермь»),
С.Н. Пещеренко, д.ф.-м.г.
(Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет)

Адреса для связи: antipina@novomet.ru,
PSN@novomet.ru

Ключевые слова: добыча нефти, погружные сепараторы гидроциклонного типа, коэффициент сепарации, вычислительная гидродинамика.

В настоящее время наличие механических примесей (частиц породы и проппанта) в добываемой жидкости является одним из основных факторов, осложняющих добычу нефти, 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 100 кг породы, поэтому в последнее время 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.

В указанных условиях эффективны сепараторы механических примесей гравитационного или гидроциклонного типа. В сепараторах гравитационного типа отделение частиц происходит при повороте потока жидкости с твердыми частицами, движущегося сверху вниз, на 180°. Такие устройства имеют простую конструкцию, но степень очистки и коэффициент сепарации k уменьшаются при увеличении подачи Q [4]. В гидроциклонах сепарация осуществляется под действием центробежных сил при движении жидкости в неподвижном спиральном канале вокруг центральной трубы. При повороте потока на 180°, когда движение вниз сменяется на движение вверх, происходит дополнительная гравитационная сепарация.

Description of operating procedure of submersible hydro cyclones

N.A. Antipina (Novomet-Perm CJSC, RF, Perm), S.N. Peshcherenko (Perm National Research Polytechnic University, RF, Perm)

E-mail: antipina@novomet.ru, PSN@novomet.ru

Key words: oil industry, submersible hydro cyclones, separation ratio, computational fluid dynamics.

A simulation model of workflow for submersible hydro cyclones was developed. It is established that increasing of the separation ratio k with the growth of the flow rate Q is explained by the growth of centrifugal forces acting on the mechanical particles. Growth ends when large-scale vortices form in the area of the stream turning to 180 degrees as flow rate Q continues to increase. Therefore, the dependence $k(Q)$ is non-monotonic in general. It is shown that separation ratio can be improved by changing the length of the vortex chamber through decreasing vortex formation in the area of flow turn. The criterion of hydrodynamic similarity for the submersible hydro cyclones is suggested.

В работе [4] предложена имитационная модель рабочего процесса гравитационного сепаратора, в работе [7] – гидроциклона. Показано, что на начальном участке зависимость $k(Q)$ монотонно возрастает. Согласно экспериментальным данным коэффициент сепарации гидроциклонов при повышении подачи может увеличиться [4], остаться постоянным [5] и даже снизиться [6]. Объяснение этих, на первый взгляд, противоречивых явлений и описание рабочего процесса погружных гидроциклонов являются целью данной статьи.

Гидродинамическая модель

Экспериментальные данные о зависимости коэффициента сепарации от подачи были получены в стендовых условиях. Рабочей жидкостью являлась смесь воды и твердых частиц (не более 10 г/л, или массовой долей около 0,1 %). Легко посчитать, что в этих условиях среднее расстояние между частицами превышало $10r$ (r – средний радиус частиц). Поэтому в разрабатываемой модели можно пренебречь как влиянием частиц механических примесей на движение жидкости, так и их столкновениями.

Обычно сепараторы проектируются так, чтобы скорость движения жидкости в нисходящем и восходящем потоках была примерно равной. Оценки показывают, что в сепараторах 5 и 5А габаритов критическое значение числа Рейнольдса Re , составляющее приблизительно 2300 [8], достигается при подаче около 40–50 м³/сут. Поэтому при меньших подачах использовали уравнение Навье – Стокса и течение считали ламинарным, при больших подачах – уравнение Рейнольдса и модель турбулентности $k - \epsilon$ (ϵ – коэффициент, характеризующий

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

гравитационную неустойчивость). Выбор модели турбулентности не является критичным. Данные как авторов статьи, так и исследований турбулентного течения в гидромашине [9–11] показывают, что модели турбулентности $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST дают близкие результаты.

Расчетная сетка имела 15–20 ячеек, расположенных перпендикулярно каналу. На стенках размер ячеек составлял $y^+ = 30-60$, что удовлетворяет условиям применения модели турбулентности $k-\epsilon$. От стенки в объем коэффициент роста ячеек 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, а также значения k и ϵ на входе в гидроциклон [11].

Моделировали только установившийся рабочий процесс, т.е. стационарное течение жидкости. Для этого использовали метод установления: решали нестационарное уравнение Навье – Стокса или Рейнольдса с фиктивным (И.А. Белов, С.А. Исаев, 2001 г.) шагом по времени Δt , который выбирали из условия ускорения сходимости нестационарной задачи к стационарному решению (ANSYS CFX-Solver Theory Guide. – 2006)

$$\Delta t \leq \frac{0,3h}{\max(u_{bc}, u_{node})} \quad (1)$$

где h – минимальный размер ячейки; u_{bc} , u_{node} – среднее арифметическое значение скоростей соответственно на открытых границах и в объеме.

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

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

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

Для описания переноса механических примесей потоком жидкости был использован подход Лагранжа (ANSYS CFX-Solver Theory Guide. – 2006), согласно которому каждая частица движется в соответствии с уравнением Ньютона. Ранее [7] было показано, что необходимо учитывать следующие силы, действующие на частицы: тяжести; сопротивления; Архимеда и «присоединенную массу жидкости» – т.е. увлечение жидкости движущейся частицей.

Верификация модели

В стендовых условиях обычно измеряется интегральная характеристика сепаратора – коэффициент сепарации, поэтому в качестве критерия адекватности предложенной гидродинамической модели гидроциклона было принято соответствие измеренных и вычисленных значений этого коэффициента. Для проведения стендовых испытаний погружных сепараторов авторами разработаны испытательный стенд и методика испытаний [12]. В качестве рабочей жидкости использо-

валась смесь воды и кварцевого песка массовой долей 0,1 %, распределение частиц которого по размерам приведено в таблице.

Первым был испытан разработанный авторами гравитационный сепаратор 5 габарита [13] в диапазоне подач 25–50 м³/сут. Получена монотонно уменьшающаяся зависимость коэффициента сепарации от подачи. В пределах погрешности эксперимента ± 7 % рассчитанные значения совпали с экспериментальными данными. По полученным в результате расчета траекториям частиц установлено, что с увеличением подачи все большее число частиц увлекается восходящим потоком, поэтому сепарация ухудшается.

Кроме того, был испытан разработанный авторами погружной гидроциклон 5 габарита [14] в диапазоне подач 100–600 м³/сут. Как и в предыдущем случае, было получено совпадение расчетных и экспериментальных данных с погрешностью ± 7 %. Однако характер зависимости коэффициента от подачи возрастающий.

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

Устройство на основе выбранной конструкции гравитационного сепаратора гидроциклонного типа было испытано в промышленных условиях в ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» [4]. Лабораторные исследования проб, взятых из скважин, показали отсутствие частиц размером более 100 мкм. В некоторых скважинах наработка существенно превысила предыдущую наработку. Так, в скв. 5194 куста 516 наработка составила 534 сут, предыдущая наработка с щелевым фильтром на входе установки равнялась 17 сут. В отличие от щелевого фильтра гравитационные сепараторы не подвержены засорению мелкодисперсными частицами и отложениями солей. Опытно-промышленные испытания были признаны успешными. На 23.01.14 г. в ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» было установлено более 120 устройств на основе гидроциклонного сепаратора, в эксплуатации находится 65.

Причины немонотонной зависимости коэффициента сепарации от подачи в гидроциклонах

Увеличение коэффициента сепарации с повышением подачи 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 формироваться крупномасштабные вихри, что снизит коэффициент сепарации. С целью проверки этого предположения авторами проведены расчеты зависимости $k(Q)$ для гидроциклона 5 габарита [14] при подачах до 4000 м³/сут. В результате была получена немонотонная зависимость $k(Q)$ (рис. 1, а). При увеличении подачи на повороте потока

формировались вихри, которые ухудшали сепарацию. Аналогичная немонотонная зависимость $k(Q)$ была получена для модельной конструкции гидроциклона (см. рис. 1, б). Поэтому можно считать, что для гидроциклонов характерна немонотонная зависимость коэффициента сепарации от подачи.

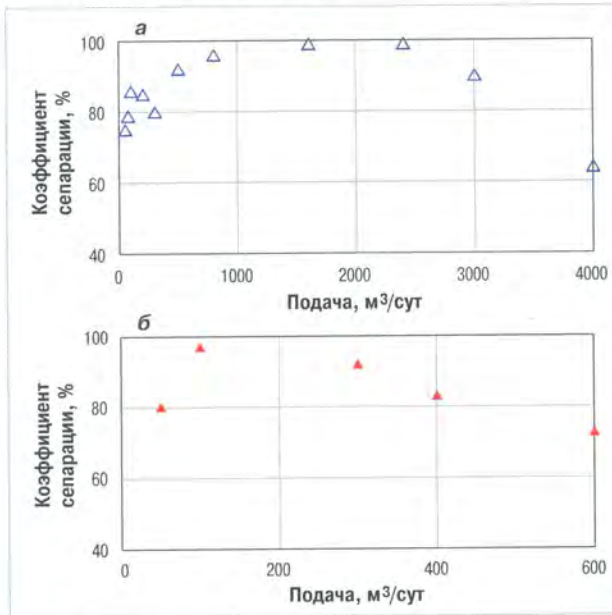


Рис. 1. Зависимость коэффициента сепарации гидроциклона 5 габарита (14) (а) и модельного гидроциклона (б) от подачи

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 нее не было вращения жидкости, то можно уменьшить образование вихрей, а следовательно, улучшить сепарацию. Расчеты подтвердили это предположение (рис. 2 и 3). Из рис. 3 видно, что чем больше размер частиц, тем длиннее должна быть вихревая камера для получения максимальной сепарации.

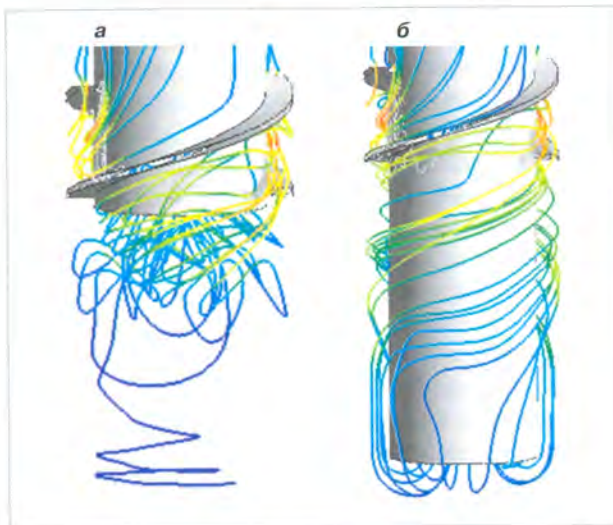


Рис. 2. Линии тока в месте поворота потока в конструкции без вихревой камеры (а) и с камерой (б)

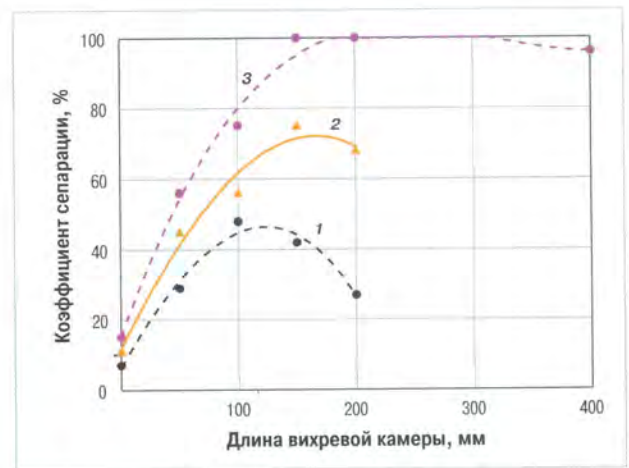


Рис. 3. Зависимость коэффициента сепарации от длины вихревой камеры при подаче 100 м³/сут для частиц размером 90 (1), 200 (2) и 500 (3) мкм

Критерий подобия погружных гидроциклонов

Теория подобия позволяет на основе результатов проведенных испытаний установить закономерности, справедливые не только для данного сепаратора, но и для всей группы подобных изделий. Основные положения теории подобия (Д.В. Сивухин, 1979 г.) применительно к рассматриваемой задаче заключаются 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 безразмерными комбинациями (это утверждение носит название π-теоремы).

Для погружных сепараторов такими параметрами являются кинематическая вязкость ν , плотность ρ , средняя скорость жидкости u , радиус R , плотность твердых частиц ρ_s , ускорение свободного падения g , геометрические размеры гидроциклона (диаметр D и длина L шнека, диаметр внутренней трубы d , высота лопасти h , толщина внутренней трубы δ , число лопастей n) и коэффициент сепарации k . Из первых пяти физических параметров получаем основные критерии гидродинамического подобия – число Рейнольдса Re и число Фруда Fr . Согласно π-теореме коэффициент сепарации связан с безразмерными характеристиками следующей зависимостью:

$$k = f\left(Re, Fr, \frac{L}{D}, \frac{h}{D}, \frac{\delta}{D}, n \right). \quad (3)$$

Для проверки возможности описания зависимости коэффициента сепарации от режимов работы выражением (3) были изготовлены два гидроциклона 5 и 3 габаритов, имеющих одинаковые значения параметров $L/D, h/D, \delta/D, n$. При их испытаниях варьировали число Рейнольдса (от 160 до 2100) и число Фруда (от 0,7 до 4). Результаты испытаний приведены на рис. 4, из которого видно, что экспериментальные значения образовали гладкую поверхность, т.е. была получена функция $k = f(Re, Fr)$, что подтверждает справедливость предложенного критерия подобия (3).

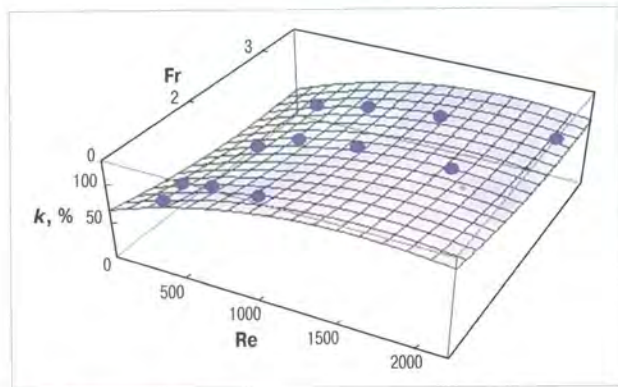


Рис. 4. Зависимость коэффициента сепарации от Re и Fr

Выводы

1. Разработанная и верифицированная имитационная модель рабочего процесса погружных сепараторов механических примесей включает выбор и обоснование уравнений движения жидкости и частиц механических примесей, граничных условий, требований к расчетной сетке, критериям сходимости расчета. Относительная погрешность расчета коэффициента сепарации составляет около $\pm 7\%$ во всем диапазоне подач.

2. В погружных сепараторах гидроциклонного типа повышение коэффициента сепарации с увеличением подачи объясняется ростом центробежных сил, действующих на частицы механических примесей при их движении в спиральных каналах гидроциклона. Рост центробежных сил заканчивается, когда при увеличении подачи формируются крупномасштабные вихри в области поворота потока на 180° . Поэтому в целом зависимость коэффициента сепарации от подачи является немонотонной.

3. Изменением длины вихревой камеры можно улучшить сепарацию за счет подавления вихреобразования в области поворота потока на 180° .

Список литературы

1. Ахметгареев Р.Ф. Опыт работы с осложненным фондом скважин на месторождениях ООО «РН-Пурнефтегаз»//Инженерная практика. – 2012. – № 12.
2. А.С. № 587242. Скважинный фильтр/Г.В. Тимашев, О.Ж. Калнин; опубл. 05.01.78.
3. Пат. на полезную модель № 56 947 РФ Б.С. Фильтр спирально-щелевой скважинного глубинного насоса (варианты)/Б.С. Захаров, В.А. Чигряй, В.В. Ильяхин; опубл. 27.09.06
4. Антипина Н.А., Каплан А.Л., Пещеренко С.Н. Погружные сепараторы механических примесей//Бурение и нефть. – 2011. – № 12. – С. 39–42.
5. Сабиров А.А. Стендовые испытания скважинных сепараторов механических примесей//Инженерная практика. – 2011. – № 5. – С. 150–155.
6. Булат А.В. Повышение эффективности работы скважинного насосного оборудования за счет применения сепараторов механических примесей//Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. – М., 2013.

7. Антипина Н.А., Пещеренко С.Н. Математическое моделирование движения твердых частиц в погружных сепараторах. Сер. Физико-математические науки//Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – №2 (146). – С. 62–68.

8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

9. 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 научного центра РАН, 2011. – С. 407–410.

10. 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 научного центра РАН, 2011. – С. 411–414.

11. Исследование влияния параметров расчетного трехмерного вязкого течения на прогнозные характеристики осевого насоса/Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский, П.В. Пугачев., А.С. Донской//Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 14. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2012. – С. 685–688.

12. Антипина Н.А. Моделирование рабочих процессов в устройствах защиты нефтяных насосов от засорения с целью повышения их эффективности//Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Пермь, 2012.

13. Пат. на полезную модель № 108 799 РФ. Гравитационный сепаратор для очистки скважинной жидкости/Н.А. Антипина, А.Л. Каплан, С.Н. Пещеренко (и др.); опубл. 27.09.11. – Бюл. № 27.

14. Пат. на полезную модель № 102 057 РФ. Гравитационный сепаратор для очистки скважинной жидкости/Н.А. Антипина, А.Л. Каплан, С.Н. Пещеренко (и др.); опубл. 10.02.11. – Бюл. № 4.

References

1. Akhmetgarayev R.F., *Inzhenernaya praktika*, 2012, no. 12.
2. Certificate of authorship no. 587242, *Skvazhinnyy fil'tr* (Well strainer), authors: Timashev G.V., Kalnin O.Zh.
3. Utility patent no. 56947 RF. *Fil'tr spiral'no-shchelevoy skvazhinnogo glubinnogo nasosa (varianty)* (Axial helix filter of downhole pumps (versions)); Inventors: Zakharov B.S., Chigriyay V.A., Ilyukhin V.V.
4. Antipina N.A., Kaplan A.L., Peshcherenko S.N., *Burenie i nef'tyu*, 2011, no. 12, pp. 39–42.
5. Sabirov A.A., *Inzhenernaya praktika*, 2011, no. 5, pp. 150–155.
6. Bulat A.V., *Povyshenie effektivnosti raboty skvazhinnogo nasosnogo oborudovaniya za schet primeneniya sепараторов mekhanicheskikh primesey* (Improving the efficiency of the downhole pumping equipment through the use of solids separators): thesis of the candidate of technical sciences, 2013.
7. Antipina N.A., Peshcherenko S.N., *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPTU. Fiziko-matematicheskie nauki* – St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 2012, no. 2 (146), pp. 62–68.
8. Idel'chik I.E., *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistance), Moscow: Mashinostroenie Publ., 1992, 672 p.
9. Aleksenskiy V.A., Zharkovskiy A.A., Pugachev P.V., *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra rossiyской akademii nauk*, 2011, v. 13, pp. 407–410.
10. Aleksenskiy V.A., Zharkovskiy A.A., Pugachev P.V., *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra rossiyской akademii nauk*, 2011, v. 13, pp. 411–414.
11. Svoboda D.G., Zharkovskiy A.A., Pugachev P.V., Danskoj A.S., *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra rossiyской akademii nauk*, 2012, v. 14, pp. 685–688.
12. Antipina N.A., *Modelirovanie rabochikh protsessov v ustroystvakh zashchity nef'tyanykh nasosov ot zasoreniya s tselyu povysheniya ikh effektivnosti* (Modeling of work processes in oil pumps protection devices from clogging to improve their performance): thesis of the candidate of technical sciences, 2012.
13. Utility patent no. 108799 RF. *Gravitatsionnyy separator dlya ochistki skvazhinnoy zhidkosti* (Gravity separator for well fluid cleaning), Inventors: Antipina N.A., Kaplan A.L., Peshcherenko S.N. et al.
14. Utility patent no. 102057 RF. *Gravitatsionnyy separator dlya ochistki skvazhinnoy zhidkosti* (Gravity separator for well fluid cleaning), Inventors: Antipina N.A., Kaplan A.L., Peshcherenko S.N.