

Погружные сепараторы механических примесей

Н.А. АНТИПИНА,
ведущий математик

ЗАО «Новомет-Пермь»
antipina@novomet.ru

А.Л. КАПЛАН,
главный инженер – первый
заместитель
генерального директора

ОАО «Газпромнефть-
Ноябрьскнефтегаз»

С.Н. ПЕЩЕРЕНКО,
д.ф.-м.н., профессор,
начальник ИТЦ
ЗАО «Новомет-Пермь»



Вынос механических примесей – один из основных осложняющих факторов при добыче нефти. Наиболее перспективными устройствами для защиты УЭЦН от механических примесей на сегодняшний момент являются гравитационные сепараторы. В работе рассмотрен опыт разработки и эксплуатации сепараторов гравитационного и гидроциклонного типа.

SUBMERSIBLE SEPARATORS FOR SOLIDS MANAGEMENT

N. ANTIPINA, Novomet-Perm, CJSC,
A. KAPLAN, Gazpromneft-Noyabrskneftegaz, OJSC,
S. PESHCHERENKO, Novomet-Perm, CJSC

The article covers designing and operation experience of gravity and hydrocyclone separators.

Key words: gravity separator, hydrocyclone

В настоящее время засорение УЭЦН частицами породы является одним из основных осложняющих факторов и является причиной ~ 40% отказов УЭЦН. Для отделения частиц породы от жидкости применяют фильтры объемного или поверхностного действия [1]. Однако время работы объемных фильтров ограничено емкостью их порового пространства (обычно несколько десятков литров). Поэтому до засорения такие фильтры могут задерживать не более ~ 10² кг породы. В последнее время такие фильтры применяются все реже.

В фильтрах поверхностного действия отделение механических примесей от жидкости происходит в щелях на поверхности фильтра. Такие фильтры, с толщиной очистки до 100 мкм, получили широкое распространение. Обычно причиной засорения их фильтрационных каналов являются:

- соли, скрепляющие частицы с поверхностью каналов;
- неправильные условия эксплуатации, при которых вблизи поверхности фильтра реализуется турбулентный режим течения, способствующие образованию слабопроницаемых скоплений твердых частиц, перекрывающих фильтрационные каналы.

Для отделения частиц породы от жидкости также применяют гравитационные сепараторы твердых частиц без закрутки потока [2] или с закруткой, т. е. гидроциклонного [3] типа (рис. 1). Стрелками на рисунке показано направление течения жидкости.

В гравитационном сепараторе без закрутки потока течение жидкости организуют так, чтобы подъемная сила $C_x \rho s u^2 / 2$ (где C_x – коэффициент сопротивления, ρ – плотность, u – скорость жидкости, s – эффективная площадь поперечного сечения) была меньше разности сил тяжести и Архимеда, направленной вниз:

$$C_x \rho s \frac{u^2}{2} < F_g - F_a. \quad (1)$$

Из (1) видно, что с увеличением скорости эффективность гравитационных сепараторов падает.

В сепараторах гидроциклонного типа жидкость с твердыми частицами движется по спирали. Из-за круговой компоненты движения возникает центробежная сила, отбрасывающая частицы к внешним стенкам канала и отделяющая их от жидкости. Эффективность этих сепараторов тем больше, чем выше скорость.

В настоящее время опыт применения сепараторов твердых частиц мал, конструкции

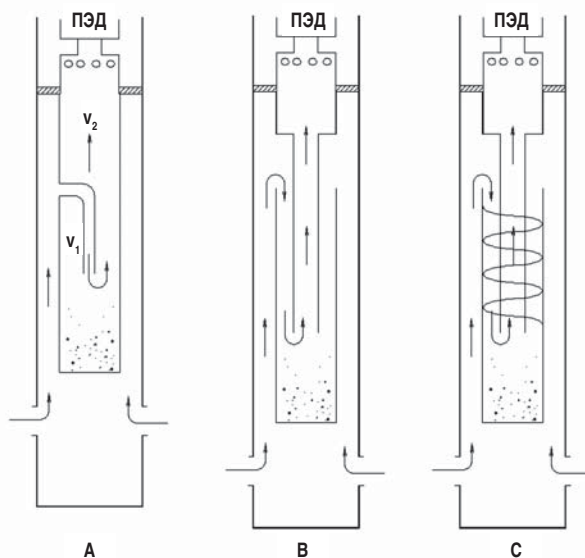


Рис. 1. Схемы гравитационных сепараторов: А и В – без закрутки потока, С – с закруткой, гидроциклонного типа

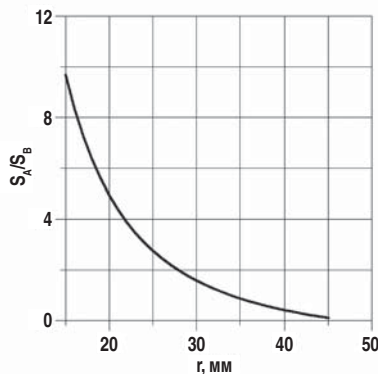


Рис. 2. Зависимость относительного качества сепарации S_A / S_B от радиуса r внутренней трубы

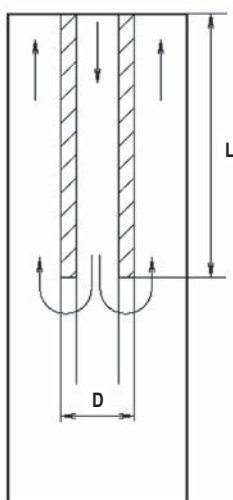


Рис. 3. Геометрия рабочей области гравитационного сепаратора на малые подачи

не оптимизированы. Так, известные сепараторы конструкции, показанной на рис. 1 А, имеют тонкость очистки 250 мкм [3], существенно уступая щелевым фильтрам.

Помимо тонкости очистки сепаратор характеризуется долей задерживаемых им частиц, т. е. коэффициентом сепарации. Величину коэффициента сепарации следует выбрать такой, чтобы в наиболее тяжелых по механическим примесям условиях, которым соответствует концентрация твердых частиц до 1000 мг/л [4], на выходе из сепаратора оставалось не более 200-мг/л, что позволило бы применять оборудование базового исполнения (по содержанию механических примесей).

Целью работы было создание сепаратора твердых частиц с коэффициентом сепарации 80% и тонкостью очистки не хуже 100 мкм. При малых подачах перспективен гравитационный сепаратор без закрутки потока, при больших – гидроротационного типа.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ СЕПАРАТОРОВ

В настоящее время в нефтяной промышленности применяются два типа гравитационных сепараторов без закрутки потока (рис. 1 А и В). В конструкциях первого типа (рис. 1 А) восходящий поток после разворота протекает по кольцевому зазору, второго (рис. 1 В) – по центральной трубе.

Тонкость и коэффициент сепарации определяются абсолютным значением скорости восходящего потока: сепарация будет тем лучше, чем меньше скорость (или больше площадь поперечного сечения S) восходящего потока. Площадь S в конструкции типа А:

$$S_A = \pi (R^2 - (r + \delta)^2), \quad (2)$$

в конструкции типа В:

$$S_B = \pi r^2, \quad (3)$$

где R и r – внутренние радиусы внешней и внутренней трубы соответственно, δ – толщина стенки внутренней трубы. Сепарация в конструкции А будет лучше, чем в В, если $S_A > S_B$.

На рис. 2 приведена зависимость качества сепарации, т. е. S_A / S_B от радиуса внутренней трубы r для 5 габарита (для 5 габарита минимальный внутренний диаметр обсадной колонны 122 мм, минимальный зазор колонна – стенка сепаратора 4 мм, толщина стенки сепаратора 7 мм, поэтому $R = 122/2 - 4 - 4 = 50$ мм). Из рис. 2 видно, что при малых r качество сепарации в конструкции типа А выше, но с увеличением r ухудшается и при $r \sim 37$ мм становится таким же, как в конструкции В.

Следовательно, если $r < 37$ мм, предпочтительна конструкция типа А, если больше – типа В. Нами была

выбрана конструкция А как менее металлоемкая.

На рис. 3 показана геометрия рабочей области выбранной конструкции сепаратора. При оптимизации конструкции варьировали внешний диаметр внутренней трубы $D = 2(r + \delta)$ в диапазоне 15 – 40 мм и длину внутренней трубы L в диапазоне 200 – 1000 мм. Толщина стенки внутренней трубы $\delta = 3$ мм, внутренний радиус гравитационного сепаратора $R = 50$ мм, подача по жидкости 50 м³/сут. Решалась задача оптимизации:

$$\begin{cases} k = f(D, L) \rightarrow \max \\ \Delta H = \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (4)$$

где $k = 100\%(1 - M_{out}/M_{in})$ – коэффициент сепарации, M_{out} , M_{in} – массовые потоки частиц на входе и выходе из сепаратора соответственно, ΔH – потеря давления в сепараторе, P_{out} , P_{in} – давление на входе и выходе из сепаратора соответственно.

Задача (4) решалась методами вычислительной гидродинамики [5] с моделью турбулентности $k - \epsilon$.

На входе во внутреннюю трубу задавался массовый расход жидкости Q . На выходе из кольцевого зазора, по которому жидкость поднималась вверх, задавалось статическое давление $p = 1$ атм.

Распределение частиц по размерам задавалось такое же, как при стендовых испытаниях спроектированных конструкций (рис. 4), массовая концентрация твердых частиц была 0,01 (т. е. 10 г/л).

В расчетной области была построена структурированная гексаэдрическая сетка со средним размером ячейки 2 мм и измельчением на стенках до размеров, необходимых для применения модели турбулентности $k - \epsilon$.

Для описания переноса твердых частиц потоком жидкости исполь-

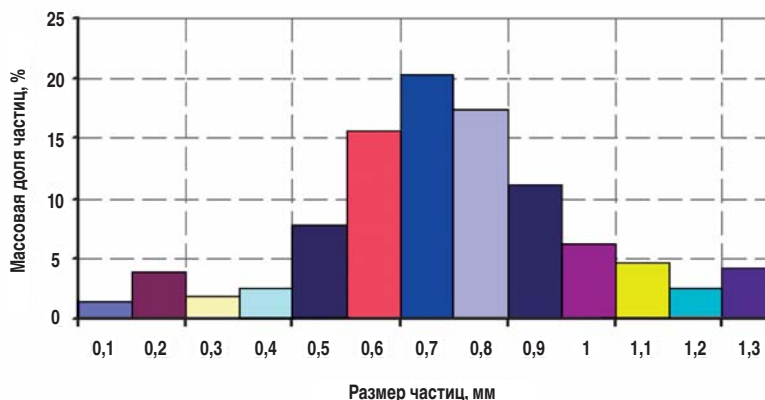


Рис. 4. Распределение частиц по массе на входе

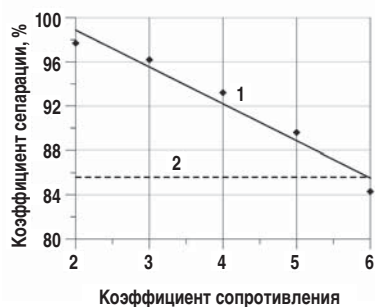


Рис. 5. Расчет зависимости коэффициента сепарации от коэффициента лобового сопротивления – 1, экспериментальное значение коэффициента сепарации – 2

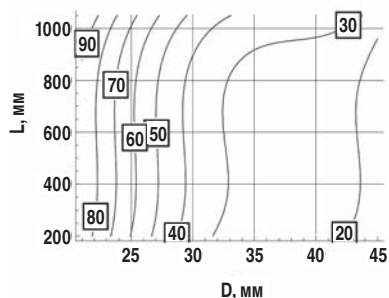


Рис. 6. Зависимость коэффициента сепарации, %, от L , мм и D , мм при $Q = 50 \text{ м}^3/\text{сут}$

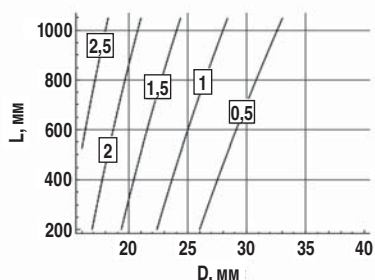


Рис. 7. Зависимость гидравлических потерь, м, от L , мм и D , мм при $Q = 50 \text{ м}^3/\text{сут}$

зовали подход Лагранжа, согласно которому твердая частица движется в соответствии с уравнением Ньютона под действием суммы сил: сопротивления, выталкивания, центробежной и кориолисовой:

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = C_x S_p \frac{w_M^2}{2} \vec{n} + \frac{4}{3} \pi r^3 \vec{g} (\rho - \rho_b) + m_p (-2\vec{\Omega} \times \vec{U}_p - \vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}), \quad (5)$$

где \vec{U}_p – скорость частицы, w_M – местная скорость потока, \vec{n} – единичный вектор в направлении ρ_b – плотность частицы, $\vec{\Omega} = \vec{r} \times \vec{\omega}$ – угловая скорость вращения.

Коэффициент лобового сопротивления зависит от формы частиц. Для его нахождения были проведены эксперимент и расчет сепарации частиц в восходящем потоке жидкости.

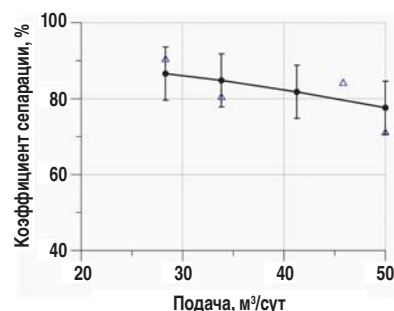


Рис. 8. Зависимость коэффициента сепарации от подачи: ● – эксперимент, △ – расчет

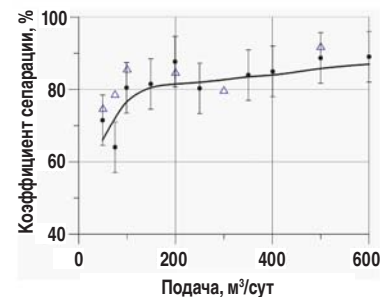


Рис. 10. Зависимость коэффициента сепарации от подачи: ● – эксперимент, △ – расчет

на стенде при подачах до $50 \text{ м}^3/\text{сут}$. На рис. 8 приведена зависимость коэффициента сепарации от подачи, полученная в стендовых исследованиях (линия 1) и путем расчета (линия 2). Видно, что наблюдается совпадение этих данных в пределах $\pm (5 - 7)\%$.

При увеличении подачи с 25 до $50 \text{ м}^3/\text{сут}$ коэффициент сепарации уменьшился примерно на 10% и при $50 \text{ м}^3/\text{сут}$ достиг предельно допустимой величины в 80%. Поэтому при больших подачах применение данной конструкции нецелесообразно.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИКЛОНА

Конструкция сепаратора гидроциклонного типа схематично приведена на рис. 1 В. Ей соответствует геометрия рабочей области, изображенная на рис. 9, которая полностью описывается следующими параметрами: L – длина сепаратора, Δd – ширина лопасти, n – число лопастей.

Параметры варьировались в следующих пределах: $\Delta d \in [12, 20]$ Δd от 12 до 20 мм (диапазон определялся технологией изготовления – лопасти шире 20 мм трудно изготавливать), $L \in [500, 1000]$ L от 500 до 1000 мм, $n \in [1, 3]$ n от 1 до 3. Подача жидкости была фиксирована и равнялась $50 \text{ м}^3/\text{сут}$, т. е. расчеты для наиболее сложных условий сепарации, при минимальной подаче (с увеличением подачи сепарация гидроциклонных сепараторов улучшается).

Оптимизационные расчеты также проводили методами вычислительной гидродинамики. В рабочей области строили тетрагональную сетку со средним размером ячейки 2 мм. На стенках ячейки измельчались до размеров, необходимых для применения модели турбулентности $k - \epsilon$.

Результаты расчетов показали, что коэффициент сепарации принимает наибольшие значения при $n = 3$, $L = 1000 \text{ мм}$ и $\Delta d = 12 \text{ мм}$.

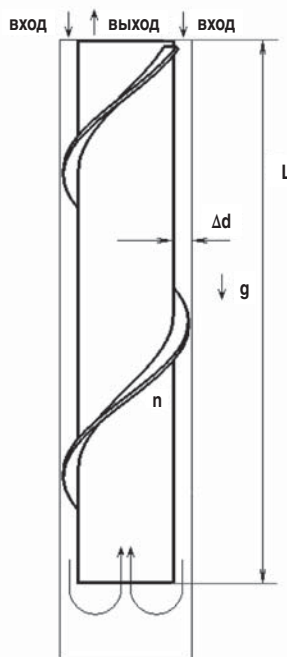


Рис. 9. Геометрия рабочей области гидроциклонна

Полученные результаты приведены на рис. 5, откуда видно, что $C_x = 6$.

Полученные зависимости коэффициента сепарации и гидравлического сопротивления от длины L и диаметра внутренней трубы D для $Q = 50 \text{ м}^3/\text{сут}$ приведены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.

Из рисунков видно, что коэффициент сепарации повышается при увеличении длины внутренней трубы, если $L < 800 \text{ мм}$, и уменьшении ее диаметра при всех значениях D . Однако при этом возрастает гидравлическое сопротивление ΔH .

Поскольку данные, приведенные на рис. 6 и рис. 7, получены при подаче $Q = 50 \text{ м}^3/\text{сут}$, которую считали предельно допустимой для данной конструкции, выбрали $L = 1000 \text{ мм}$ и $D = 25 \text{ мм}$. Этой конструкции соответствует коэффициент сепарации $k \sim 70\%$ и ΔH порядка 1,5 м. Конструкцию с $L = 1000 \text{ мм}$ и $D = 25 \text{ мм}$ изготовили и испытали



Также были проведены расчеты при подаче 300 м³/сут. Максимуму коэффициента сепарации соответствуют значения $n = 1$, $L = 1000$ мм и $\Delta d = 12$ мм.

Для стендовых испытаний был изготовлен гидроциклон с $n = 2$, $L = 1000$ мм и $\Delta d = 12$ мм [6]. Испытания и расчеты коэффициента сепарации провели в интервале подач от 50 до 600 м³/сут.

На рис. 10 приведена зависимость коэффициента сепарации от подачи, полученная в стендовых исследованиях (линия 1) и путем расчета (линия 2). Видно, что наблюдается совпадение этих данных в пределах $\pm (5 - 7)\%$.

Полученная конструкция сепаратора гидроциклонного типа стала основной частью спроектированного гравитационно-щелевого фильтра [7]. Опытно-промышленные испытания устройства прошли в ОАО «Газпромнефть-ННГ». Лабораторные исследования проб, взятых со скважин, показали отсутствие частиц размером более 100 мкм. В ряде скважин наработка существенно превысила предыдущую. Так, в скважине №5194, куст 516

наработка на 15.11.2011 составляет 365 суток, в то время как предыдущая наработка была 17 суток. Опытно-промышленные испытания были признаны успешными. На 15.11.2011 в ОАО «Газпромнефть-ННГ» в эксплуатации находятся 12 установок гравитационно-щелевых фильтров.

Литература

1. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. М.: Недра, 1986. 232 с.
2. Кучурин А.Е., Ленский А.В., Горбунов В.В. и др. Погружная насосная установка для добычи нефти // Патент РФ № 2 386 860. 2010. Бюл. №11.
3. Якимов С., Афанасьев А.В., Шмонин П. Применение десендеров для защиты ЭЦН на пластах Покурской свиты // Журнал о технологиях ТНК ВР «Новатор». 1999. Вып. 27. С. 27 – 31.
4. Каталог продукции ГК «Новомет» URL: <http://www.novomet.ru/>. Каталог оборудования ООО «Производственная компания «Борец» URL: <http://www.boretscompany.ru/>.

Каталог «Погружное оборудование для добычи нефти», ОАО «Алнас» URL: <http://www.alnas.ru/>.

5. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: Учебн. пособие. СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.

6. Антипина Н.А., Каплан А.Л., Пещеренко С.Н. и др. Гравитационный сепаратор для очистки скважинной жидкости. Патент РФ на полезную модель RU 108 799. 2011. Бюл. №27.

7. Антипина Н.А., Каплан А.Л., Пещеренко С.Н. и др. Фильтр для очистки скважинной жидкости. Патент РФ RU 2 422 622. 2011. Бюл. №18. ■

ЗАО «Новомет-Пермь»

614065, г. Пермь,
шоссе Космонавтов, 395;
Тел. (342) 296-26-60,
тел/факс: (342) 296-23-02
www.novomet.ru

Ключевые слова: гравитационный сепаратор, гидроциклон

Уважаемые коллеги, друзья!

2012 год стучится в наши двери! Самое время оглянуться, подвести промежуточные итоги, наметить планы.

Прежде всего разрешите от души вас всех поздравить с Новым годом, поблагодарить за сотрудничество и взаимопонимание, за партнерство и оптимизм.

Для «Новомета» уходящий год стал знаменательным во многих отношениях. Во-первых, нам исполнилось 20 лет, и это говорит само за себя. Во-вторых, в уходящем году «стартовали» продажи энергоэффективных установок производства нашей компании, и темпы реализации данного оборудования внушают оптимизм. В-третьих, совсем недавно в Москве подписано соглашение, в соответствии с которым ЗАО «Новомет-Пермь» получит поддержку как ОАО «РОСНАНО», так и фондов прямых инвестиций «Бэринг Восток» и «Russia Partners». Это означает начало нового этапа развития компании, связанного с модернизацией производства высоконадежных УЭЦН для добычи нефти за счет применения деталей и узлов с наноструктурированным защитным покрытием. Ожидается, что одним из основных результатов реализации проекта станет усиление присутствия «Новомета» на зарубежных рынках нефтепромыслового оборудования.

Не сомневаюсь, что в новом году мы со стороны коллег-нефтяников будем встречать еще большее понимание и поддержку. Ведь реальные, качественные сдвиги к лучшему в нашей отрасли возможны лишь тогда, когда усилия нефтяных, машиностроительных и сервисных компаний объединяются.

Еще раз поздравляю всех с наступающим годом Дракона. Пусть 2012-й станет годом прорыва в освоении новых технологий нефтедобычи и в разработке инновационного энергоэффективного оборудования.

С праздником, друзья!
Генеральный директор ГК «Новомет»
Олег Перельман