

УДК 621.6.03

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ НЕФТИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

И. Ю. Хасанов, И. А. Калиев\*, М. Ф. Мугафаров\*\*,  
Г. С. Сабитова\*, Н. Х. Файзуллин, Г. И. Хасанова\*

Научно-производственный центр "Шэрыкъ", 453266 Салават

\* Стерлитамакская государственная педагогическая академия, 453103 Стерлитамак

\*\* Филиал Уфимского государственного авиационного технического университета,  
453200 Ишимбай

E-mails: sherik@basnet.ru, kalievia@mail.ru, Mugafarov\_MF@mail.ru, sabitovags@mail.ru

Моделируется процесс разделения потока вязкой жидкости с помощью устройства центробежного принципа действия. В результате серии численных экспериментов получены параметры устройства с заданной крупностью разделения.

**Ключевые слова:** поток вязкой жидкости, винтовой канал, метод конечных элементов, устройство с заданной крупностью разделения.

**Введение.** Требования к качеству состава транспортируемой нефти и нефтепродуктов постоянно возрастают. Песок, глина, окалина, ржавчина и другие механические примеси, присутствующие в потоке, существенно осложняют работу технологического оборудования, что приводит к его преждевременному износу. Локализовать примеси в определенной области с целью их последующего удаления можно за счет действия центробежных сил, для чего необходимо закручивание потока. Как известно, закрученные течения применяются для интенсификации процессов тепло- и массообмена, очистки газов и жидкостей от примесей. Однако существующие установки, работа которых основана на центробежном принципе действия (сепараторы, центрифуги и др.), являются энергозатратными и обладают достаточно малой пропускной способностью. Поэтому актуальна разработка высокопроизводительного устройства поточной очистки, представляющего интерес для промышленности.

**Постановка задачи.** В работах [1–4] приведены описания устройства, предназначенного для выделения из потока нефти различных механических примесей. В данном устройстве жидкость течет в канале, образованном витками неподвижно закрепленного шнека и внешней цилиндрической поверхностью. Под действием центробежных сил происходит разделение потока с выделением твердых частиц в пристенную область, из которой они затем удаляются. В отличие от известных шнековых и роторных центрифуг (см., например, [5]) в данном устройстве шнек неподвижен, что обеспечивает экономию энергии и существенно повышает срок службы узлов устройства.

На рис. 1 представлена схема шнекового устройства. В осадительной секции коаксиально расположены срезающие пластины, которые имеют успокоители из упругого материала, распределенные вдоль винтовой поверхности. Пластины жестко закреплены на лотке-грязеуловителе. Лоток установлен на подвижных опорах и может выдвигаться из устройства по направляющим через концевой затвор. Пластины открыты в нижней части. Имеется окно для вывода механических примесей в лоток-грязеуловитель. Устройство

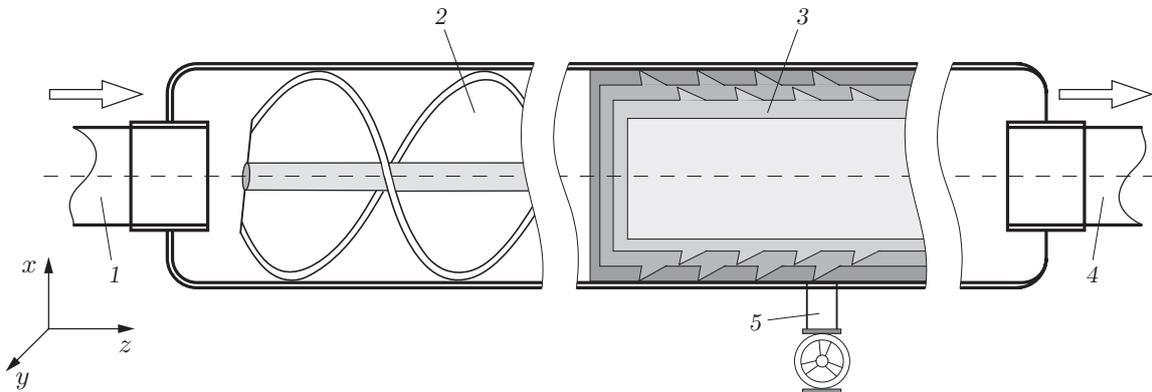


Рис. 1. Схема шнекового устройства:

1 — входной патрубок; 2 — шнек; 3 — осадительная секция; 4 — выходной патрубок;  
5 — сливное устройство

работает следующим образом. Поток очищаемой жидкости из входного патрубка попадает на витки шнека. Закрученный поток подвергается разделению в поле центробежных сил. Загрязнения попадают в пристенный слой, который затем срезается передними торцами пластин осадительной секции. Загрязненный поток, ударяясь о поверхность успокоителей, сползает по поверхности пластин вниз в окно и накапливается в лотке-грязеуловителе. При достижении в камере давления, свидетельствующего о забивке, устройство отключают для промывки, после чего возможна его дальнейшая эксплуатация.

Для описания течения используется полная стационарная система уравнений Навье — Стокса. Разностные методы решения уравнений гидродинамики для простых течений описаны во многих работах (см., например, [6]). Однако сложная гидродинамика потока в шнековых каналах изучена недостаточно. При определенных предположениях относительно структуры потока приближенные решения поставленной задачи, характеризующие свойства потока, получены в [7, 8]. В случае пренебрежимо малой циркуляции в [9] получены выражения для скорости потока и распределение давления в виде рядов по модифицированным функциям Бесселя и Ханкеля.

Введем трехмерную декартову систему координат, ось фильтра совместим с осью  $Oz$ , а начало координат — с передним краем шнека. Для описания течения систему стационарных уравнений Навье — Стокса и уравнение неразрывности представим в векторной форме:

$$-\nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho_l(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

Здесь  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  — вектор скорости;  $p$  — давление;  $\rho_l$  — плотность жидкости;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $\mathbf{F}$  — сила тяжести;  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  — оператор Гамильтона.

Во входном сечении  $z = z_0$  зададим скорость  $\mathbf{u}_0 = (u_0, v_0, w_0)$  в виде профиля Пуазейля:

$$u_0 = 0, \quad v_0 = 0, \quad w_0 = u_{\max}(1 - (x^2 + y^2)/R^2).$$

Согласно закону Стокса полный тензор напряжений  $T$  можно выразить через тензор скоростей деформации:

$$T = -pI + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

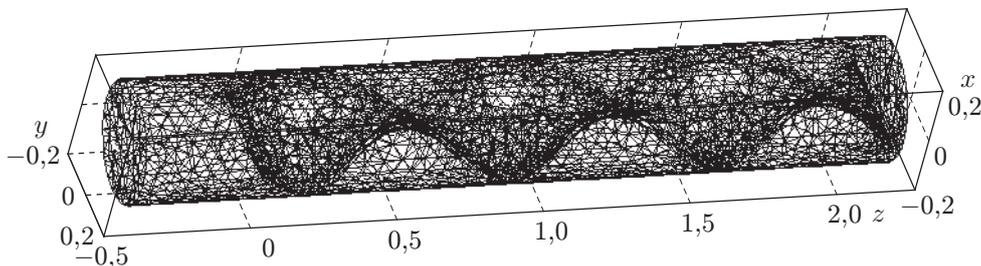


Рис. 2. Расчетная область

( $I$  — единичная матрица). В выходном сечении  $z = z_{\max}$  зададим значение тензора напряжений на векторах внешней нормали  $\mathbf{n}$ :

$$T\mathbf{n} = -p_0\mathbf{n}.$$

На остальных границах области (поверхности шнека, стенке устройства) ставится условие прилипания

$$\mathbf{u} = 0.$$

В данной работе устанавливается зависимость крупности разделения твердых частиц (критического размера частиц) от геометрии шнековой установки, параметров потока на входе и полной скорости потока на выходе. Цель расчетов заключается в следующем. Путем варьирования шага шнековой линии  $h$  и числа витков  $n$  необходимо получить значение угловой скорости потока на выходе, обеспечивающее заданную крупность разделения  $d$ . В этом случае все частицы диаметром более  $d$  будут осаждены, что существенно повысит износоустойчивость агрегатов магистральных трубопроводов. Расчеты проводились для случаев горизонтального и вертикального расположения устройства.

Для решения задачи используется метод конечных элементов с адаптивной сеткой. На первом этапе расчетная область разбивается на элементарные пирамиды (рис. 2). При этом плотность сетки варьируется в зависимости от геометрии, в частности, на шнеке сетка гуще, а на стенках трубы — реже. Такой метод построения сетки обеспечивает высокую точность и скорость вычислений. В расчетах использовались сетки, содержащие от 18 000 до 120 000 элементов.

Далее проводится дискретизация задачи, в результате чего получается алгебраическая система, содержащая порядка  $10^6$  неизвестных. Данная система решается итерационным методом типа метода прогонки. В результате получаем значения компонент вектора скорости и давления в вершинах элементарных пирамид. На заключительном этапе полученное дискретное решение интерполируется на всю расчетную область. Линии тока и распределение полной скорости потока в осевом сечении представлены на рис. 3.

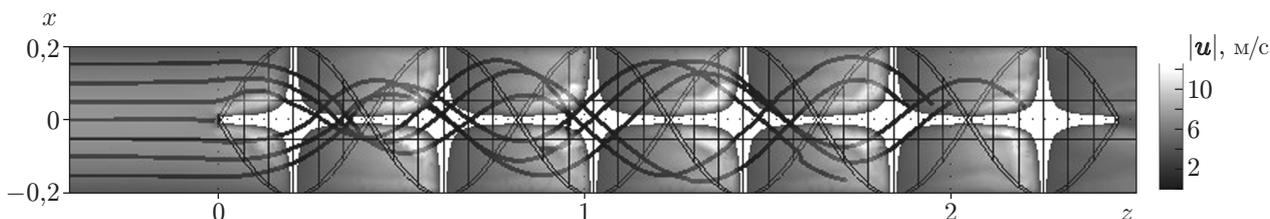


Рис. 3. Линии тока и распределение полной скорости потока в осевом сечении ( $|\mathbf{u}|_{\min} = 2,161 \cdot 10^{-16}$  м/с,  $|\mathbf{u}|_{\max} = 12,891$  м/с)

Таблица 1

Вариант расчета	$h$ , м	$\alpha$ , град	$L$ , м	Расположение устройства	$d$ , мм
1	0,710	30	4,260	Вертикальное	0,725
2				Горизонтальное	0,985
3	0,410	45	2,460	Вертикальное	0,527
4				Горизонтальное	0,902
5	0,236	60	1,416	Вертикальное	3,018
6				Горизонтальное	4,508

Таблица 2

$n$	$L$ , м	$d$ , мм
1	0,41	1,812
2	0,82	0,948
3	1,23	0,740
4	1,64	0,506
5	2,05	0,519
6	2,46	0,527

Приведем результаты расчетов при следующих значениях параметров устройства: внешний радиус  $R = 0,205$  м, внутренний радиус  $r = 0,01$  м, шаг шнековой линии  $h = 0,41$  м, количество витков  $n = 6$ , длина шнековой части  $L = 2,46$  м, максимальная скорость на входе  $u_{\max} = 5$  м/с, давление  $p_0 = 1$  атм, плотность жидкости (нефти)  $\rho_l = 865$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость жидкости  $\mu = 0,017$  Н·с/м<sup>2</sup>, плотность твердых частиц  $\rho_s = 1115,85$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mathbf{F} = (0, 0, \rho_l g)$ , что соответствует вертикальному расположению устройства.

Для определения угловой скорости потока введем вихрь от векторного поля скоростей:

$$\text{rot } \mathbf{u} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Удвоенная третья компонента полученного векторного поля равна угловой скорости  $\omega$ .

Интегрируя рассчитанное значение третьей компоненты  $w$  вектора скорости  $\mathbf{u}$  по данному сечению, получим объемный расход  $Q = 0,33$  м<sup>3</sup>/с. Среднее интегральное значение модуля третьей компоненты вектора завихренности  $\text{rot } \mathbf{u}$  равно  $\omega/2 = 35,82$  с<sup>-1</sup>.

Для определения крупности разделения используем результаты работы [10], в которой при некоторых упрощающих предположениях построена теория седиментационных процессов в шнековых осадительных центрифугах. Крупность разделения вычислим по формуле [10]

$$d^2 = \frac{18\mu Q(\ln R - \ln r)}{\pi(\rho_s - \rho_l)\omega^2(R^2 - r^2)L}.$$

Подставляя в данную формулу результаты расчетов и значения параметров устройства, получим  $d = 0,527$  мм.

В табл. 1 приведены результаты расчетов крупности разделения для различных вариантов расположения шнекового устройства при варьировании шага шнековой линии и угла наклона шнека  $\alpha$ . Значения параметров, не представленные в табл. 1, приведены выше. Среди представленных результатов оптимальным, по-видимому, является вариант 2 при вертикальном расположении устройства. Для этого варианта в табл. 2 приведены результаты расчетов крупности разделения при различном количестве витков шнека (от одного до шести).

Результаты расчетов показывают, что наименьший размер осаждаемых частиц ( $d \approx 0,5$  мм) достигается в случае вертикального расположения устройства при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 1,64$  м,  $n = 4$ .

Таким образом, в работе выполнено моделирование потока вязкой несжимаемой жидкости в шнековом канале. Полученные результаты использованы при расчете крупности разделения. В результате серии численных экспериментов получены параметры шнекового устройства, обеспечивающие крупность разделения  $d = 0,5$  мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2263531 РФ, МПК В 01 D 29/11. Фильтр поточный для очистки жидкостей от механических примесей / И. Ю. Хасанов, Н. Х. Файзуллин, И. М. Гималетдинов, Ю. А. Черных, М. М. Гареев, Р. З. Нагаев. Оpubл. 10.11.2005, Бюл. № 31.
2. Пат. 2293596 РФ, В 01 D 35/02. Фильтр-грязеуловитель / И. Ю. Хасанов, Н. Х. Файзуллин. Оpubл. 20.02.2007, Бюл. № 5.
3. Файзуллин Н. Х., Рогозин В. И., Хасанов И. Ю., Гареев М. М. Повышение эффективности эксплуатации нефтяного оборудования // Материалы 6-го Конгресса нефтегазопромышленников России “Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа”. Уфа: Ин-т пробл. транспорта энергоресурсов, 2005. С. 127.
4. Файзуллин Н. Х., Хасанов И. Ю., Мугафаров М. Ф., Калиев И. А. Фильтр для очистки жидкостей от механических примесей центробежного принципа действия // Материалы конф. “Нефтегазопереработка и нефтехимия — 2006”. Уфа: Ин-т нефтехимпереработки РБ, 2006. С. 302–303.
5. Фишер П. Новая конструкция сепаратора для доочистки добываемой продукции от воды // Нефтегазовые технологии. 2006. № 4. С. 29–32.
6. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Иностран. лит., 1981.
7. Вайнштейн И. И., Гольдин Е. М., Файнерман И. А., Шкоропад Д. Е. О гидродинамике осадительных шнековых центрифуг // Теорет. основы хим. технологии. 1985. Т. 19, № 1. С. 80–85.
8. Шкоропад Д. Е. Центрифуги и сепараторы для химических производств / Д. В. Шкоропад, О. П. Новиков. М.: Химия, 1987.
9. Файнерман И. А. Расчет и конструирование шнековых центрифуг. М.: Машиностроение, 1981.
10. Шкоропад Д. Е. Центрифуги для химических производств. М.: Машиностроение, 1975.

*Поступила в редакцию 28/VI 2007 г.*

---