

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ФИЛЬТРАЦИОННОМ КАНАЛЕ ВОЛНИСТОЙ ФОРМЫ

А.Г. ОВЧАРЕНКО, Ф.Ф. СПИРИДОНОВ, Т.М. ТУШКИНА, Н.В. ПАВЛОВА

Объектом исследования является движение твердых частиц в поле течения в модуле мембранного аппарата с волнистой формой проницаемой поверхности. Цель работы – создание физико-математической модели движения твердой фазы в напорном канале мембранного модуля указанной формы. Проведен анализ полученного решения в зависимости от физических и геометрических параметров, определяющих задачу.

Процессы разделения жидких сред с использованием мембранных технологий, играющие важную роль во многих отраслях промышленности, отличаются сложностью и разнообразием явлений [1].

Для прогнозирования эффективности разделения необходимо исследовать движение и взаимодействие жидкой и твердой фаз в модулях мембранных аппаратов различной конфигурации, нужно располагать данными о концентрациях растворенных веществ в рабочих каналах. Все это обуславливает трудности обработки аппаратов и технологических процессов только лишь на основе модельных экспериментов. Возникает насущная необходимость привлечения физико-математического моделирования к организации вычислительных экспериментов.

В работе [2] авторами была обоснована целесообразность использования модулей с волнистой формой проницаемой поверхности в практике баромембранного разделения, а также были исследованы особенности движения жидкой фазы в фильтрационных каналах указанной формы (см. рисунок 1).

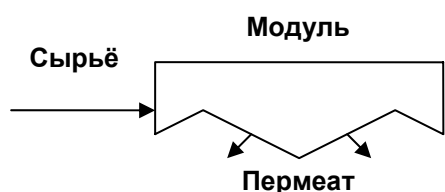


Рисунок 1 – Схема мембранного процесса в модуле с проницаемой поверхностью волнистой формы

В ходе численных экспериментов было установлено, что течение в напорном канале с волнистой образующей имеет сложную структуру, что обусловлено наличием сразу

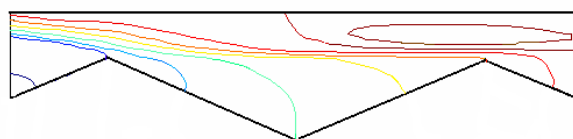


Рисунок 2 – Картина тока в напорном канале с проницаемой границей волнистой формы

нескольких зон: возвратного течения около мембраны, регулярного - в ядре потока, рециркуляционного – вблизи непроницаемого угла (см. рисунок 2). Было исследовано влияние геометрии проницаемой границы, а также числа Рейнольдса отсоса Re на структуру потока. В частности, было установлено, что силы вязкого трения сконцентрированы вблизи мембраны и непроницаемой стенки, а также, что при возрастании значения Re уменьшаются размеры областей обратного течения около мембраны и непроницаемой границы, при этом, последние изменения более значительны.

В настоящей работе были исследованы особенности движения твердой фазы в рассматриваемом канале. Актуальность данной работы обусловлена тем, что эффективность работы мембранного модуля во многом зависит от движения твердых частиц примеси. В самом деле, отложение слоя осадка на поверхности мембраны снижает производительность работы мембранного аппарата.

Для исследования вопроса о движении мелких частиц примеси в поле течения поставлена задача:

$$\begin{aligned} Stk \frac{dw_p}{dt} &= w - w_p, & \frac{dz_p}{dt} &= w_p, \\ Stk \frac{dv_p}{dt} &= v - v_p, & \frac{dy_p}{dt} &= v_p. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь w и v - компоненты вектора скорости с продольным (ось Oz) и поперечном (ось Oy) направлениях, индекс « p » определяет параметры частицы примеси,

$Stk = \frac{1}{18} \rho_p \frac{d_p^2}{\mu}$ - число Стокса, μ - вязкость жидкости, ρ_p , d_p - плотность и диаметр частицы примеси.

Система уравнений (1) записана в рамках следующих допущений:

- концентрация частиц примеси мала, что позволяет пренебречь их влиянием на движение несущей фазы;
- твердые частицы примеси в процессе движения не взаимодействуют между собой и со стенками канала;
- жидкость несжимаема;
- вязкость постоянна;
- движущей силой процесса разделения является перепад давления на мембране, поэтому силой тяжести можно пренебречь;
- скорость частиц на входе равна скорости жидкости;
- частицы имеют сферическую форму;
- испытываемое частицами сопротивление со стороны жидкости рассчитано по формуле Стокса.

Начальные условия при $t_0 = 0$ для искомых переменных системы (1) следующие:

- абсцисса «точки старта» $z_0 = 0$;
- ордината «точки старта» $y_0 = y_{00}$, где $y_{00} \in [0, 1.2]$;
- $V_{p0} = V$;
- $W_{p0} = W$.

Система (1) с начальными условиями представляет собой задачу Коши, решение которой определяет траекторию и значения составляющих скорости движения частицы примеси в рассматриваемом канале.

Для численного расчета траекторий принято допущение о постоянстве локальных величин w и v , была рассчитана средняя скорость в каждой ячейке прямоугольной сетки.

Первые два уравнения системы (1) содержат в правой части соответственно разницу продольной и поперечной компонент векторов скоростей жидкости и частиц примеси соответственно. Эти величины

достаточно малы при малых значениях чисел Стокса Stk , что указывает на возможную жесткость системы. Система (1) была решена численно с использованием одношагового метода Гира, который показал устойчивость при различных значениях параметров, присутствующих в системе (1).

В серии вычислительных экспериментов было исследовано влияние числа Стокса Stk частицы примеси и числа Рейнольдса отсоса жидкости на движение частиц примеси, «стартующих» с разной высоты $y_{00} \in [0, 1.2]$ на входе в канал. Результаты численного решения системы уравнений (1) с соответствующими начальными условиями представлены на рисунках 3 – 6 в виде зависимостей $y(z)$.

На рисунке 3 представлены траектории твердых частиц разных диаметров: $d_p=25$ мкм; 20 мкм; 10 мкм; 5 мкм; 2 мкм при $y_{00} = 0,65$. В ходе исследования было установлено, что частицы относительно малых диаметров следуют вдоль линии тока. Кроме того, как видно из рисунка 3, начиная с некоторого значения d_p , течение жидкой и твердой фаз становится существенно неравновесным.

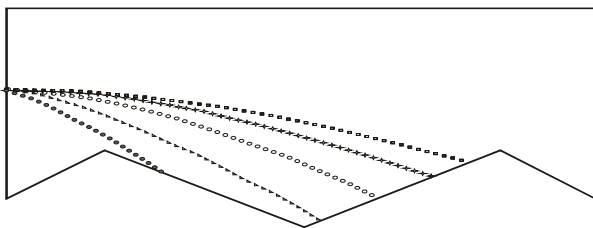


Рисунок 3 – Траектории твердых частиц диаметра $d_p=25$ мкм; 20 мкм; 10 мкм; 5 мкм; 2 мкм; 1 мкм (слева направо)

На рисунке 4 представлены траектории частиц примеси диаметра $d_p=2$ мкм, стартующих с разной высоты: $y_0=0,35$; 0,5; 0,65; 0,77; 0,9. Как видно из рисунка, частицы относительно малых размеров,

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ФИЛЬТРАЦИОННОМ КАНАЛЕ ВОЛНИСТОЙ ФОРМЫ

следуя линиям тока, осаждаются на непроницаемой правой границе канала ($y_0=0,77$, $y_0=0,9$).

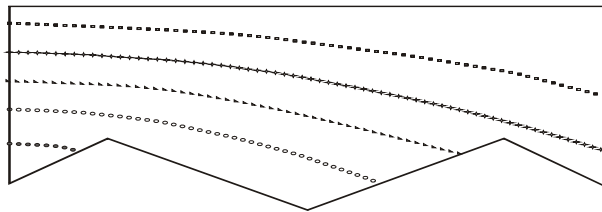


Рисунок 4 – Траектории твердых частиц диаметра $d_p=2$ мкм; $y_0=0,35$; $0,5$; $0,65$; $0,77$; $0,9$ (снизу вверх)

Вместе с тем, частицы больших размеров, стартующие с той же высоты ($y_0=0,77$, $y_0=0,9$), уже не достигают правой границы канала и осаждаются на мембране. Этот факт отражен на рисунке 5, где представлены траектории частиц примеси диаметра $d_p=25$ мкм, стартующих, как и в предыдущем случае, с высоты: $y_0=0,35$; $0,5$; $0,65$; $0,77$, $0,9$.

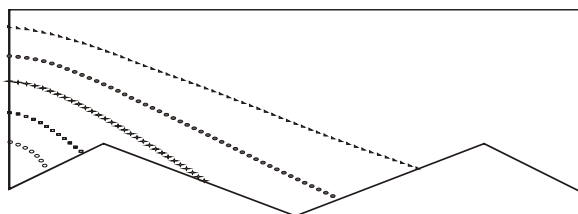


Рисунок 5 – Траектории твердых частиц диаметра $d_p=25$ мкм; $y_0=0,35$; $0,5$; $0,65$; $0,77$; $0,9$ (снизу вверх)

Очевидно, что зона максимального осаждения частиц примеси на мембране наблюдается поблизости от входа в канал. Здесь увеличивается негативное влияние концентрационной поляризации на процесс разделения.

На рисунке 6 представлены траектории твердых частиц диаметром $d_p=2$ мкм, стартующих с высоты $y_0=0,65$ при различных значениях чисел Рейнольдса Re : $Re=0,1$; 1 ; 10 .

Как видно и рисунка, с увеличением вязкости уменьшается время движения частицы в канале, а зона максимальной

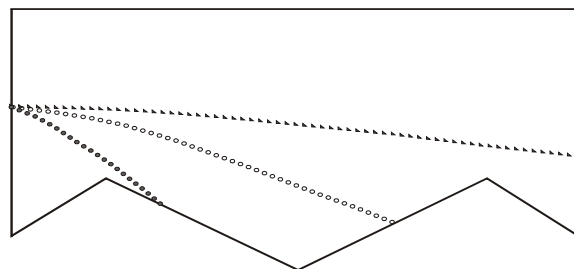


Рисунок 6 – Траектории твердых частиц диаметра $d_p=2$ мкм, $y_0=0,65$; $Re=0,1$; 1 ; 10 (слева направо)

нагрузки на мембрану приближается к входу в канал. Таки образом, движение и несомой, и несущей фазы чувствительно к изменению числа Рейнольдса отсоса.

Созданная в данной работе и в работе [2] физико-математическая модель позволяет исследовать движение жидкой и твердой фаз в мембранных модулях с волнистой формой проницаемой поверхности в зависимости от различных параметров, определяющих задачу. На основе проведенных исследований можно утверждать, что число Стокса частицы и число Рейнольдса отсоса жидкости оказывают ощутимое влияние на движение твердых частиц примеси в фильтрационных каналах с волнистой формой образующей проницаемой поверхности.

Представляется актуальным проведение дальнейших вычислительных экспериментов, направленных на поиск наиболее оптимальной формы волнистой проницаемой границы в мембранных модулях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с.
2. Светлов С.А., Спиридонов Ф.Ф., Тушкина Т.М., Светлова О.Р. Гидродинамика течения жидких сред в фильтрующих каналах со сложной формой проницаемой границы// Ползуновский вестник. 2002. №1. – С. 89 – 94.