

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА МИКРОФИЛЬТРАЦИИ НА ГОФРИРОВАННОМ ФИЛЬТРУЮЩЕМ ЭЛЕМЕНТЕ

Среди методов мембранного разделения важное значение имеет микрофльтрация, которая применяется для выделения относительно крупных коллоидных частиц или взвешенных микрочастиц размером от 0,1 до 10,0 мкм. При этом движущей силой этого процесса является трансмембранный перепад давления. Его проводят при невысоких рабочих давлениях (порядка десятых и сотых долей МПа). Микрофльтрация занимает промежуточное положение между ультрафльтрацией и обычной фльтрацией без резко выраженных границ [1].

В настоящее время существуют различные типы аппаратного оформления процесса микрофльтрации. В частности, наблюдается рост научного, технологического и коммерческого интереса к процессу микрофльтрации в модуле на основе гофрированных фильтрующих элементов [2]. Однако отсутствие научно обоснованных методов расчета препятствует их реализации на практике.

Среди существующих методов расчета преобладают основанные на эмпирических корреляциях, не отражающих физическую сущность процесса. В большинстве существующих методов напорный и дренажный каналы рассматриваются изолированно, что не позволяет учесть взаимосвязь энергетического состояния потоков на напорном и дренажном каналах. При расчете микрофльтрации часто не учитывается дисперсионный состав разделяемой суспензии.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и метода расчета нестационарного процесса микрофльтрации суспензии в

модуле на основе гофрированных фильтрующих элементов.

Моделирование процесса микрофльтрации основано на следующих допущениях и физических предположениях:

1. Мембрана представляет собой несжимаемое твердое тело со сквозными порами цилиндрической формы. Поры расположены перпендикулярно к поверхности мембраны и имеют одинаковые размеры – радиус  $r_M$  и длину  $D_M$ .

2. Разделяемая смесь представляет собой полидисперсную суспензию, характеризующуюся параметрами  $r_{\min}$ ,  $r_{\max}$ . Изменение концентрации диспергированных частиц вдоль мембранного канала пренебрежимо мало.

3. Механизм разделения – ситовой. Мембрана удерживает частицы, радиус которых больше радиуса пор и может быть рассчитан как среднегеометрическая величина  $r_S = \sqrt{r_M r_{\max}}$ .

4. В процессе микрофльтрации на мембране непрерывно нарастает слой осадка, поток пермеата сквозь который описывается уравнением Козени–Кармана. Осадок неподвижен, так как сдвиговые напряжения в осадке при течении жидкости вдоль мембранного канала недостаточны для его перемещения.

5. Частицы, вошедшие в поры, имеют определенную вероятность оседания на их внутренней поверхности. Осевшие частицы равномерно распределяются по всей поверхности поры.

6. Напорный и дренажный каналы с гофрированной мембраной могут быть представлены сопряженной системой цилиндрического и плоского канала, расчет которого проводится с использованием многократно повторяющейся элементарной ячейки.

7. Течение несжимаемой жидкости в напорном и дренажном каналах сплошное изотермическое, ламинарное.

8. Профили скоростей потоков в напорном и дренажном каналах параболические.

9. Профили гидростатического давления в любом поперечном сечении напорного и дренажного каналов плоские.

10. При расчете процесса весь период разделения разбивается на  $m$  одинаковых временных интервалов длительности  $\Delta\tau$ , и в пределах каждого временного интервала процесс считается стационарным. При переходе от одного временного интервала к другому происходит дискретное увеличение толщины слоя осадка и соответственно общего гидравлического сопротивления потоку пермеата.

Для получения численного решения по предлагаемой методике необходима следующая исходная информация: основные геометрические размеры мембранного канала; входные гидродинамические характеристики мембраны (радиус пор, порозность, толщина); исходная концентрация диспергированных частиц в разделяемой смеси; физико-химические свойства дисперсионной среды (вязкость, плотность) при рабочих значениях концентрации и температуры; информация о дифференциальной кривой распределения диспергированных частиц; вероятность механического задержания частиц в порах.

Расчет начинается с рассмотрения первого временного интервала, характеризуемого полным отсутствием на мембране осадка ( $L_s=0$ ). Для следующего временного интервала толщина осадка принимается равной  $L_j=L_j \cdot \Delta\tau$ . Необходимая точность расчета величины пермеата достигается разбивкой всей длины канала на достаточно большое число участков, рассчитываются все участки.

Предлагаемая модель основана на уравнениях баланса массы и энергии с учетом того, что сечение мембранного канала является сопряжением двух плоских каналов – напорного и дренажного. Тогда получим для скоростей потоков в этих каналах:

для напорного канала

$$U_{1e} = U_{1a} - (f_M / f_1) \cdot v_2, \quad (1)$$

для дренажного канала

$$U_{2e} = U_{2a} - (f_M / f_1) \cdot v_2, \quad (2)$$

$f_1$  – площадь сечения продольного потока в напорном канале;  $f_M$  – площадь сечения потока через мембрану;  $f_2$  – площадь сечения продольного потока в дренажном канале.

Для движущей силы процесса микрофильтрации, которая представляет собой разность давлений в напорном и дренажном канале:

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (3)$$

При этом давление меняется по длине канала вследствие потери напора на трение  $\Delta P_{TP}$  и наличия трансмембранного потока.

Расчеты гидростатических давлений в каналах основаны на уравнении баланса механической энергии. Учет потерь на трение аппроксимируется корреляционной формулой Бермана. Тогда искомые гидростатические давления в каналах имеют вид:

для напорного канала

$$P_{1e} \left( 1 - 0.5 \frac{g_2 f_M}{U_{1e} f_1} \right) \\ P_{1a} \left( \frac{U_{1a}}{U_{1e}} + 0.5 \frac{g_2 f_M}{U_{1e} f_1} \right) + \Delta P_{TP} \left( 1 + \frac{U_{1a}}{U_{1e}} \right) \cdot 0.5 \frac{f_M}{f_1}, \quad (4)$$

для дренажного канала

$$P_{2e} \left( 1 + 0.5 \frac{g_2 f_M}{U_{2e} f_2} \right) \\ P_{2a} \left( \frac{g_{2e}}{U_{2e}} - 0.5 \frac{g_2 f_M}{U_{2e} f_2} \right) + 0.5 \Delta P_{TP} \cdot \left( \frac{U_{2a}}{U_{2e}} + 1 \right) \cdot \frac{f_M}{f_2}. \quad (5)$$

Для нахождения удельной производительности  $\sigma_2$  используем обобщенный закон Дарси, который описывает поток жидкости как через мембрану, так и сквозь слой пористого осадка. При этой ламинарности потока пермеата, проходящего через мембрану, используем формулу Пуазейля

$$g_{2M} = \frac{\lambda R_M^4 \Delta P_M}{8 \mu \Delta_M}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_M = P_1 - P_M$ .

Для потока сквозь осадок на поверхности мембраны используем уравнение Козени–Кармана

$$g \sigma_{23} = \frac{\varepsilon^3 d_s^2 \Delta P_s}{36 K (1 - \varepsilon)^2 \mu S}; \quad \Delta P_s = P_M - P_2, \quad (7)$$

$K = 4,5$  константа Козени–Кармана.

Так как движущие силы течения жидкости через мембрану  $\Delta P_M$  и осадок  $\Delta P_s$  связаны с общей движущей силой процесса микрофильтрации соотношением

$$\Delta P = \Delta P_S + \Delta P_M, \quad (8)$$

то из (6) и (7) с учетом (8) получим

$$g_2 = \frac{\Delta P}{(R_M + R_S)}, \quad (9)$$

где  $R_M = \frac{8\mu\Delta M}{(\lambda R_M^4)}$  – гидравлическое сопротивление мембраны

$$R_S = \left[ \frac{36K(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right] / (\mu S d_S^2).$$

Система уравнений (1), (2), (4), (5), (9) составляет математическую модель процесса микрофльтрации.

Расчет процесса микрофльтрации на основе предложенной модели проводили методом последовательных приближений, задаваясь на выходе из дренажного канала и сводя рассчитанную скорость в начале дренажного канала к нулевому значению. Расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность расчета.

Расчетные значения скорости и давления по длине канала для конкретного фильтрующего элемента ( $h_1=h_2=0,001\text{м}$ ) и суспензии ( $\mu=10^{-3}\text{Па}\cdot\text{с}$ ,  $\rho=10^3\text{кг/м}^3$ ).

	$r=R_H=0,035$	$r=0,03$	$r=0,02$	$r=0,01$
$U_1$	0,00	1,26	2,12	2,84
$U_2$	0,28	0,16	0,73	0,1
$P_1$	1,20	1,36	1,54	1,94
$P_2$	1,00	1,13	1,24	1,37

Таким образом, предложенная модель микрофльтрации позволяет исследовать влияние определяющих геометрических размеров, исходных гидродинамических условий, начальной концентрации, а также дисперсионного состава и физико-химических свойств разделяемой суспензии на такие характеристики процесса, как скорость, давление, величина слоя осадка, удельная производительность и селективность, рассчитать их изменение по длине канала, а также прогнозировать их зависимость от времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986.
2. Худяков С.В., Кириш А.А., Стечкина И.Б. Расчет сопротивления гофрированных фильтров в условиях нестационарной фльтрации // Теоретические основы химической технологии. 1994. Т. 28, №3. С. 281.

#### Резюме

Иірімделіп сүзгіленген элементтер негізіне негізделіп қарастырылған есептеу әдісімен каналдағы сұйықтық қозғалысының математикалық моделі жасалған.

#### Summary

Consideration is made of the mathematical model fluid flow in module on the basis of gofer filter elements. On base this mathematical model developed the design method.

УДК 66.064

МКТУ им.Х. А. Ясави,  
г. Кентау

Поступила 3.02.06г.