

6. Кучер, Р.В. Реакционная способность непредельных соединений в реакции с пероксирадикалами / Р.В. Кучер, В.И. Тимохин // Нефтехимия. – 1986. – С. 736 – 744.
7. Органикум II. Практикум по органической химии. В 2 т. Т.2 / Г. Беккер [и др.]. – М.: Мир, 1979. – 442с.
8. Справочник химика. В 7 т. Т.2. Основные свойства неорганических и органических соединений / Под ред. Б.П. Никольского. – Л.: Химия, 1971.- 1168с.
9. Войткевич, С.А. 865 душистых веществ для парфюмерии и бытовой химии. – М.: Пищевая промышленность, 1994. – 593с.
10. Вайсбергер, А. Органические растворители / А. Вайсбергер, Э. П. Проскауэр, Дж. Риддик, Э. Тупс. – М.: Изд-во иностр. лит., 1958. – 205 с.
11. Свойства органических соединений: Справочник / Под ред. А.А. Потехина. – Л.: Химия, 1984. – 500 с.
12. Денисов, Е.Т. Окисление и стабилизация реактивных топлив / Е.Т. Денисов, Г.И. Ковалёв. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
13. Акимов, А.А. Реакционная способность 2-гидроксициклогексонона по отношению к кумилпероксирадикалу / А.А. Акимов, А.Л. Перкель // Ползуновский вестник. – 2009. – №3. – С. 63-66.
14. Опейда, И.А. Определение константы скорости реакции взаимодействия пероксирадикала с молекулами органических соединений / И.А. Опейда, В.И. Тимохин, М.А. Симонов, А.М. Романцевич // Кинетика и катализ. – 1983. – т. 24, № 6. – С.1499 – 1503.
15. Кучер, Р.В. Совместное окисление циклогексана и некоторых органических соединений / Р.В. Кучер, В.И. Тимохин, Н.А. Кравчук, А.П. Покуца, Р.И. Флонт, Д.С. Луцки // Нефтехимия. – 1987. –Т. 27, № 5. – С. 661-668.
16. Hajdu, I.P. On the induced decomposition α -phenylethylhydroperoxide by peroxy radicals / I.P. Hajdu, I. Nemes, D Gal, V.L. Rubaylo, N.M. Emanuel // Canadian Journal of Chemistry. – 1977. – Vol.55, P. 2677 – 2684.
17. Непомнящих, Ю.В. Особенности кинетики и механизма окисления карбонилсодержащих соединений по β -СН-связям / Автореф. дисс. на соискание уч. степ. канд. хим. наук. – Кемерово, 2009. – 20 с.
18. Могилевич, М.М. Окисление и окислительная полимеризация непредельных соединений / М.М. Могилевич, Е.М. Плисс. – М.: Химия, 1990. – 240 с.

□ Авторы статьи:

Боркина
Галина Глебовна,
-ведущий инженер каф. техно-
логии основного органического
синтеза КузГТУ
Email: borkina82@mail.ru

Непомнящих
Юлия Викторовна,
канд.хим.наук, доцент каф. техно-
логии основного органическо-
го синтеза КузГТУ
Тел. 3842-39-63-35.

Перкель
Александр Львович,
докт.хим.наук, профессор каф.
технологии основного органиче-
ского синтеза КузГТУ
Email: pal.toos@kuzstu.ru

УДК 66.067.57

А.Б. Евграфова, В.А. Плотников, П.Т. Петрик

ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ ВИХРЕВОГО ПОТОКА В ПЕРФОРИРОВАННОМ РОТОРЕ

Одним из факторов, снижающим эффективность работы фильтрующих центрифуг, является проскальзывание жидкости в перфорированном роторе, приводящее к снижению давления фильтрации и уменьшению производительности.

Эта проблема свойственна и статическим аппаратам с закрученными вихревыми потоками, в которых тангенциальная подача определяет гидравлическое сопротивление и эффективность разделения дисперсий [3].

Одним из перспективных методов решения гидродинамических задач разделения дисперсных потоков является анализ уравнений движения несущего вихревого потока и получение на его основе безразмерных зависимостей, определяющих показатели разделительного процесса [2].

Применение методов вычислительной гидродинамики позволяет углубить понимание работы соответствующих аппаратов и выбрать наилуч-

шую геометрическую форму и размеры конструкции. Использование этого метода особенно эффективно для многофазных гетерогенных систем и аппаратов со сложной геометрией [4].

Гидродинамика вихревого потока в перфорированном роторе во многом определяется условиями и интенсивностью подачи рабочей среды. В простейшем варианте обрабатываемая среда подаётся в ротор через трубу питания с последующим разбрызгиванием её на внутренней свободной поверхности. Взаимодействие потока питания с вихревым потоком перфорированного ротора приводит к торможению граничной поверхности вихря и отставанию жидкости относительно стенок ротора.

Рассмотрим идеализированную схему подачи рабочей среды в перфорированном роторе (рис.1,б), когда на поверхность раздела фаз равномерно подаётся радиальный поток питания. В

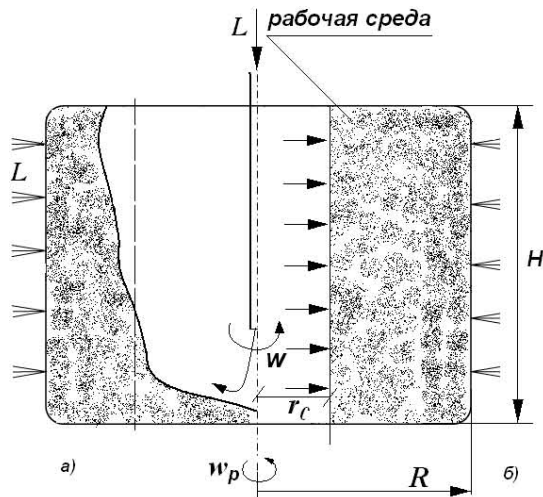


Рис. 1. Расчётная схема перфорированного ротора: а) реально, б) схематично; R , H - внутренний радиус и высота ротора; εR - радиус газовой полости; ω - угловая скорость вращения ротора, L - объемный расход жидкости через ротор.

силу высокой скорости вращения перфорированного ротора свободную поверхность жидкости будем считать цилиндрической. Будем также полагать, что влияние торцевых пристенных слоёв пренебрежительно мало. В этом случае движение вихревого потока в перфорированном роторе может быть описано следующей системой уравнений, записанной в цилиндрической системе координат:

- радиальный профиль давления в перфорированном роторе:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dr} = \frac{V_{\phi}^2}{r};$$

- радиальный профиль окружной компоненты скорости рабочей среды:

$$V_r \cdot \frac{dV_{\phi}}{dr} + \frac{V_r \cdot V_{\phi}}{r} = \nu \cdot \left[\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot V_{\phi}) \right] \right] \quad (1)$$

- условие сплошности радиального потока, при условии, что осевая компонента скорости

$$\frac{d}{dr} (r \cdot V_r) = 0;$$

- допущение, которое приходится принять с тем, чтобы иметь возможность аналитического решения задачи:

$$V_z = 0;$$

- граничные условия:

при $r = \varepsilon R$

$$V_r = \frac{L}{2\pi \cdot \varepsilon R \cdot H} \quad (2)$$

$$\tau_{\varepsilon} = \rho \cdot \nu \cdot \left[r \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{V_{\phi}}{r} \right) \right];$$

при $r = R$

$$V_r = \frac{L}{2\pi \cdot R \cdot H} \quad V_{\phi} = \omega \cdot R$$

Первое граничное условие обозначает, что свободная цилиндрическая поверхность испытывает касательное напряжение, вызванное потоком орошения. Второе граничное равенство вытекает из условия прилипания жидкости на цилиндрической стенке перфорированного ротора.

Отсутствие осевых перемещений в перфорированном роторе однозначно определяет радиальный поток как поток расширения.

Действительно, интегрирование уравнения сплошности приводит к выражению:

$$V_r = \frac{C}{r},$$

в котором постоянная интегрирования C находится из первого граничного условия:

$$C = \varepsilon R \cdot \frac{L}{2\pi \cdot \varepsilon R \cdot H} = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot H}$$

Результат можно представить в безразмерном виде:

$$k = \frac{r \cdot V_r}{\nu} = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot \nu} = RE_r, \quad (3)$$

где показатель k определяет число Рейнольдса, характеризующее интенсивность радиального потока в перфорированном роторе. Заметим, что в качестве вязкости среды здесь принят коэффициент турбулентного обмена, оценивающий интенсивность турбулентности вихревого потока.

Используя результат (3) преобразуем второе уравнение системы (1),

$$k \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot V_{\phi}) = \left[r \cdot \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot V_{\phi}) \right] \right] \quad (4)$$

Введение переменной $Y = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot V_{\phi})$ по-

зволяет понизить порядок уравнения (4) и свести его к классу дифференциальных уравнений с разделяющимися переменными при условии, что показатель k величина постоянная:

$$\frac{dY}{Y} = k \cdot \frac{dr}{r}$$

Интегрирование последнего уравнения приводит к результату:

$$Y = C_1 \cdot r^k, \quad \frac{d}{dr} (r \cdot V_{\phi}) = C_1 \cdot r^{k+1} \quad (5)$$

Проведя повторное интегрирование, получим искомое решение:

$$V_\phi = \frac{C_1}{k+2} \cdot r^{k+1} + \frac{C_2}{r},$$

где значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 можно найти из граничных условий (2). Предварительно преобразуем выражение для касательных напряжений на границе раздела фаз. Покажем, что производная:

$$r \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{V_\phi}{r} \right) = \frac{dV_\phi}{dr} - \frac{V_\phi}{r} = \frac{dV_\phi}{dr} + \frac{V_\phi}{r} - 2 \cdot \frac{V_\phi}{r} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot V_\phi) - 2 \cdot \frac{V_\phi}{r}$$

Поэтому выражение для безразмерных касательных напряжений представимо в виде:

$$\frac{\tau_\varepsilon}{\rho \cdot \nu \cdot \omega} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{r \cdot V_\phi}{\omega} \right) - 2 \cdot \frac{V_\phi}{\omega \cdot r}$$

Принимая во внимание результат первого интегрирования (5), можно записать:

$$\frac{\tau_\varepsilon}{\rho \cdot \nu \cdot \omega} + 2 \cdot \frac{V_\phi}{\omega \cdot r} = \frac{C_1}{\omega} \cdot r^k \quad (6)$$

Касательные напряжения на внутренней границе вихревого потока возникают в результате тормозящего действия радиального потока питания. Передача кинетической энергии потоку питания приводит к появлению граничных касательных напряжений. Математически это запишется так:

$$\frac{\rho \cdot L \cdot (\alpha \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot R)^2}{2} = \tau_\varepsilon \cdot 2\pi \cdot \varepsilon R \cdot H \cdot (\alpha \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot R)$$

откуда

$$\frac{\tau_\varepsilon}{\rho \cdot \nu \cdot \omega} = \frac{k \cdot \alpha}{2} \quad (7)$$

В выражении (7) параметр α определяет степень проскальзывания жидкости относительно ротора на границе раздела фаз. С его учетом выражение (6) можно представить следующим образом:

$$\frac{k \cdot \alpha}{2} = \frac{C_1}{\omega} (\varepsilon R)^k - 2\alpha$$

откуда

$$\frac{C_1 \cdot (\varepsilon R)^k}{\omega} = \alpha \cdot \frac{(k+4)}{2}$$

Подставим найденное значение C_1 в уравнение (5) и выполним второе интегрирование:

$$\frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{V_\phi}{\omega} \right) = \alpha \cdot \frac{(4+k)}{2 \cdot (\varepsilon R)^k} \cdot r^{k+1}$$

получая:

$$\frac{V_\phi}{\omega \cdot r} = \alpha \cdot \frac{(k+4)}{2 \cdot (k+2)} \cdot \left(\frac{r}{\varepsilon R} \right)^k + \frac{C_2}{r^2}$$

Постоянную интегрирования C_2 найдём из второго граничного условия:

$$1 = \alpha \cdot \frac{(4+k)}{2 \cdot (k+2)} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^k + \frac{C_2}{r^2}$$

откуда

$$\frac{C_2}{r^2} = 1 - \alpha \cdot \frac{(4+k)}{2 \cdot (k+2)} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^k$$

Окончательно, функция проскальзывания жидкости в перфорированном роторе имеет вид:

$$\frac{V_\phi}{\omega \cdot r} = \alpha \cdot \frac{(k+4)}{2 \cdot (k+2)} \cdot \left(\frac{r}{\varepsilon R} \right)^k + \left(\frac{R}{r} \right)^2 \cdot \left[1 - \alpha \cdot \frac{(k+4)}{2 \cdot (k+2)} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^k \right] \quad (8)$$

Выражение для коэффициента α найдём из первого граничного условия:

$$\frac{1}{\alpha} = \left[1 - \frac{(k+4)}{2 \cdot (k+2)} \right] \cdot \varepsilon^2 + \frac{(k+4)}{2 \cdot (k+2)} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^k \quad (9)$$

Из (9) следует, что степень проскальзывания жидкости в роторе определяется интенсивностью радиального потока и размером газовой полости.

Численное и аналитическое решение системы уравнений производили на ЭВМ с помощью таких программных продуктов как Mathcad 11. Получен результат, который представлен далее графически.

Коэффициент проскальзывания:

$$\alpha = \frac{1}{\varepsilon^2 \cdot \left[1 + \frac{(k+4)}{2 \cdot k+4} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^{k+2}} - 1 \right) \right]}$$

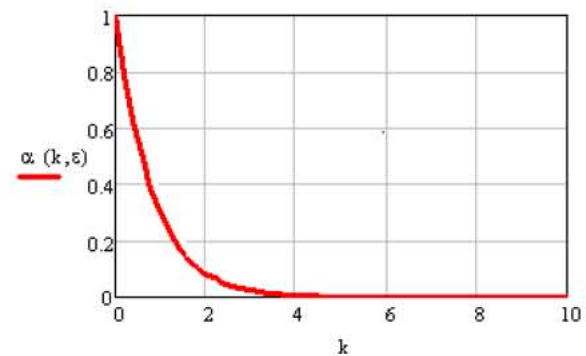


Рис. 2. Зависимость коэффициента проскальзывания α от интенсивности вдува k при известном размере газовой полости ε .

Относительный радиальный профиль окружной скорости в роторе:

Распределение относительного давления в роторе:

$$EU(x) = \frac{2\Delta P}{(\omega \cdot R)^2} = \int_{\varepsilon}^x 2 \cdot x \cdot U(x)^2 dx$$

Влияние радиуса газовой полости на перепад

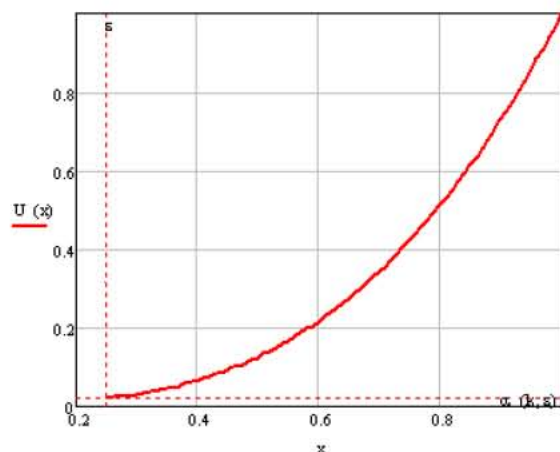


Рис.3. Относительный радиальный профиль окружной скорости в роторе U , при текущем радиусе x и интенсивности вдува k .

давления в роторе:

$$U(x, \varepsilon) = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \left[1 + \alpha(k, \varepsilon) \frac{(k+4)}{2 \cdot k + 4} \left(x^{k+2} - 1\right) \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^k \right]$$

$$EU_m(\varepsilon) = \int_{\varepsilon}^1 2 \cdot x \cdot U(x, \varepsilon)^2 dx$$

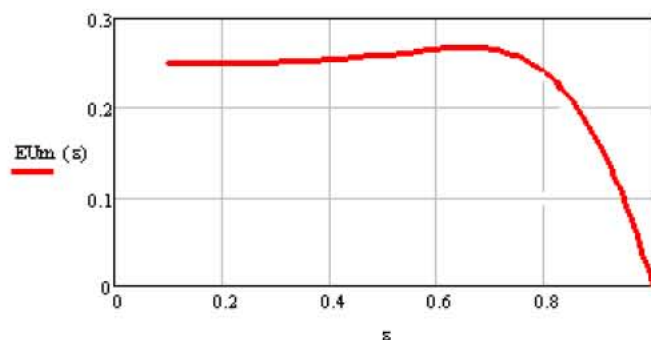


Рис. 5. Влияние радиуса газовой полости на перепад давления в роторе.

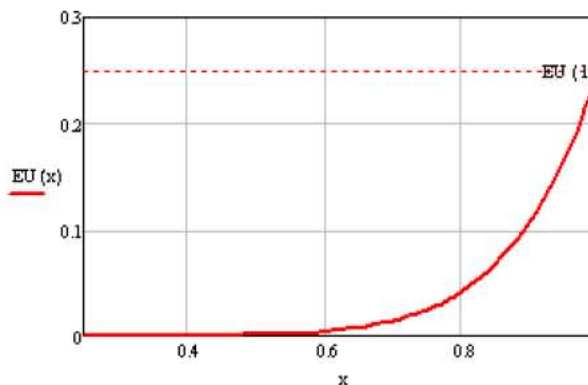


Рис.4. Распределение относительного давления в роторе EU , при текущем радиусе $x=r/R$.

$$U = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \left[1 + \alpha(k, \varepsilon) \frac{(k+4)}{2 \cdot k + 4} \left(x^{k+2} - 1\right) \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^k \right]$$

Отметим, что перепад давления в роторе с радиальным питанием практически не зависит от размера газовой полости, если последняя не превышает некоторого предельного размера.

Построенные математические модели и методы расчета, предложенные алгоритмы составляют основу решения задач оптимизации и управления процессами разделения суспензий для широкого класса центрифуг. Результаты выполненных теоретических и прикладных исследований, выработанные рекомендации могут быть использованы в профильных научно-исследовательских и проектных организациях, промышленных предприятиях, связанных с разделением, фильтрованием и очисткой жидких сред.

Данный вариант решения позволяет получить в явном виде выражения для расчёта коэффициента проскальзывания.

СПИСОК: ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагуткин, М.Г. Оценка действия силы Кориолиса в аппаратах с закрученным потоком / М.Г. Лагуткин, Д.А. Баранов. - ТОХТ, 2004, т.38, №1.
2. Плотников, В.А. Течение жидкости в цилиндрическом роторе с проницаемыми стенками / В.А. Плотников, О.А. Трошкин. - Тез. докл. III Всесоюзной научной конференции, М: МИХМ, 1983.
3. Соколов, В.И. Проблемы теории центрифугирования. - Известия вузов. Пищевая технология, 1981, №1.
4. Трошкин, О.А. Приближенная модель вихревого потока, ограниченного проницаемыми стенками. - ТОХТ, 1988, т.22, №5.

†Авторы статьи:

Евграфова
Анна Борисовна,
аспирант КузГТУ.
E-mail: Evgrafovaanna@mail.ru

Плотников
Валерий Алексеевич,
канд. техн. наук, доц. каф.
процессов, машин и аппаратов химических производств ИХиНТ, КузГТУ.
E-mail: pvla.pmahp.@kuzstu.ru

Петрик
Павел Трофимович,
доктор техн. наук, профессор, зав. каф. процессов, машин и аппаратов химических производств ИХиНТ, КузГТУ.
E-mail: ppt@kuzstu.ru