

**Численное моделирование процессов перемещения жидкости
в экстракционной камере под действием электроимпульсного разряда на
основе уравнений Навье-Стокса**

Ключевые слова: электрический разряд, канал разряда, ударная волна, несжимаемая жидкость, вязкость, уравнения. Навье-Стокса

Одним из этапов моделирования процессов, происходящих в объеме камеры, является исследование решения гидродинамической задачи о перемещении сплошной среды под действием импульсного силового поля [1, 2]. При этом из рассмотрения исключается область, соответствующая участку канала разряда. Процессы, происходящие здесь, должны быть изучены отдельно и в данном случае достаточно иметь информацию об энергоотводе, обеспечиваемом импульсным электрическим полем.

В процессе расширения канала его стенки можно считать непроницаемыми для окружающей жидкости [3]. Таким образом, канал разряда рассматривается как заполненная однородной плазмой полость, имеющая резкую границу с жидкостью [4]. Так как расстояние между электродами достаточно мало (1-5 мм) по сравнению с размерами камеры (от 500 мл), можно считать область канала разряда точечным источником силового поля, обеспечивающим распространение ударной волны по всему объему камеры.

Течение вязкой несжимаемой жидкости в камере описывается с помощью системы уравнений Навье-Стокса [5], записанных для единицы объема

$$\rho \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + (\vec{w} \Delta) \vec{w} = -grad P + \mu \Delta \vec{w} + f. \quad (1)$$

где $\vec{w}(x, y, z, \tau)$ - вектор скорости жидкости, являющийся в общем случае функцией пространственных координат и времени;

$P(x, y, z, \tau)$ - давление;

$\mu = \nu^* \rho$ - коэффициент вязкого трения жидкости,

ν - коэффициент кинематической вязкости;

ρ - плотность жидкости;

f - силовая функция (вектор массовых сил).

Динамическое уравнение (1) дополняется уравнением неразрывности потока для несжимаемой жидкости:

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0. \quad (2)$$

Действие внешних сил формально проявляется при подстановке соответствующих граничных условий.

Полное ускорение элемента жидкости $\frac{d\vec{w}}{d\tau} \frac{d\vec{w}}{d\tau}$ обычно может быть представлено в виде суммы локального ускорения $\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau}$, отражающего нестационарность течения, и ускорения $(\vec{w}, \operatorname{grad} \vec{w})$, связанного с перемещением жидкости из одной точки пространства в другую, где скорость отлична от предыдущей. Форма второго слагаемого уравнения (1) определяется пропорциональностью силы вязкого трения σ_{mp} и поперечного градиента скорости $\frac{\partial w}{\partial n}$ с постоянным коэффициентом μ :

$$\sigma_{mp} = \mu \frac{\partial \vec{w}}{\partial n}. \quad (3)$$

где n - нормаль к параллельным векторам силы трения и скорости жидкости.

При выполнении вычислений используется безразмерная форма записи исходных уравнений. Для этого вводятся новые величины, соответствующие масштабам рассматриваемого явления. Масштабом скоростей w_i является характерная скорость движения жидкости U_0 в данном процессе, масштаб координат x_i - размеры экстракционной камеры L , масштабами параметров ρ , ν , f_i - значения, заданные условиями задачи. Таким образом, уравнения Навье-Стокса могут быть записаны в следующей форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W_i}{\partial(U_0 \tau / L)} + \sum_k W_k \frac{\partial W_i}{\partial X_k} = -\frac{\partial(\frac{P}{\rho U^2})}{\partial X_i} + \frac{1}{U_0 \rho L / \mu} \sum_k \frac{\partial^2 W_i}{\partial X_k^2} + \frac{f_i L}{U_0^2}; \\ \sum_k \frac{\partial W_k}{\partial X_k} = 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

где k – переменная суммирования по всем координатам.

Система уравнений (4) содержит в безразмерном виде искомые функции скорости $W_i = w/U_0$, давления $\bar{P} = P/(\rho U_0^2)$, независимые переменные $X_i = x_i/L$ и $\bar{t} = U_0 \tau / L$ (вместо x_i и τ), а также параметры – число Рейнольдса Re и число Фруда Fr . Число Рейнольдса $Re = U_0 \rho L / \mu$ представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости и определяет интенсивность вынужденной конвекции (течения с характерной скоростью или перепадом давления).

Другой безразмерный параметр $F_0 = f_0 L / U_0^2$ характеризует отношение массовых сил к силам инерции. $F_0 = (Fr)^{-1/2}$, Fr – число Фруда, f_0 – масштаб силы, f/f_0 – безразмерная форма записи силы [6].

Использование безразмерной системы преследует две цели: приведение значений вычисляемых величин к соответствующей шкале, а также расчет и обработка результатов в общей критериальной форме, содержащей минимальное число параметров и могут достигаться соответствующим выбором масштабов.

Система нелинейных уравнений (4) в частных производных второго порядка, определяющая поля скорости и давления в потоке жидкости как функции пространственных координат и времени, в общем виде не может быть решена аналитически [7], поэтому для конкретных условий выбираются соответствующие упрощения, позволяющие решить рассматриваемую задачу методами вычислительной математики.

Одним из таких приближений является модель пограничного слоя, позволяющая получить решения для компонент скорости, что, в свою очередь, важно для исследования степени эффективности проводимых процессов. Хотя одним из основных критериев качества проводимого процесса можно

назвать выход целевого продукта z , данная характеристика является менее информативной, чем распределение поля скоростей и давления по объему камеры. Это связано с большой зависимостью величины выхода z от физико-химических свойств обрабатываемого растительного сырья, а также невозможностью воспроизводимостью результатов при работе с биологическими объектами.

Скорость и давление, определяемые при решении гидродинамической задачи, являются более точными критериями степени воздействия на сырье ударной волны, создаваемой пульсирующим каналом разряда, кроме того, данные характеристики не зависят от вида сырья и их анализ позволяет дать ряд общих рекомендаций по ведению процесса [8].

Литература

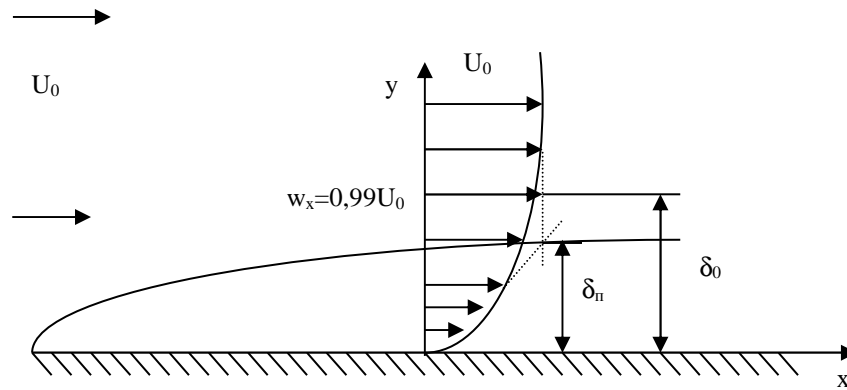
1. Мартиросян К.В. Моделирование процессов диффузии при электроимпульсном разряде в жидкости применительно к экстрагированию растительного сырья. Дисс. ... канд. техн. наук. Тамбов, 2000. – 123 с.
2. Мартиросян К.В. Моделирование процессов диффузии при электроимпульсной экстракции растительного сырья. Материалы 54-й конференции по фармакологии и фармации. - Пятигорск, 1999. - С. 54.
3. Денисенко О.Н., Казуб В.Т., Кудимов Ю.Н., Челомбитько В.А. Экстракция изохинолиновых алкалоидов. Журнал аналитической химии, 1994. - Т. 49. - Вып.11. - С. 1205-1206.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде М., Наука, 1971. - 314 с.
5. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. - М., Наука, 1990. - 214 с.
6. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов П.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. - М., Наука, 1984. - 215 с.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., Наука, 1966. - 726 с.

8. Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассобмен с поверхностью раздела. - М., Наука. - 1990. - 271 с.

Гидродинамические процессы в пограничном слое

Ключевые слова: толщины пограничного слоя, критерий Рейнольдса, градиент скорости, массообмен.

Рассмотрим пограничный слой - тонкую пристеночную зону, где скорость жидкости меняется от нулевого значения непосредственно у стенки до величины, близкой к скорости вне пограничного слоя [1, 2]. Его толщина, согласно экспериментальным данным и теоретическим оценкам, имеет порядок



$10^{-4} - 10^{-5}$ м [3].

Рис 1. Продольная компонента скорости w_x и толщина пограничных слоев δ_π и δ_0 вблизи плоской поверхности при продольном ее обтекании

Большие значения производных скорости по нормальному к стенке направлению приводят к значительным касательным напряжениям трения даже

для жидкостей с малым коэффициентом молекулярной вязкости, т.е. в пределах пограничного слоя силы вязкого трения являются определяющими.

Поведение жидкости в пределах пограничного слоя также описывается уравнением Навье-Стокса, однако, ввиду малого поперечного размера слоя, возможны существенные упрощения уравнения (1). В тонком слое (рис. 1)

задачу можно считать плоской ($w_z=0$, $w_y \ll v_x$). Поперечные градиенты скорости в пределах слоя значительно превышают продольные. В пределах пограничного слоя сила тяжести играет пренебрежимо малую роль по сравнению с силами трения. Градиент давления поперек слоя оказывается несущественным, и, следовательно, статическое давление в пограничном слое равно давлению в основном потоке, которое может быть определено из уравнения для идеальной жидкости вне пограничного слоя.

При анализе процессов массоотдачи требуется определить толщину пограничного слоя. Используются два различных понятия толщины пограничного слоя. Согласно первому из них, внешней границей слоя считается геометрическое место точек, где компонента w_x составляет 99% от скорости внешнего потока U_0 [1, 4].

$$\delta_0 \approx 5 \sqrt{\frac{\nu x}{U_0}}. \quad (1)$$

В соответствии со вторым понятием толщину приведенного пограничного слоя можно определить с помощью точки пересечения касательной к профилю продольной скорости в точке $y=0$ и линии $w_x=U_0$.

Из рисунка видно, что

$$\frac{U_0}{\delta_i} = \left. \frac{\partial w_x}{\partial y} \right|_{y=0}. \quad (2)$$

Использование результата решения уравнения (1) дает:

$$\delta_i \approx 3 \sqrt{\frac{\nu x}{U_0}} = \frac{3x}{\sqrt{\text{Re}_x}}. \quad (3)$$

Здесь в критерий Рейнольдса в качестве характерного размера входит продольная координата x , отсчитываемая от начала стенки.

Из уравнений (1) и (3) следует, что величины δ_n и δ_0 различаются лишь постоянными множителями. Толщина пограничного слоя возрастает от нулевого значения в точке набегания потока по закону квадратичной параболы.

Для потока жидкости существенное значение имеет характер профиля продольной скорости в пограничном слое непосредственно у стенки ($\xi \ll 1$). Анализ общего решения задачи пограничного слоя приводит в этом случае к следующим соотношениям для компонент скорости:

$$w_x \approx U_0 \frac{y}{\delta_0}; w_y \approx \nu \frac{y^2}{\delta_0^3}. \quad (4)$$

Это верно для ламинарного течения жидкости, когда при массообмене между слоями действуют только механизмы молекулярной диффузии, и данные результаты могут быть применены при рассмотрении процессов, происходящих в области капилляров и пор растительного сырья, где скорости перемещения жидкости малы.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М., Наука, 1987. - 840 с.
2. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии. - Л., Химия. - 1967. - 719 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с нем. М., Наука, 1974. - 711 с.
4. Романков П.Г., Рашковская Н.Б., Фролов В.Б. Массообменные процессы химической технологии. - М., Химия, 1975. - 178 с.
5. Мартиросян К.В. Моделирование процессов диффузии при электроимпульсном разряде в жидкости применительно к экстрагированию растительного сырья. Дисс. ... канд. техн. наук. Тамбов, 2000. – 123 с.