

УДК 6.096.5

К.Г. АНИСИМОВ, В.И. ВОЛКОВ

Модели течения в упакованных слоях

Детальное знание явлений потока в упакованных слоях существенно во многих областях химического и нефтегазового проектирования. Упакованные слои имеют важное применение главным образом в каталитических и ядерных реакторах, а также в оборудовании для тепломассопередачи (столбцы абсорбции, теплообменники и т.п.). Поэтому изучение гидродинамики зернистого слоя имеет большое практическое применение.

Сложная динамика течения в зернистых средах делает строгое теоретическое исследование объекта затруднительным. Поэтому на практике приходится обращаться к эксперименту и различным идеализированным моделям. В настоящее время общепринятым и широко используемым в расчетах является уравнение Эргана, связывающее перепад давления со среднерасходной скоростью внутри зернистого слоя [1]:

(1)

где Dr/L – градиент давления; u_0 , μ и m – расходная скорость жидкости в пустом опытном участке, плотность и динамическая вязкость жидкости; e – пористость слоя шариков диаметром d .

Запишем уравнение Навье–Стокса для зернистых сред, оставляя в лапласиане производные только по продольной координате:

(2)

Допустим, что движение жидкости в засыпке квазипериодично с пространственным периодом, пропорциональным эквивалентному диаметру засыпки. Соответствующее волновое число k запишется следующим образом:

$$k=2\pi/d_0. \quad (3)$$

Профиль скорости формируется не средней пористостью e , а минимальным относительным проходным сечением Y . Используя связь скоростей $u = u_0/Y$, подставим выражение бегущей волны: $\exp i(\omega t - kz)$ в уравнение (2). С учетом (3) получим:

(4)

Для получения наиболее общего результата возьмем хаотичную упаковку, среднее значение пористости e для которой равно 0,38. За минимальное «живое» сечение хаотичной упаковки можно взять минимальное пропускное сечение кубической упаковки 0,215 из тех соображений, что минимальное проходное сечение гексагональной упаковки с минимальной пористостью также равно

0,215. Тогда

и окончательно уравнение (4) запишется:

(5)

Несмотря на достаточно условный вывод полученного соотношения, зависимость от пористости в нем близка к эмпирическому выражению Эргана (1). Большое отличие полученного коэффициента перед квадратичным по скорости членом уравнения (5) от экспериментального связано с достаточно приближенной физической моделью, так как простое гармоническое приближение слабо отражает физическую картину в засыпке для инерционного режима течения, когда в уравнении

Навье–Стокса существенен вклад нелинейных членов.

Для оценки чисел Re , начиная с которых необходимо учитывать нестационарные пульсации скорости по времени, воспользуемся соотношением, аналогичным гипотезе Тейлора о замороженной турбулентности:

$$w = k u_0 / \gamma. \quad (6)$$

Приравняем модули первого и последнего члена в уравнении (2), сократив обе части равенства на значение скорости:

$$w = nk^2. \quad (7)$$

Из уравнений (3, 6, 7) и определения эквивалентного диаметра найдем:

$$(8)$$

Окончательно имеем: $u_0 d / n = 3p(1-e) / e\gamma$.

Подставляя численные значения e и γ , получим $Re = 71,5$.

Эксперименты по измерениям поперечной компоненты скорости [2] показали, что среднее значение модуля поперечной компоненты относительной скорости при числе $Re = 22$ всего лишь на 10% меньше численного коэффициента в выражении для поперечной дисперсии при аналогичной упаковке, приведенного в работе [1]. При числе $Re = 62$ это отличие составляет уже 30% и сохраняется таким до числа $Re = 206$. При числе $Re = 500$ оно повышается до 45%. Если считать, что механизм поперечного переноса в упаковках состоит из конвективного переноса крупномасштабными вихрями и переноса за счет пульсации скорости в этих вихрях, то можно сделать вывод, что при постоянстве коэффициента поперечной дисперсии компенсация уменьшения вклада в коэффициент дисперсии конвективной составляющей из-за измельчения вихрей происходит за счет

роста вклада пульсаций скорости, который необходимо учитывать уже с числа $Re \sim 60$. Это косвенно подтверждает приведенную выше теоретическую оценку для характерного пульсационного числа $Re = 71,5$.

Литература

1. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л., 1979.
2. Волков В.И. Исследование аппаратов двухфазных потоков в ресурсосберегающих технологиях: Автореферат дисс. докт. техн. Барнаул, 1998.