

Лекция 14 «Движение жидкостей через неподвижные зернистые и пористые слои»

Цель: Опишите основы движения жидкостей через неподвижные зернистые и пористые слои. Приведите основные характеристики неподвижных зернистых и пористых слоёв. Охарактеризуйте режимы течения жидкостей через неподвижные зернистые и пористые слои.

Краткий конспект лекции: Во многих процессах химической технологии происходит движение капельных жидкостей или газов через неподвижные слои материалов, состоящих из отдельных элементов.

Форма и размеры элементов зернистых слоев весьма разнообразны: мельчайшие частицы слоев осадка на фильтрах, гранулы, таблетки и кусочки катализаторов или адсорбентов, крупные насадочные тела (в виде колец, седел и т.п.), применяемые в абсорбционных и ректификационных колоннах. При этом зернистые слои могут быть *монодисперсными* или *полидисперсными* в зависимости от того, одинаковы или различны по размеру частицы одного и того же слоя.

При движении жидкости через зернистый слой, когда поток полностью заполняет свободное пространство между частицами слоя, можно считать, что жидкость одновременно обтекает отдельные элементы слоя и движется внутри каналов неправильной формы, образуемых пустотами и порами между элементами. Изучение такого движения, как указывалось, составляет смешанную задачу гидродинамики.

При расчете гидравлического сопротивления зернистого слоя может быть использована зависимость, аналогичная по виду уравнению для определения потери давления на трение в трубопроводах:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_3} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \quad (1)$$

Однако коэффициент λ в уравнении (1) лишь формально отвечает коэффициенту трения и он отражает не только влияние сопротивления трения, но и дополнительных местных сопротивлений, возникающих при движении жидкости по искривленным каналам в слое и обтекании ею отдельных элементов слоя. Таким образом, λ в уравнении (1) является общим коэффициентом сопротивления.

Эквивалентный диаметр d_3 , соответствующий суммарному поперечному сечению каналов в зернистом слое, может быть определен следующим образом. Зернистый слой характеризуется размером его частиц, а также удельной поверхностью и долей свободного объема.

Удельная поверхность a ($\text{м}^2/\text{м}^3$) представляет собой поверхность элементов, или частиц материала, находящихся в единице объема, занятого слоем.

Доля свободного объема, или *порозность ε* , выражает объем свободного пространства между частицами в единице объема, занятого слоем.

Если V – общий объем, занимаемый зернистым слоем, и V_0 – объем, занимаемый самими элементами, или частицами, образующими слой, то $\varepsilon = (V - V_0)/V$, т.е. является величиной безразмерной.

Пусть поперечное сечение аппарата, заполненного зернистым слоем, составляет S (m^2), а высота слоя равна H (m). Тогда объем слоя $V = SH$ и объем $V_0 = SH(1 - \varepsilon)$. Соответственно свободный объем слоя $V_{св} = SH\varepsilon$, а поверхность частиц, равная поверхности образуемых ими каналов, составляет SHa .

Для того чтобы определить суммарное сечение каналов слоя, или свободное сечение слоя, необходимое для вычисления $d_э$, надо разделить свободный объем слоя $V_{св}$ на длину каналов. Однако их длина не одинакова и должна быть усреднена. Если средняя длина каналов превышает общую высоту слоя в α_k раз, то средняя длина каналов равна $\alpha_k H$, а свободное сечение слоя составляет $SH\varepsilon/\alpha_k H = S\varepsilon/\alpha_k$, где α_k – коэффициент кривизны каналов.

Смоченный периметр свободного сечения слоя может быть вычислен делением общей поверхности каналов на их среднюю длину, т.е. $SHa/\alpha_k H = Sa/\alpha_k$.

Следовательно, эквивалентный диаметр каналов в зернистом слое, согласно уравнению $d_э = 4S/\Pi$, выразится отношением

$$d_э = \frac{4\left(\frac{S\varepsilon}{\alpha_k}\right)}{\frac{Sa}{\alpha_k}} = \frac{4\varepsilon}{a} \quad (2)$$

Таким образом, эквивалентный диаметр для зернистого слоя определяется делением учетверенной доли свободного объема слоя на его удельную поверхность.

Эквивалентный диаметр $d_э$ может быть выражен также через размер частиц, составляющих слой. Пусть в $1 m^3$, занимаемом слое, имеется n частиц. Объем самих частиц равен $(1 - \varepsilon)$, а их поверхность составляет a .

Средний объем одной частицы

$$v_ч = \frac{1 - \varepsilon}{n} = \frac{\pi d^3}{6}$$

а ее поверхность

$$F_ч = \frac{a}{n} = \frac{\pi d^2}{\Phi}$$

где d – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица; Φ – фактор формы, определяемый уравнением $\Phi = F_{ш}/F$ (где $F_{ш}$ – поверхность шара, имеющего тот же объём, что и рассматриваемое тело поверхностью F); для шарообразных частиц $\Phi = 1$.

Тогда отношение поверхности частицы к ее объему

$$\frac{a}{1 - \varepsilon} = \frac{6}{\Phi d}$$

откуда

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\Phi d} \quad (3)$$

Подставив значение a в уравнение (2), получим

$$d_э = \frac{2\Phi\epsilon d}{3(1-\epsilon)} \quad (4)$$

Для полидисперсных зернистых слоев расчетный диаметр d вычисляют из соотношения

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}} \quad (5)$$

где x_i – объемная или, при одинаковой плотности, массовая доля частиц с диаметром d_i .

При определении дисперсного состава ситовым анализом значения d_i представляют собой средние ситовые размеры соответствующих фракций, т.е. средние значения между размерами проходного и непроходного сит.

В уравнение (1) входит действительная скорость жидкости в каналах слоя, которую трудно найти. Поэтому целесообразно выразить ее через скорость, условно отнесенную к полному поперечному сечению слоя или аппарата. Эту скорость, равную отношению объемного расхода жидкости ко всей площади поперечного сечения слоя, называют *фиктивной скоростью* и обозначают символом w_0 .

При этом для расчета действительной скорости условно пренебрегают кривизной каналов, по которым движется жидкость в слое, т. е. считают среднюю длину каналов равной высоте H слоя ($\alpha_k = 1$). При $l = H$ суммарное сечение каналов составляет $SH\epsilon/H = S\epsilon$; произведение этого сечения на скорость w в каналах равно объемному расходу, который можно определить также произведением Sw_0 . Отсюда $S\epsilon w = Sw_0$. Соответственно зависимость между действительной скоростью w и фиктивной скоростью w_0 выражается соотношением

$$w = \frac{w_0}{\epsilon} \quad (6)$$

На самом деле величина w меньше скорости жидкости в реальных каналах, причем тем в большей степени, чем больше коэффициент кривизны α_k . Однако это различие не оказывает существенного влияния на вид расчетного уравнения для гидравлического сопротивления. Поэтому в уравнение (1) подставляют w , согласно выражению (6), а вместо длины каналов l – общую высоту H слоя. Кроме того, вместо $d_э$ в уравнение (1) подставляют его выражение в соответствии с зависимостью (4). Тогда получают

$$\Delta p = \lambda - \frac{H}{\left[\frac{2\Phi\epsilon d}{3(1-\epsilon)} \right]} \cdot \frac{\rho \left(\frac{w_0}{\epsilon} \right)^2}{2}$$

или

$$\Delta p = \frac{3(1-\epsilon)}{2\epsilon^3\Phi} \lambda \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2} \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления λ , как и при движении жидкости в трубах и движении тел в жидкостях, зависит от гидродинамического режима, определяемого значением критерия Рейнольдса. В данном случае после подстановки w из выражения (6) и d_3 , согласно зависимости (2), выражение критерия Рейнольдса принимает вид

$$Re = \frac{wd_3\rho}{\mu} = \frac{w_0^4\varepsilon\rho}{\varepsilon a\mu}$$

Или

$$Re = \frac{4w_0\rho}{a\mu} = \frac{4W}{a\mu} \quad (8)$$

где W – массовая скорость жидкости, отнесенная к 1 m^2 сечения аппарата, $кг/(m^2 \cdot сек)$.

При замене в выражении (8) удельной поверхности a ее значением из зависимости (3) или при прямой подстановке в Re величины d_3 , согласно уравнению (4), получают соотношение:

$$Re = \frac{2}{3} \cdot \frac{\phi}{1-\varepsilon} \cdot \frac{wd_0\rho}{\mu} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\phi}{1-\varepsilon} \cdot Re_0 \quad (9)$$

где

$$Re_0 = \frac{wd_0\rho}{\mu} \quad (10)$$

Безразмерный комплекс Re_0 представляет собой модифицированный критерий Рейнольдса, выраженный через фиктивную скорость жидкости и размер частиц слоя (d – диаметр, шара, имеющего тот же объем, что и частица).

Предложен ряд зависимостей для расчета коэффициента сопротивления λ при различных режимах движения жидкости через слой. Все эти уравнения получены обобщением опытных данных различных исследователей и дают более или менее согласующиеся между собой результаты. Для всех режимов движения применимо, в частности, обобщенное уравнение

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34 \quad (11)$$

В этом уравнении критерий Re выражается зависимостью (8) или (9).

Следует отметить, что при движении жидкости (газа) через зернистый слой турбулентность в нем развивается значительно раньше, чем при течении по трубам, причем между ламинарным и турбулентным режимами нет резкого перехода. Ламинарный режим практически существует примерно при $Re < 50$. В данном режиме для зернистого слоя $\lambda = A/Re$ [ср. с уравнениями $\lambda = 64/Re$ и $\xi = 24/Re$].

При $Re < 1$ вторым слагаемым в правой части уравнения (11) можно пренебречь и определять λ по уравнению

$$\lambda = \frac{133}{Re} \quad (11a)$$

При $Re > 7000$ наступает автомодельная область турбулентного режима движения в зернистом слое, когда можно пренебречь первым членом в правой части уравнения (11). В этом случае

$$\lambda \approx 2,34 = const \quad (11б)$$

[ср. с выражениями $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2lg \frac{3,7}{\varepsilon}$ (14, Лекция №12) и $\xi = 0,44 = const$ для течения жидкости по трубам и для движения тел в жидкостях].

Уравнение (11) применимо для зернистых слоев с относительно равномерным распределением пустот (слои шаров, гранул, зерен, частиц неправильной формы). В тоже время для кольцеобразных насадок значения λ по этому уравнению при турбулентном режиме получаются заниженными из-за того, что внутренние полости колец нарушают равномерность распределения пустот.

Рассмотрим более подробно ламинарное движение жидкости через зернистый слой. Такой режим течения жидкости часто наблюдается в одном из распространенных процессов разделения неоднородных систем – фильтровании через пористую среду (слой осадка и отверстия фильтровальной перегородки). При малом диаметре пор и соответственно низком значении Re (меньшем критического) движение жидкости при фильтровании является ламинарным. Подставив λ из уравнения (11а) и выражение (9) для Re в уравнение (7), после элементарных преобразований получим

$$\Delta p = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu H}{\Phi^2 \varepsilon^3 d^2} w_0 = 150 \frac{\varphi_{\Phi} (1-\varepsilon)^2 \mu H}{\varepsilon^3 d^2} w_0 \quad (12)$$

где φ_{Φ} – коэффициент формы, связанный с фактором формы соотношением

$$\varphi_{\Phi} = \frac{1}{\Phi^2} \quad (12а)$$

Уравнение (12) может быть использовано для расчета удельного сопротивления осадка, когда размер его частиц достаточно велик. Из уравнения (12) видно, что гидравлическое сопротивление зернистого слоя при ламинарном движении жидкости пропорционально ее скорости в первой степени.

С увеличением турбулентности влияние скорости жидкости на гидравлическое сопротивление возрастает. В пределе – для автомоделной области – подстановка в уравнение (7) значения λ из выражения (11б) приводит к квадратичной зависимости Δp от скорости.

Значения ε , a , Φ (или φ_{Φ}) для различных материалов при разных способах их загрузки находятся, как правило, опытным путем и приводятся в справочной литературе.

Экспериментально Φ (или φ_{Φ}) часто определяют, измеряя гидравлическое сопротивление слоя, состоящего из частиц данного материала соответствующего размера, с известной долей свободного объема. Замерив Δp при определенном значении w_0 , отвечающем ламинарному режиму, и фиксированной температуре (а значит, и вязкости) жидкости, вычисляют Φ (или φ_{Φ}) по уравнению (12).

Порозность ε в значительной степени зависит от способа загрузки слоя. Так, при свободной засыпке слоя шарообразных частиц доля свободного объема зернистого слоя может быть в среднем принята $\varepsilon \approx 0,4$. Однако практически ε в данном случае может изменяться от 0,35 до 0,45 и более.

Кроме того, величина ε может зависеть от соотношения между диаметром d частиц и диаметром D аппарата, в котором находится слой. Это связано с так называемым *пристеночным эффектом*: плотность упаковки частиц, прилегающих к стенкам аппарата, всегда меньше, а порозность слоя у стенок всегда выше, чем в центральной части аппарата. Указанное различие порозности тем значительнее, чем больше отношение d/D . Так, при $d/D = 0,25$, т.е. когда диаметр аппарата превышает диаметр частиц слоя лишь вчетверо, порозность слоя может быть примерно на 10% больше, чем в аппарате, в котором влияние стенок пренебрежимо мало.

Вследствие этого при моделировании промышленных аппаратов с зернистым слоем диаметр модели должен превышать диаметр частиц слоя не менее, чем в 8-10 раз.

Пристеночный эффект не только изменяет порозность слоя, но и приводит к неравномерной порозности его по сечению аппарата. Это, в свою очередь, вызывает неравномерность распределения скоростей потока: скорости у стенок, где доля свободного объема слоя больше и сопротивление движению ниже, превышают скорости в центральной части аппарата. Таким образом, в пристенных слоях может происходить проскок («байпасирование») большей или меньшей части потока без достаточно продолжительного контакта с зернистым слоем. По той же причине может наблюдаться и неравномерность распределения жидкости при ее пленочном течении в насадочных абсорбционных и ректификационных колоннах.

Некоторые аппараты работают с *подвижным зернистым слоем*: движение газов (реже жидкостей) происходит сквозь медленно движущиеся сверху вниз (под действием сил тяжести) плотные зернистые слои. По такому принципу действуют, например, адсорберы с движущимся слоем зернистого сорбента. Гидравлическое сопротивление движущегося зернистого слоя отличается от сопротивления неподвижного вследствие увеличения доли свободного объема слоя при его движении, а также некоторого увлечения газа (или жидкости) движущимся слоем. Данные для расчета гидравлического сопротивления подвижных зернистых слоев приводятся в специальной литературе.

Вопросы для самоконтроля:

1. Опишите основы движения жидкостей через неподвижные зернистые и пористые слои.
2. Приведите основные характеристики неподвижных зернистых и пористых слоёв.
3. Охарактеризуйте режимы течения жидкостей через неподвижные зернистые и пористые слои.

Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 392 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.