ЛЕКЦИЯ 1

ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ КУРСА
«ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ»
УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ

В курсе «Процессы и аппараты химической технологии» изучаются физико-химическая сущность и теория процессов, характерных для всех отраслей химической технологии, а также принципы устройства и инженерные методы расчета аппаратов, предназначенных для проведения химико-технологических процессов.

На основе данных, полученных в результате изучения естественных процессов и учета достижений науки и техники, разрабатываются и реализуются многочисленные промышленные процессы с целью переработки сырьевых продуктов природы в средства производства и предметы потребления. Такие процессы называются технологическими.

Овладение наукой о процессах и аппаратах позволяет решать следующие задачи инженерной химии.

1. При эксплуатации действующих производств выбирать наилучшие технологические режимы, повышать производительность аппаратов и качество продукции, решать экологические вопросы.

2. При проектировании новых производств разрабатывать высокоэффективные и малоотходные технологические схемы и выбирать наиболее рациональные типы аппаратов.

Процессы химической технологии разделяют в зависимости от закономерностей, характеризующих их протекание, на пять основных групп.

Первая группа – *гидромеханические процессы*, скорость которых определяется законами гидродинамики. К ним относятся осаждение взвешенных в жидкой или газообразной среде частиц под действием силы тяжести, центробежной силы или сил электрического поля, фильтрование жидкостей или газов через пористые перегородки или слой зернистого материала под действием разности давлений, перемешивание в жидкой среде, псевдоожижение твердого зернистого материала.

Вторая группа – *тепловые процессы*, скорость которых определяется законами теплопередачи. В эту группу входят процессы нагревания, охлаждения, конденсации и выпаривания.

Третья группа – *массообменные (диффузионные) процессы*. Скорость этих процессов определяется скоростью перехода веществ из одной фазы в другую, т.е. законами массопередачи. К диффузионным процессам относятся абсорбция, ректификация, экстракция, сублимация, кристаллизация, адсорбция, сушка и др.

Четвертая группа – *химические процессы*, связанные с превращением веществ и изменением их химических свойств. Скорость этих процессов определяется закономерностями химической кинетики.

Пятая группа – *механические процессы* – включает измельчение твердых материалов, классификацию сыпучих материалов и смешение их.

Общим для всех выше перечисленных групп процессов является перенос некоторой субстанции из одной точки в другую в пределах одной фазы или из одной фазы в другую через разделяющую их поверхность.

В зависимости от того, изменяются или не изменяются во времени параметры процессов (скорости движения потока, температуры, давления, концентрации и т.д.), их подразделяют на *стационарные* (установившиеся) и *нестационарные* (неустановившиеся). Если обозначить совокупность параметров, влияющих на процесс, через U, то при стационарном процессе $dU/dt = 0$, т.е. эти параметры могут изменяться в пространстве, но не изменяются во времени t. При нестационарном процессе $dU/dt \neq 0$, т.е. параметры, влияющие на процесс, изменяются не только в пространстве, но и во времени. Нестационарное состояние процесса возникает, например, в период пуска и изменения режима работы установок непрерывного действия.

Стационарные процессы отличаются стабильностью как ситуации в технологическом аппарате, так и характеристик получаемого продукта; они легко контролируются и управляются; для них обычно характерна высокая производительность.

По способу организации химико-технологические процессы подразделяют на *периодические* и *непрерывные*. Периодический процесс характеризуется единством места протекания отдельных его стадий и неустановившимся состоянием во времени (температура, давление, концентрация и другие параметры в ходе процесса изменяются). При этом исходные вещества периодически загружаются в аппарат и обрабатываются, а готовый продукт выгружается, т.е. все стадии процесса обычно осуществляются в одном аппарате, но в разное время. Таким образом, все периодические процессы *нестационарны*.

Непрерывный процесс характеризуется единством времени протекания всех его стадий, установившимся состоянием, непрерывной загрузкой исходных материалов и выгрузкой конечного продукта. При этом все стадии процесса протекают одновременно, но в разных точках аппарата (или аппаратов), причем в каждой его точке параметры процесса во времени не изменяются.

Периодические процессы целесообразно применять в производствах небольшого масштаба, при часто меняющемся ассортименте выпускаемой продукции. Проведение процессов по непрерывному принципу позволяет значительно повысить производительность аппаратуры и качество получаемых продуктов, полностью автоматизировать и механизировать производство. Поэтому в промышленности, особенно в многотоннажных производствах, периодические процессы повсеместно вытесняются непрерывными.

Большинство процессов химической технологии связаны с состоянием и движением (перемещением) жидкостей, газов и паров. Эти законы изучаются в науке гидромеханика, которая включает в себя гидростатику, кинематику жидкости и гидродинамику.

Практическое приложение законов гидромеханики изучается в гидравлике.

Гидравлику подразделяют на:

- гидростатику, где рассматриваются законы равновесия;

- гидродинамику, где изучаются законы движения жидкостей и газов.

В дальнейшем под жидкостями будем понимать все среды, обладающие текучестью (т.е не только жидкости, но газы и пары), т.к. законы движения для них практически одинаковы.

Реальные жидкости делятся на капельные (практически несжимаемые) и на упругие (пары и газы – соответственно, сжимаемые). Реальные жидкости обладают вязкостью, которая при движении вызывает касательные напряжения, что сильно осложняет математическое описание движения. В целях упрощения решения некоторых задач гидромеханики используют понятие об *идеальной жидкости* – не обладающей вязкостью и абсолютно несжимаемую, т.е. плотность которой не зависит от температуры и давления.

В гидромеханике жидкость условно рассматривается как *сплошная* среда при сохранении свойств реальной жидкости, т.к. получение уравнений движения жидкостей в дискретных средах (совокупности молекул) представляет собой практически неразрешимую задачу. Для математического описания процессов требуется использование понятия бесконечно малых величин, поэтому в описании модели сплошной среды вводится понятие физически бесконечно малого объёма.

Этот объём должен быть достаточно малым по сравнению с объёмом тела, где изучается процесс гидромеханики, но большим по сравнению с межмолекулярными расстояниями. Он должен включать достаточно большое число молекул, чтобы в нем считать свойства (плотность, вязкость, теплоемкость и др) постоянными.

Физически бесконечно малый объём идентичен понятию жидкой частицы, движение которой рассматривается как движение материальной точки.

Действующие на жидкие частицы силы подразделяются на *внутренние* и *внешние*.

К внутренним относятся силы взаимодействия между жидкими частицами внутри рассматриваемого объёма. К внешним относятся силы, действующие на жидкость со стороны других тел (в том числе той же жидкости), окружающих этот объём жидкости или силы физических полей.

Внешние силы подразделяются также на два класса: *объёмные* (пример: сила тяжести) и *поверхностные* (пример – сила трения).

В реальной жидкости действуют следующие силы:

1. Силы давления;

2. Силы трения (вязкости);

3. Силы поверхностного натяжения (при наличии границы раздела между фазами);

4. Силы, вызванные воздействием внешних полей (сила тяжести, центробежная сила и пр.)

<u>Основные гидромеханические величины, характеризующие жидкость</u>

1. Нормальное напряжение, давление.

Выделим в покоящейся жидкости объём *V*, ограниченный поверхностью *S*.

Вектор сил, действующих на элемент поверхности *dS*, $\overrightarrow{dF}$ будет расположен нормально к этой поверхности, так как покоящаяся жидкость не выдерживает касательных сил, т.е. $\overrightarrow{dF} = \overrightarrow{dF_n}$ (Рис.1)

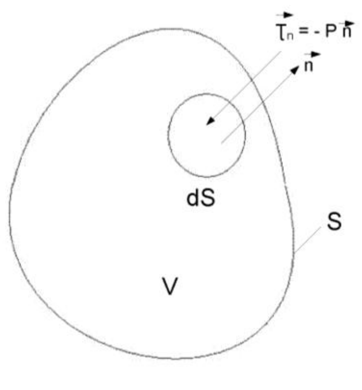

Рис.1.1. К определению нормального напряжения

Проведём к поверхности dS внешнюю единичную нормаль (направленную из объёма V) $\vec{n}$. Сила $\overrightarrow{dF_n}$ будет всегда сжимающей, т.к. реальные технические жидкости практически не способны сопротивляться растягивающим усилиям без разрывов, т.е. без потери сплошности.

Определяем величину нормального напряжения:

$$\vec{\tau}_n = \lim_{dS \to 0} \frac{\overrightarrow{dF}_n}{dS} = -P\,\vec{n} \tag{1.1}$$

где: P - гидростатическое давление (модуль нормального напряжения) P= [Н/м^2] = [Па]

Основным свойством гидростатического давления является то, что его величина не зависит от ориентации площадки, на которую действует напряжение $\vec{\tau}_n$.

2. Скорость, расход.

Для определения скорости физически бесконечно малого объёма (скорости в точке) рассмотрим объём V, имеющий массу m и импульс $\vec{J}$.

Средней по объёму скоростью будет отношение импульса к массе:

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\vec{J}}{m} \tag{1.2}$$

Скоростью в точке будем называть следующий предел

$$\vec{\upsilon} = \lim_{V \to 0} \vec{\upsilon}_{cp} = \lim_{V \to 0} \frac{\vec{J}}{m} \tag{1.3}$$

В гидромеханике также широко используются средняя скорость по выбранной поверхности S, чаще всего по поперечному сечению потока

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\dot{V}}{S} = -\frac{\iint\limits_S \vec{\upsilon}\,\vec{n}\,dS}{S} \tag{1.4}$$

где: $\vec{n}$ – единичная внешняя нормаль к поверхности S

$\dot{V}$ - объёмный поток жидкости (расход), поступающий через сечение S, м^3/с

Знак (-) означает, что входящий поток положительный.

3. Плотность жидкости в точке ρ и средняя плотность ρ_{cp}.

$$\rho = \lim_{V \to 0} \rho_{cp} = \lim_{V \to 0} \frac{m}{V} \tag{1.5}$$

4. Динамическая вязкость.

Динамическая вязкость определяет величину касательных напряжений. Экспериментально установлено, что скорость частиц жидкости, соприкасающихся с твёрдым телом, совпадает со скоростью этого тела (условие прилипания).

Рассмотрим движение жидкости между двумя параллельными пластинами площадью S, одна из которых (верхняя) движется с постоянной, но небольшой скоростью υ, а другая неподвижна. Расстояние между пластинами h (Рис 2)

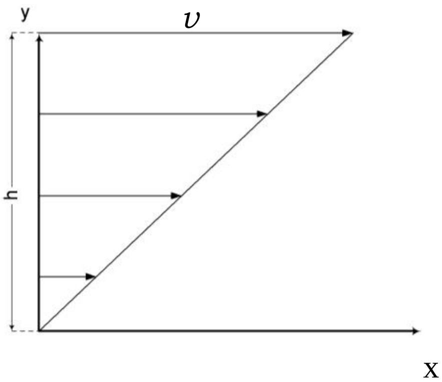

Рис.1.2. Профиль скорости между двумя параллельными пластинами.

Для этого опыта было установлено, что скорость жидкости по оси x зависит линейно от расстояния y от нижней неподвижной пластины:

$$\upsilon_x = \upsilon \frac{y}{h} \qquad (1.6)$$

Верхняя пластина движется из-за приложенной к ней силы T, направленной вдоль пластины, величина которой пропорциональна скорости υ и площади пластины S и обратно пропорциональна расстоянию h

$$T = \mu \frac{\upsilon}{h} S \qquad (1.7)$$

Величина касательного напряжения, действующего в жидкости, определяется как:

$$\tau_s = \frac{T}{S} = -\mu \frac{d\upsilon_x}{dy} \qquad (1.8)$$

где μ - вязкость (динамическая вязкость). $\mu = [\frac{H}{м^2} c] = [Па \cdot c]$

В гидромеханике также используется кинематическая вязкость $\nu = \frac{\mu}{\rho}$; $\nu = [\frac{м^2}{c}]$

Уравнение (1.8) является формулировкой закона внутреннего трения Ньютона.

Вязкость жидкостей и газов определяется их природой, температурой и давлением.

ГИДРОДИНАМИКА

Уравнения гидродинамики являются следствием фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии.

Уравнение неразрывности

Составим материальный баланс неразрывного (сплошного) течения жидкости.

Рассмотрим в области течения произвольный объём *V*, ограниченный поверхностью *S*.

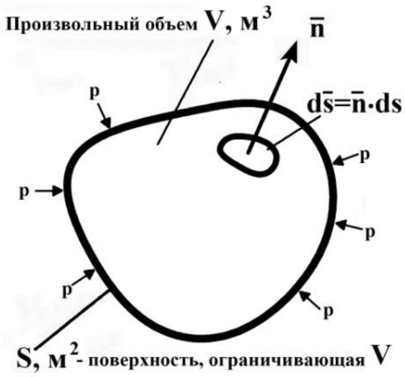

Рис.1.3. К выводу уравнения неразрывности

В каждой точке этой поверхности проведём единичную нормаль $\vec{n}$. Будем считать, что источники массы внутри объёма *V* отсутствуют. Объёмный поток жидкости (расход), входящий в рассматриваемую область из жидкости, примыкающей к данному объёму, т.е. приток жидкости снаружи:

$$Q = -\iint\limits_S v\vec{n}\,dS \qquad (1.9)$$

Знак (-) в уравнении делает входящие потоки положительными.

Массовый поток найдём, умножив подынтегральное выражение на плотность

$$M = -\iint\limits_S \rho\vec{v}\vec{n}\,dS \qquad M = [\text{кг/с}] \qquad (1.10)$$

Произведение $\rho\vec{v}$ называют массовой скоростью или плотностью массового потока.

Интеграл поверхности по формуле Остроградского-Гаусса преобразуем в интеграл по объёму

$$M = -\iiint\limits_V div\rho\vec{v}\,dV \qquad (1.11)$$

Найдём то же изменение массы жидкости в единицу времени, рассматривая объём V изнутри

$$M = \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \qquad (1.12)$$

Приравнивая потоки, полученные определением притока массы снаружи и изнутри объёма V получим

$$\iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\,\rho\vec{v}\right) dV = 0 \qquad (1.13)$$

Поскольку для произвольного объёма подынтегральная функция должна обращаться в нуль, получим уравнение неразрывности (сплошности)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\,\rho\vec{v} = 0 \qquad (1.14)$$

Уравнение неразрывности является законом сохранения массы в дифференциальной форме. Для стационарного движения $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ =0, поэтому уравнение 1.14 принимает вид

$$div\,\rho\vec{v} = 0 \qquad (1.15)$$

Если жидкость несжимаема, $\rho = const$, следовательно

$$div\vec{v} = 0 \qquad (1.16)$$

Запишем это уравнение для компонентов скорости

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \qquad (1.17)$$

Записав $div\,\rho\vec{v}$ в развёрнутой форме, из уравнения (1.14) получаем

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho\, div\,\vec{v} = 0 \qquad (1.18)$$

Это уравнение можно записать в следующем виде

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div\vec{v} = 0 \qquad (1.19)$$

где $$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \qquad (1.20)$$

Величина $\frac{d\rho}{dt}$ называется субстанциональной производной.

Раскроем физический смысл субстанциональной производной.

При движении жидкости отдельная жидкая частица проходит за время *dt* некоторое расстояние, проекции которого *dx, dy, dz.* Одновременно с движением меняются ее гидромеханические параметры. Так, полный дифференциал плотности равен

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial t}dt + \frac{\partial \rho}{\partial x}dx + \frac{\partial \rho}{\partial y}dy + \frac{\partial \rho}{\partial z}dz, \qquad (1.21)$$

следовательно $$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \upsilon_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \upsilon_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + \upsilon_z \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

где $\upsilon_x = \dfrac{dx}{dt}$, $\upsilon_y = \dfrac{dx}{dt}y$, $\upsilon_z = \dfrac{dz}{dt}$

Первое слагаемое уравнения (1.21) означает изменение плотности в данной фиксированной (неподвижной) точке пространства в течение времени *dt,* а остальные слагаемые дают изменение ρ за счёт перемещения частицы на расстояния *dx, dy, dz.*

Индивидуальная производная в форме уравнения (1.20) может быть записана для любой скалярной или векторной величины φ (плотности, давления, скорости):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \upsilon_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \upsilon_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \upsilon_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \qquad (1.22)$$

Из уравнения (1.20) можно также заключить, что для нестационарного процесса $\varphi = \varphi(x,y,z,t)$, для стационарного ($\dfrac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$) $\varphi = \varphi(x,y,z)$

Получим уравнение неразрывности в интегральной форме для стационарного течения жидкости.

<u>Стационарное неразрывное течение жидкости в канале произвольной формы с непроницаемыми стенками</u>

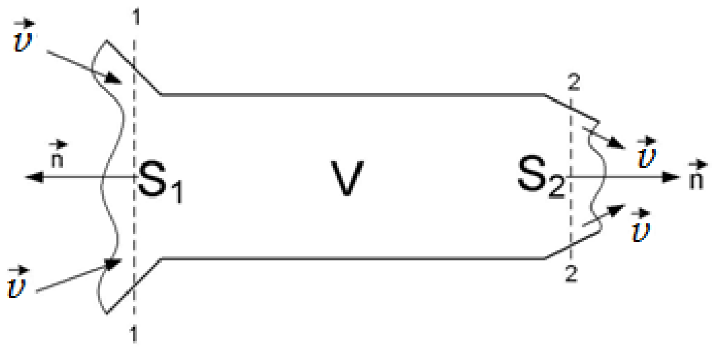

Рис.1.4. К выводу уравнения неразрывности в интегральном виде

Для движущейся жидкости в канале произвольной формы (Рис.1.4) запишем уравнения материального баланса (1.10)÷(1.13) при $\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$, для части канала, ограниченной плоскими сечениями 1 и 2 с поверхностями S_1 и S_2

$$M=-\iiint\limits_{V} div\,\rho\vec{v}\,dV=-\iint\limits_{S}\rho\vec{v}\,\vec{n}dS \tag{1.23}$$

Поскольку стенки непроницаемые, имеем равенство

$$M=-\iint\limits_{S_1}\rho\vec{v}\,\vec{n}dS-\iint\limits_{S_2}\rho\vec{v}\,\vec{n}dS \tag{1.24}$$

Найдём положительные величины средней массовой скорости для сечений 1 и 2

$$(\rho v)_{cp1}=-\frac{\iint\limits_{S_1}\rho\vec{v}\,\vec{n}dS}{S_1} \qquad (\rho v)_{cp2}=-\frac{\iint\limits_{S_2}\rho\vec{v}\,\vec{n}dS}{S_2} \tag{1.25}$$

Из уравнений (1.24) и (1.25) получим уравнение неразрывности в интегральной форме

$$M=(\rho v)_{cp1}\cdot S_1=(\rho v)_{cp2}\cdot S_2=\ldots=(\rho v)_{cpi}\cdot S_i=const \tag{1.26}$$

В случае, когда плотность не меняется по сечению, имеем

$$M=\rho_1 v_1 S_1=\rho_2 v_2 S_2=\ldots=\rho_i v_i S_i=const \tag{1.27}$$

где $v_1=v_{cp1}$, $v_2=v_{cp2}$ и т.д.

Для несжимаемой жидкости

$$Q=v_i S_i=const \tag{1.28}$$

Уравнения (1.26)-(1.28) служат для определения скоростей жидкости и площадей сечений каналов.