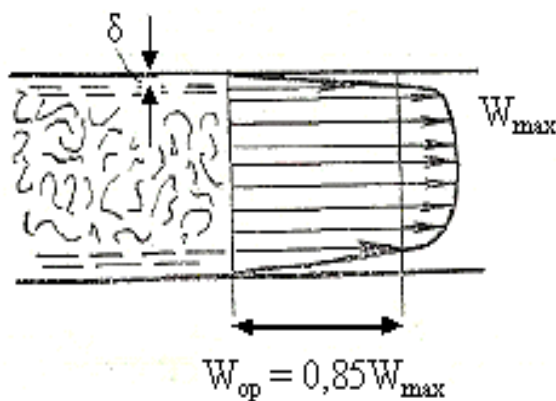


## Лекция 11 «Турбулентное движение жидкости. Плёночное течение жидкостей»

**Цель:** Дайте характеристику турбулентному движению жидкости. Опишите плёночное течение жидкостей. Охарактеризуйте основные режимы движения плёнки.

**Краткий конспект лекции:** Турбулентное движение жидкости. В промышленной практике наиболее распространено турбулентное движение жидкостей.

При турбулентном движении из-за хаотического движения частиц происходит выравнивание скоростей в основной массе потока и их распределение по сечению трубы характеризуется кривой, отличающейся по форме от параболы на рис. 2, лекция 10; кривая имеет значительно более широкую вершину (рис. 1).



**Рис. 1.** Распределение скоростей при турбулентном режиме движения жидкости

Условно различают центральную зону, или основную массу жидкости, называемую ядром потока, в которой движение является развитым турбулентным, и гидродинамический пограничный слой вблизи стенки, где происходит переход турбулентного движения в ламинарное. Внутри этого слоя имеется тонкий подслой (у стенки трубы) толщиной  $\delta$ , где силы вязкости оказывают превалирующее влияние на движение жидкости. Поэтому характер ее течения в подслое в основном ламинарный. Градиент скорости в ламинарном пограничном подслое очень высок, причем у самой стенки скорость равна нулю.

Между ядром потока и ламинарным подслоем существует переходная зона, причем ламинарный подслой и эту зону иногда называют гидродинамическим пограничным слоем.

Опыт показывает, что средняя скорость при турбулентном движении не равна половине максимальной как для ламинарного движения, а значительно больше, причем  $w/w_{\max} = f(Re)$ . Например, при  $Re = 10^4$  скорость  $w = 0,8w_{\max}$ , а при  $Re = 10^8$  величина  $w = 0,9w_{\max}$ .

В связи со сложным характером турбулентного движения не представляется возможным строго теоретически получить профиль распределения скоростей и значение  $w/w_{\max}$ . Кроме того, при турбулентном потоке профиль скоростей (рис. 1) выражает распределение не истинных, а осредненных во времени скоростей.

В каждой точке турбулентного потока истинная скорость не остается постоянной во времени из-за хаотичности движения частиц. Ее мгновенные значения испытывают флуктуации, или нерегулярные пульсации, носящие хаотический характер.

Разность между истинной и осредненной скоростями называют мгновенной пульсационной скоростью и обозначают через  $\Delta w$ :

$$w = \bar{w} \pm \Delta w. \quad (1)$$

Понятие осредненной скорости  $\bar{w}$  не следует путать с введенным ранее понятием средней скорости  $w$ . Последнее представляет собой не среднюю во времени скорость в данной точке, а скорость, осредненную для всего поперечного сечения трубопровода.

Несмотря на кажущуюся беспорядочность изменение скоростей при турбулентном движении, значение осредненной скорости за достаточно большой промежуток времени остается постоянной. В этом смысле турбулентное движение может рассматриваться как квазистационарное [1-3].

### Плѐночное течение жидкостей

В ряде процессов химической технологии (абсорбция, ректификация, выпаривание) применяются аппараты, в которых жидкость движется по поверхности в виде тонких плѐнок. От характеристик течения плѐнок, их толщины и скорости движения зависит скорость этих процессов.

Гидродинамический режим определяется критерием Рейнольдса для плѐнки:

$$Re_{пл} = \frac{w d_{э\kappa\text{в}} \rho_{ж}}{\mu_{ж}}, \quad (2)$$

где  $w$  – средняя скорость движения плѐнки;  $d_{э\kappa\text{в}}$  – эквивалентный диаметр плѐнки.

Эквивалентный диаметр плѐнки толщиной  $\delta$  определяется площадью сечения плѐнки  $S = \Pi \delta$  и периметром  $\Pi$  поверхности, по которой движется плѐнка:

$$d_{э\kappa\text{в}} = \frac{4S}{\Pi} = 4\delta. \quad (3)$$

При движении плѐнки по внутренней поверхности трубы  $\Pi = \pi d$ , где  $d$  – внутренний диаметр.

Подставив значение эквивалентного диаметра в выражение для  $Re_{пл}$ , получим:

$$Re_{к} = \frac{w 4\delta \rho_{ж}}{\mu_{ж}}. \quad (4)$$

Из-за трудности измерения толщины и скорости движения плѐнки удобнее использовать в расчѐтах произведение  $w \delta \rho_{ж}$ , входящее в выражение для  $Re_{пл}$ . Это произведение может быть записано в виде

$$\Gamma = \frac{w\Pi\delta\rho_{жс}}{\Pi} = \frac{wS\rho_{жс}}{\Pi}, \quad (5)$$

Величину  $\Gamma$  [кг/(м·с)] называют линейной массовой плотностью орошения. Она представляет собой массу жидкости, проходящей в единицу времени через единицу длины периметра поверхности, по которой течёт плёнка. При подстановке  $\Gamma = w\delta\rho_{жс}$  в выражение  $Re_{пл}$  получают следующее выражение критерия Рейнольдса для плёнки:

$$Re_{пл} = \frac{4\Gamma}{\mu_{жс}}. \quad (6)$$

Опытным путем установлено наличие трех основных режимов движения плёнки:

- 1) ламинарное безволновое (гладкое) течение плёнки с гладкой поверхностью раздела с газом ( $Re_{пл} < \sim 12$ );
- 2) ламинарное с волнистой поверхностью раздела фаз ( $\sim 12 < Re_{пл} < \sim 1600$ );
- 3) турбулентное течение плёнки ( $Re_{пл} > \sim 1600$ ).

При стекании плёнки жидкости по внутренней поверхности вертикальной трубы, по которой противотоком к жидкости т.е. снизу вверх, движется поток газа (пара), скорость плёнки и её толщина не зависят от скорости газа до тех пор, пока эта скорость достаточно мала. При увеличении скорости газа до 5-10 м/с достигается равновесие между силой тяжести, под действием которой движется плёнка и силой трения у поверхности пленки, тормозящей её движение. Это приводит к захлебыванию аппарата. Оно сопровождается накоплением жидкости в аппарате, её выбросом и резким повышением гидравлического сопротивления. Противоточное движение фаз при скоростях выше точки захлебывания невозможно. Поэтому точка захлебывания соответствует верхнему пределу скорости для противоточных процессов в аппаратах любых типов.

При дальнейшем увеличении скорости газа в вертикальной трубе или аппарате движение пленки жидкости обращается, и она начинает «всползать» снизу вверх. Наступает режим восходящего прямотока газа и жидкости. При увеличении скорости газа выше 15-40 м/с начинается брызгонос, при котором жидкость отрывается от поверхности пленки и уносится в виде брызг.

В случае движения сверху вниз (нисходящий прямоток) газ увлекает плёнку жидкости, увеличивая скорость плёнки и уменьшая её толщину. При одних и тех же скоростях газа гидравлическое сопротивление для нисходящего потока ниже, чем для восходящего. Устойчивый режим нисходящего прямотока существует при скоростях газа около 15-30 м/с. Выше которых происходит брызгонос [1-3].

### Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте характеристику турбулентному движению жидкости.
2. Опишите плёночное течение жидкостей.
3. Охарактеризуйте основные режимы движения плёнки.

### Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазак 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.