

Лекция 1 «Силы, действующие в жидкости»

Цель: Приведите общие сведения о гидравлике. Опишите молекулярную структуру рабочих сред. Охарактеризуйте силы, действующие в жидкости. Приведите единицы измерения давления.

Краткий конспект лекции: Общие сведения по гидравлике. *Гидравлика* – это наука, изучающая законы равновесия и движения различных жидкостей (не только воды, где *hydravlikos* (греч.) – водяной). В гидравлике обычно используют гидромеханические методы, поэтому иногда ее называют прикладной (технической) гидромеханикой. За последние десятилетия наблюдается сближение теоретической и прикладной гидромеханики: с одной стороны, теоретическая гидромеханика все больше обращается к эксперименту, с другой – методы гидравлического анализа становятся более строгими. Поэтому зачастую бывает трудно провести границу между этими двумя науками (точнее, между этими двумя методами, используемыми в любой области механики жидкости).

Гидравлику подразделяют на *гидростатику* (законы равновесия жидкостей в состоянии покоя) и *гидродинамику* (законы движения жидкостей). При этом принято объединять жидкости, газы и пары под единым наименованием – *жидкости*, поскольку при скоростях потоков, значительно меньших, чем скорость звука, законы движения жидкостей без существенных поправок справедливы для газов и паров. Поэтому в дальнейшем под жидкостями будем понимать все вещества, обладающие *текучестью*.

В гидромеханике при выводе основных законов используют понятие так называемой *идеальной жидкости*, под которой (в отличие от реальной) подразумевают жидкость, абсолютно несжимаемую, не изменяющую своей плотности под действием температуры и давления и не обладающую вязкостью.

Реальные жидкости подразделяют на *капельные* и *упругие* (газы или пары). Капельные жидкости можно считать практически несжимаемыми, они обладают относительно малым коэффициентом объемного расширения.

Молекулярная структура рабочих сред. Вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях – твёрдом, жидком и газообразном. Агрегатное состояние вещества определяется особенностями атомно-молекулярной структуры тел и силами взаимодействия между молекулами. На некотором расстоянии $r = r_0$ сила взаимодействия между молекулами равна нулю (рис. 1).

Если $r < r_0$, то сила взаимодействия проявляется как сила отталкивания, если $r > r_0$, то сила взаимодействия проявляется как сила притяжения (см. рис. 1).

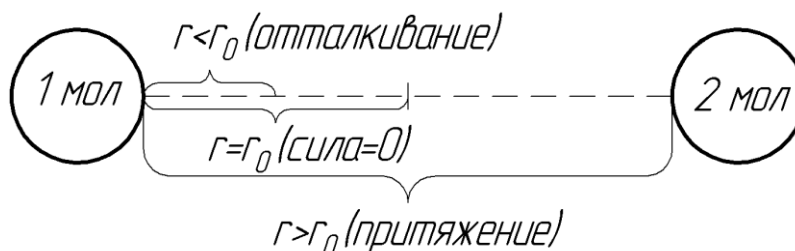


Рис. 1. Схема межмолекулярного взаимодействия

В твёрдых телах молекулы располагаются на расстояниях, примерно равных расстоянию r_0 (см. рис. 1), и образуют кристаллическую решётку. Молекулярные движения представляют собой колебания молекул относительно центров в жесткой решетке. Благодаря этому твёрдые тела сохраняют объём и форму.

В газах при нормальных условиях межмолекулярные расстояния велики, а силы притяжения малы. Каждая молекула испытывает слабое воздействие со стороны других. Это позволяет в теории пренебречь силами взаимодействия между ними. Модель газа, в которой пренебрегают межмолекулярным взаимодействием, называют совершенным газом. Молекулы совершенного газа движутся прямолинейно и равномерно до столкновения друг с другом. Благодаря свободному движению молекул газ может неограниченно расширяться во все стороны и принимать форму сосуда, в котором он заключён.

Жидкости по молекулярному строению занимают промежуточное положение между твёрдым телом и газом. Молекулы жидкостей расположены почти так же плотно, как в твёрдом теле (расстояния между молекулами соизмеримы с размерами молекул). Жидкости, как и твёрдые тела, устойчиво сохраняют занимаемый объём.

В твёрдых телах и жидкостях существует «свободный» объём W_F , равный разности объёма тела W и собственно объёма его молекул W_0 . Их отношение называют коэффициентом упаковки:

$$K = \frac{W_0}{W}.$$

Для твёрдых тел коэффициент упаковки $K = 0,625$, для жидкостей – $K = 0,5$.

Структуру жидкостей можно представить в виде множества определённым образом организованных молекулярных комплексов (роёв), совершающих тепловое движение. Между комплексами спонтанно возникают и исчезают микропустоты. Образование и размеры микропустот в жидкости определяются уровнем ее внутренней энергии, которая зависит от температуры T и давления p , поэтому существует зависимость «свободного» объёма от давления и температуры

$$W_F = f(p, T).$$

При очень высоких давлениях жидкости ведут себя подобно аморфному твёрдому телу, а при очень высоких температурах подобно сильно сжатому газу.

Если на границе жидкости приложена сдвигающая касательная сила, то возникает течение в направлении действия силы. Для большинства жидкостей эта сила может быть сколь угодно малой. В этом проявляется основное физическое свойство жидкости – текучесть.

Силы, действующие в жидкости

Выделим в жидкости некоторый объём W , ограниченный поверхностью S (рис. 2). В общем случае на него будут действовать две группы сил:

1. Массовые (объемные) – силы, величина которых пропорциональна массе (объему) жидкости. Они приложены к каждой материальной частице M выделенного объема. К массовым силам относят силы тяжести, инерции, электромагнитные силы.

2. Поверхностные – силы, величина которых пропорциональна площади поверхности выделенного объема жидкости. Это те силы, которые действуют на поверхность рассматриваемого объема со стороны окружающей его жидкости. По отношению к рассматриваемому объему поверхностные силы являются внешними. К поверхностным силам относят силы давления и трения.

Рассмотрим элементарную площадку ΔS на поверхности S выделенного объема W (см. рис. 2).

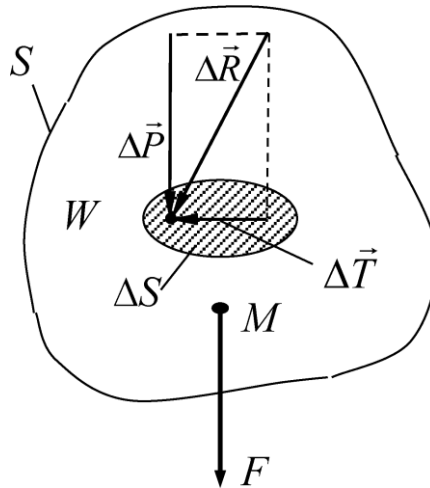


Рис. 2. Схема действия поверхностных сил

На эту площадку будет действовать поверхностная сила $\Delta \vec{R}$, которая может быть разложена на две составляющие: $\Delta \vec{P}$ – нормальная составляющая; $\Delta \vec{T}$ – касательная составляющая.

Нормальная составляющая поверхностной силы $\Delta \vec{P}$ может быть направлена в сторону внешней нормали к поверхности, тогда это растягивающая сила (рис. 3).

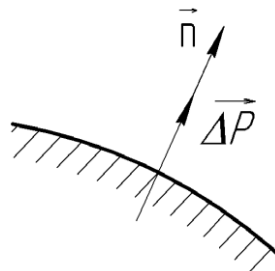


Рис. 3. Нормальная растягивающая сила

Сила $\Delta \vec{P}$ может быть направлена в сторону внутренней нормали, тогда это сжимающая сила – сила давления (рис. 4).

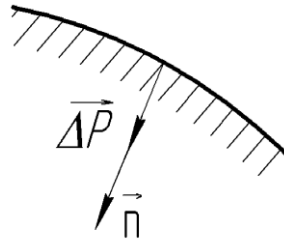


Рис. 4. Нормальная сжимающая сила

Физическая величина, являющаяся пределом отношения нормальной сжимающей силы к площади, на которую она действует, при стягивании этой площади в точку, называется давлением в точке:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}.$$

При равномерном распределении нормальной сжимающей силы P по поверхности, на которую она действует, давление определяется как

$$p = \frac{P}{S}.$$

Таким образом, давление представляет собой нормальное сжимающее напряжение.

В системе СИ давление измеряется в Паскалях

$$[p] = 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

килопаскалях

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$$

или мегапаскалях

$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}.$$

На практике давление часто измеряют в технических атмосферах:

$$1 \text{ ат} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}.$$

Связь между этими единицами измерения можно установить из выражения для силы тяжести:

$$\begin{aligned} G &= mg; \\ 1 \text{ кгс} &= 1 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 = 9,8 \text{ Н}; \\ 1 \text{ ат} &= 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 \approx 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}; \\ 1 \text{ МПа} &\approx 10 \text{ ат}. \end{aligned}$$

Атмосфера – внесистемная единица измерения давления, приблизительно равная атмосферному давлению на поверхности Земли на уровне Мирового океана. Существуют две примерно равные друг другу единицы с таким названием:

1. Стандартная, нормальная или физическая атмосфера (атм) – в точности равна 101325 Па или 760 миллиметрам ртутного столба. Это давление, уравновешиваемое столбом ртути высотой 760 мм при температуре $t = 0^\circ \text{C}$, плотности ртути 13595,1 кг/м³ и нормальном ускорении свободного падения 9,80665 м/с².

2. Техническая атмосфера (ат, кгс/см²) – равна давлению, производимому силой от массы в 1 кг при ускорении g (т.е. 1 килограмм-сила, кгс), которая направлена перпендикулярно и равномерно распределена по плоской поверхности площадью 1 см² (98066,5 Па).

Таблица 1 – Единицы измерения давления

	Паскаль	Бар	Техн. атм.	Физ. атм.	мм рт.ст.	м вод.ст.
	Па	бар	ат	атм	мм рт.ст.	м. вод.ст.
1 Па	1 Н/м²	10 ⁻⁵	1,0197·10 ⁻⁵	9,8692·10 ⁻⁶	7,5006·10 ⁻³	1,019·10 ⁻⁴
бар	10 ⁵	10⁵ Н/м²	1,0197	0,98692	750,06	10,197
1 ат	98066,5	0,980665	1 кгс/см²	0,96784	735,56	10
1 атм	101325	1,01325	1,033	1 атм	760	10,33
1 мм рт.ст.	133,321	1,3332·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	1 мм рт.ст.	13,595·10 ⁻³
1 м вод.ст.	9806,65	9,80665·10 ⁻²	0,1	0,096784	73,556	1 м вод.ст.

Жидкости способны воспринимать практически сколь угодно большие сжимающие напряжения. Жидкости могут воспринимать и растягивающие напряжения, но при отсутствии в них растворенных газов или паров жидкости. Так, например, при вращении капиллярной трубки, в которой находится химически чистая деаэрированная жидкость (рис. 5), она не выбрасывается в обе стороны капилляра вплоть до достижения значительных растягивающих напряжений (280 кгс/см²). Это свидетельствует о способности жидкости воспринимать растягивающие напряжения при отсутствии в ней газа.

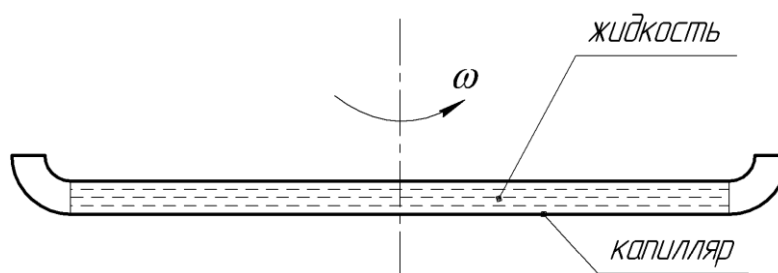


Рис. 5. Схема испытаний жидкости на растяжение

При наличии в реальной жидкости твердых и газообразных микровключений ее сопротивляемость растягивающим напряжениям резко снижается. В гидравлических расчётах полагают, что нарушение сплошности жидкости происходит при снижении давления в ней до давления насыщенных паров (давления парообразования) p_d при данной температуре. Абсолютное давление насыщенных паров зависит от температуры и принимается, как наименьшее возможное давление в сплошных жидкостях. В тех зонах потока, где давление падает до величины p_d , возникает особое состояние жидкости, которое сопровождается местным образованием пузырьков, заполненных парами жидкости и газа. Явление холодного вскипания жидкости называется кавитацией.

Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите общие сведения о гидравлике.
2. Опишите молекулярную структуру рабочих сред.
3. Охарактеризуйте силы, действующие в жидкости.
4. Приведите единицы измерения давления.

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. – 40 экз.
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.
4. Вайсман Н.М. Механика жидкости и газа. Гидравлика: учеб. пособие / Н.М. Вайсман, В.А. Голиков, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 222 с.