



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 1. Основные понятия и определения

воскресенье, 21 апреля 2019 г.



Как известно, ядерные энергетические реакторы работают при высоких плотностях теплового потока и удельных мощностях. Характерными особенностями таких устройств являются относительное постоянство и независимость теплового потока от интенсивности отдачи тепла к теплоносителю.



Если охлаждение тепловыделяющих элементов ядерно-энергетической установки осуществляется недостаточно интенсивно, теплообменные поверхности перегорают. В связи с этим интересен вопрос к вопросам отвода тепла, осуществляемого с помощью прокачиваемой жидкости (теплоносителя), подвергающейся воздействию большого числа факторов.



Часть из этих факторов представляет интерес с точки зрения безопасности. Применяемые в ядерном реакторостроении материалы рассматриваются прежде всего с учетом характера напряженного состояния деталей конструкции реактора, на которые воздействуют высокие рабочие ограничения, устанавливаемых в отношении этих материалов.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

В большинстве ядерных реакторов выделившееся тепло отводится протекающей через реактор жидкостью. В связи с этим важное значение приобретает умение правильно рассчитать оптимальный перепад давления в системе и определить необходимую величину мощности на прокачку.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При этом совершенно необходимо, чтобы теплоноситель правильно распределялся среди многочисленных параллельных каналов, обычно предусматривающихся в реакторе.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Необходимо знать влияние всех возможных изменений в режиме на поток теплоносителя, с тем чтобы обеспечить при заданных условиях экономичность, надежность и долговечность, а также при любых условиях и минимум опасности при работе реактора. Для этого требуется знание гидравлики многофазных жидкостей.

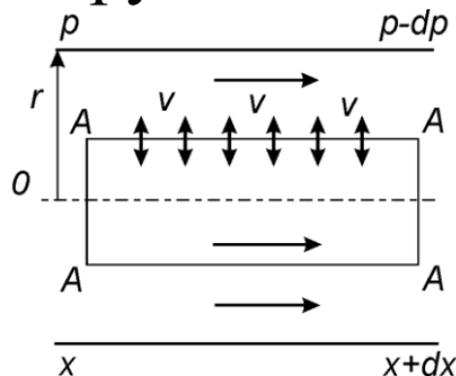


ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Вязкость. Для установившегося горизонтального потока жидкости по трубе необходим соответствующий

градиент $\frac{dp}{dx}$.





ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

В этом случае на жидкость в цилиндре радиусом r и длиной dx действует в направлении потока результирующая осевая сила $\frac{\pi r^2}{dP}$. Она уравновешивается равной и противоположной по направлению касательной силой на поверхности цилиндра



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

$$\tau = \frac{\pi r^2 dP}{2\pi r dx} = \frac{r dP}{2 dx}. \quad (1.1)$$

Понятие жидкости как вещества, в котором молекулы свободно перемещаются относительно друг друга, предполагает отсутствие в ней касательных усилий.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Тем не менее в неподвижной или ламинарно текущей жидкости имеет место постоянное хаотическое, но несвободное перемещение отдельных молекул. В турбулентных потоках жидкостей большие группы молекул, так называемые «вихри», также беспорядочно перемещаются на значительные расстояния.

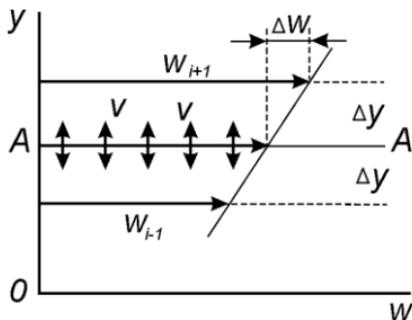


ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Когда отдельные молекулы или группы молекул жидкости перемещаются перпендикулярно потоку из медленно текущей струи к более быстрой, они передают ей импульс торможения, и наоборот. Движение молекул, или вихрей, пересекающих поток через поверхность, параллельную потоку, создает, таким образом, касательные напряжения на этой поверхности.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ



Обозначим через V среднюю скорость, перпендикулярную направлению потока по всей поверхности $A - A$.

Предположим, что молекулы в среднем перемещаются на расстояние Δy перпендикулярно $A - A$, передавая разницу в осевой скорости соседним с ними молекулам.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Если $\frac{dW}{dy}$ – постоянная величина в пределах Δy , то молекулы, начинающие свое движение где-нибудь в пределах Δy , будут передавать при пересечении A – A в среднем определенную величину относительного количества движения в осевом направлении.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При этом касательные напряжения по A
– A будут

$$\tau = \frac{\nu \rho \Delta w}{g_c} = \frac{\nu \rho \Delta y}{g_c} \frac{dw}{dy}, \quad (1.2)$$

g_c – безразмерное отношение F/ma единицы силы к единице произведения массы на ускорение ma , определенное для применяемой системы единиц. Для любой «абсолютной» системы единиц $g_c = 1$.
 Δy – средний пробег молекул.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Когда турбулентность отсутствует,
произведение $\nu r \Delta y$ означает вязкость μ
жидкости и выражение

$$\tau = \frac{\mu}{g_c} \frac{dw}{dy}, \quad (1.3)$$

является ее определяющим уравнением.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Любая жидкость, для которой μ не
меняется с изменением τ или $\frac{dw}{dy}$,

называется «ньютоновской».

Интегрируя уравнение (1.3) с учетом
граничных условий для конкретного
устройства, можно получить вязкость по
размерам этого устройства, скорости
жидкости и приложенному перепаду
давления.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Наоборот, зная размеры трубопровода, вязкость и расход жидкости в ламинарном потоке, можно определить необходимый перепад давления. При определении перепадов давления в турбулентном потоке также необходимо знать вязкость жидкости.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Единицей вязкости в системе CGS является пуаз, или грамм-масса на сантиметр в секунду.

Вязкость газов. Для любого газа произведение $\rho \Delta u$ в уравнении (1.2), постоянное при сравнительно небольших плотностях av , изменяется только с температурой.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Таким образом, вязкость газов при нормальных давлениях, вплоть до 10% критического, не зависит от давления и касательных напряжений. Поправку на вязкость при низких давлениях для различных температур можно получить различными способами.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Для быстрой приближенной интерполяции можно предположить, что вязкость в зависимости от температуры в двойном логарифмическом масштабе изменяется линейно.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Для экстраполяции до высоких температур или для интерполяции внутри большого интервала при температуре, значительно превышающей критическую, широко распространено эмпирическое уравнение Сутерленда

$$\mu = \frac{BT^{3/2}}{T + C}. \quad (1.4)$$



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Величины B и C для газов или для смеси газов можно вычислить, если известна их вязкость при двух или более температурах.

Значения B и C для газов, которые могут использоваться в ядерной энергетике, приводятся в литературе



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Например

Значения экспериментальных констант B и C для вязкости газов при низком давлении из формулы Сутерленда [см. уравнение (1.3)]

Газ	Температура, °К	$B, \times 10^{-4}, \text{пз} \cdot \text{°К}^{-1/2}$	$C, \text{°К}$
Азот	500—1693	0,1405	109,08
Воздух	289—1833	0,1460	109,58
Аргон	569—1868	0,19071	135,38
Двуокись углерода	553—1686	0,15237	219,44
Кислород	273—1100	0,1700	126,8
Водород	252—575	0,06415	71,7
Гелий	288—458	0,1464	80,3



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При вычислении вязкости газа, состоящего из неполярных (сферических) молекул, можно использовать также интегралы столкновения Гиршфельдера.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Изменение низкого давления в небольших пределах слабо влияет на вязкость газа; последняя быстро возрастает лишь с ростом давления выше критического и особенно вблизи критической температуры.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Вязкость жидкостей. Когда молекулы жидкости или газа, испытывающие большое давление, находятся на небольшом расстоянии друг от друга, их средний свободный пробег мал и перенос количества движения, согласно уравнению (1.2), не является единственным фактором, определяющим вязкость.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При таких больших плотностях для проскальзывания молекул мимо соседних требуется наличие «дырки» и определенной энергии активации молекул E . Из распределения Максвелла – Больцмана следует, что количество молекул, обладающих энергией, равной или большей E , пропорционально $e^{-\frac{E}{RT}}$.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Таким образом, при данной плотности жидкости чем выше температура, тем меньше ее вязкость и тем большая доля молекул имеет энергию, необходимую для того, чтобы проникнуть в возможные дырки.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При данном давлении по мере увеличения температуры плотность жидкости уменьшается, количество дырок увеличивается и вязкость ее уменьшается.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Однако в какой-то момент молекулы жидкости будут отстоять достаточно далеко друг от друга, процесс передачи количества движения окажется преобладающим и с дальнейшим ростом температуры вязкость опять начнет увеличиваться.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Согласно другим представлениям, вязкость жидкости является суммой слагаемого, обусловленного передачей количества движения, и слагаемого, обусловленного прямыми межмолекулярными силами.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Имеется несколько методов
интерполирования или короткого
экстраполирования вязкости жидкостей
в зависимости от температуры по одной
или более известным величинам:



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

1. Зависимость p от t представляет собой плавную кривую с максимальным, порядка 1%, отклонением от прямой линии в практически используемых пределах и в интервале, равном 20° С. В этом случае линейная интерполяция допускается лишь в небольших интервалах температур.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

2. Зависимость текучести жидкости $1/\mu$ от t близка к линейной в значительных интервалах температур, что делает возможным интерполяцию и экстраполяцию в сравнительно больших интервалах температур.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

3. Правило Дюринга вполне применимо к вязкости жидкостей, особенно для жидкостей, близких по своим свойствам. В сравнительно больших интервалах температур, при которых обе жидкости имеют одинаковую вязкость, зависимость температуры одной жидкости от температуры другой, линейна.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

4. Уравнение Аррениуса

$$\mu = A e^{\frac{E}{RT}}. \quad (1.5)$$

Здесь E – энергия активации образования дырки;

A зависит от молекулярного веса и молярного объема и равняется 0,0003 Пз для многих несвязанных жидкостей;



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

E составляет $1/3$ скрытой молярной теплоты парообразования для несвязанных жидкостей и $1/4$ — для несимметричных молекул. Для жидких металлов E составляет только 4 – 12 % теплоты парообразования.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

График зависимости $\lg \mu$ от $1/T$ представляет собой прямую линию в тех областях температур, где E постоянно, и применяется для интерполяции или экстраполяции при двух или более известных значениях μ и t .



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Существует еще целый ряд способов интерполяции и близкой экстраполяции зависимости вязкости жидкости от температуры, при необходимости их можно найти в литературе.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Не менее важна зависимость вязкости от давления, хотя она и не так сильно выражена, как в случае с температурой. Повышение давления увеличивает вязкость жидкостей, хотя сравнительно менее сильно, чем вязкость газов.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Для большинства органических жидкостей вязкость увеличивается экспоненциально, а зависимость $\log \mu$ от давления — линейно. Для нефтяных масел, чтобы увеличить их вязкость в два раза, надо повысить давление приблизительно до 210 атм при комнатной температуре и до 420 атм при 100° С.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Для меньших молекул органических веществ давление придется повысить до 1055 атм. Зависимость μ от давления для аммиака тем не менее будет линейной, а для воды – очень незначительной. Во всех случаях при давлении ниже критического изменения вязкости очень небольшие.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При давлении и температуре выше критических можно применять методы, разработанные для газов.

Так как средний свободный пробег молекул в жидкости подобно Δy в уравнении (1.2) весьма мал, то неоднородность градиента скорости на вязкость не влияет.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Вязкость смеси жидкостей является промежуточной между вязкостями ее составных частей.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Свойства потока суспензий. Свойства суспензий интересны с точки зрения возможности использования их в реакторах, в которых активная зона представляет собой суспензию замедлителя с топливом или с элементами для получения вторичного топлива, находящимися в жидкости во взвешенном состоянии, и т.д.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Разбавленные суспензии твердых частиц близки к ньютоновским жидкостям и подчиняются уравнению Эйнштейна

$$\frac{\mu_{\text{сусп}}}{\mu_{\text{среды}}} = 1 + 2,5C \quad (1.6)$$

вплоть до объемной концентрации твердых частиц C порядка 0,55.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Твердые тела и более концентрированные суспензии требуют приложения определенных касательных напряжений ту для своего движения. Следовательно, эти вещества не являются жидкостями. Они часто называются пластическими веществами.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Пластические суспензии, приближающиеся к идеальному прямолинейному режиму, называются «*телами Бингхема*». Отношение касательного напряжения к градиенту скорости в любой точке на кривой касательных напряжений вещества есть «*эффективная вязкость*» μ' в этой точке.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Дополнительные трудности появляются с неньютоновскими веществами. В экспериментальных установках величина касательных напряжений неодинакова, в связи с чем средняя вязкость представляет собой интегральную величину, полученную на всем интервале касательных напряжений.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Плотность жидкостей. Важным параметром при определении скорости потока, трения при турбулентном течении, поглощения излучения в ядерном реакторе является плотность жидкостей.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Достаточно точные значения плотности газа обычно можно получить, используя законы для идеального газа, приняв «коэффициент сжимаемости» PV/RT равным 1. Но вблизи критической точки плотность газа очень сильно изменяется с изменением температуры и давления.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Для жидкостей с очень низкими критическим давлением и температурой плотность можно получить из любых ее действительных величин при помощи интерполяции или экстраполяции.

Увеличение давления вызывает линейное увеличение логарифма плотности. увеличения температуры более сложное. Это влияние



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Влияние увеличения температуры более сложно. Это влияние можно учесть при помощи зависимости коэффициента расширения Ватсона ω от приведенных температуры и давления. Отношение ρ/ω при данном давлении не зависит от температуры. Его необходимо знать только для задаваемого давления.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Особый интерес представляет тепловое расширение жидкости, так как при естественной конвекции оно является ее движущей силой. Коэффициент $\frac{dV}{Vdt}$ принимается равным $\frac{d\rho}{\rho dt}$, а, используя уравнение состояния для идеального газа, его можно принять равным $1/T$.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Давление пара и поверхностное

натяжение. Если ядерный реактор специально не оборудован, то допускать в нем кипение нежелательно.

Следовательно, давление паров в ядерном реакторе должно представлять определенный интерес.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Знание давления пара P жидкости при двух или более температурах дает возможность экстраполировать или интерполировать значения давлений на небольшом участке температур, если построить график зависимости $\log P$ от $1/T$. При этом можно предположить, что в значительном интервале температур график будет иметь вид прямой линии.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Натяжение на границе раздела двух жидкостей принято измерять для всех поверхностей. Оно имеет размерность энергии, отнесенной к единице площади, или силы к единице длины и обуславливает подъем уровня жидкости или его падение в капиллярах и щелях, а также размеры капельки и ее форму в капельных и распылительных устройствах.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Натяжение уменьшается с увеличением температуры, тогда как давление на него оказывает меньшее влияние. Кроме того, натяжение сильно уменьшается из-за наличия примесей при их концентрации на поверхности раздела.



ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

На него мало влияют те примеси, которые увеличивают натяжение на поверхности раздела двух фаз, увеличивая соответственно и энергию на единицу поверхности. Когда одна из двух фаз газообразная, применяют выражение «*поверхностное натяжение*».