

## ЛЕКЦИЯ 6

### 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

Использование уравнения Бернулли для решения одномерных задач гидромеханики вязкой жидкости возможно, только установив зависимости для расчета потерь напора  $\sum h_n$ , связывающих величину этих потерь с основными характеристиками потока. Возникновение потерь напора физически обусловлено действием в потоке сил сопротивления. Механизм действия этих сил настолько сложен, что до настоящего времени не удалось найти точного метода вычисления  $\sum h_n$ . В технических расчетах чаще всего приходится пользоваться эмпирическими или полуэмпирическими зависимостями. Точное теоретическое решение задачи удается найти только для простейших частных случаев.

#### 2.1. Виды гидравлических сопротивлений.

При течении в трубах, каналах поток претерпевает значительные деформации, вызывающие такое неравномерное распределение скоростей, которое приводит к появлению вязкостных напряжений, что в свою очередь обуславливает диссипацию энергии. Во многих случаях течение сопровождается перемешиванием слоев жидкости и отрывом потока от стенок с образованием вихревых зон, что влияет на распределение и величину напряжений, и, следовательно, и на потери напора.

Во внутренней задаче гидромеханики все внешние воздействия на поток жидкости, которые обуславливают потери ее механической энергии, называют гидравлическими сопротивлениями. С точки зрения расчета гидравлические сопротивления удобно разделить на два вида: сопротивления и связанные с ними потери напора, распределенные по всей длине потока  $h_{тр}$  (*потери напора на трение или сопротивление гидравлического трения*), и сопротивления местные  $h_m$  (*мест-*

ные потери напора или потери напора на местные сопротивления). В связи с этим потери напора  $\sum h_n$  можно представить в виде:

$$\sum h_n = h_{тр} + h_m \quad (2.1)$$

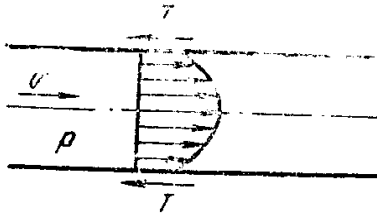


Рис.2.1. Потери напора на трение

Сущность этих двух видов потерь поясним на примерах. Рассмотрим установившийся поток жидкости в круглой цилиндрической трубе (рис.2.1). При движении жидкости между нею и стенками трубы возникают силы сопротивления, в результате чего частицы жидкости, прилегающие к стенке, тормозятся.

Это торможение вследствие вязкости жидкости передается следующим слоям, причем скорость частиц по мере удаления от оси трубы постепенно уменьшается.

Равнодействующая сил сопротивления  $T$  направлена в сторону, противоположную движению. Это и есть сила гидравлического трения.

Для преодоления сопротивления трения и поддержания равномерного поступательного движения жидкости, необходимо, чтобы на жидкость действовала сила, направленная в сторону ее движения и равная силе сопротивления. Необходи-

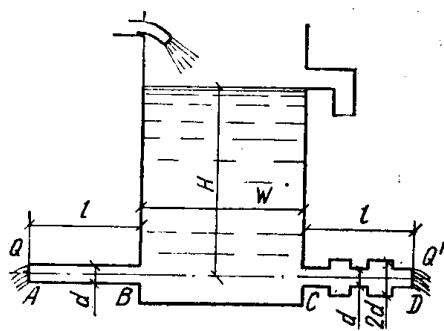


Рис.2.2. Местные потери

димум для преодоления сил сопротивления энергию или напор называют потерянной энергией или потерями напора.

Однако потери напора, возникающие при движении жидкости, зависят не только от трения о стенки. Пусть жидкость вытекает из бака (рис.2.2) объемом  $W$  при постоянном объеме  $H$  по горизонтальной трубе

$AB$  длиной  $l$  одинакового диаметра  $d$ . Пусть расход воды равен  $Q$ . Если трубу  $AB$  заменить трубой  $CD$  той же длины  $l$ , но образованной из последовательно расположенных участков диаметрами  $d$  и  $2d$ , то расход изменится. Новый расход  $Q' < Q$ .

Таким образом, резкое изменение сечения также оказывает сопротивление движению жидкости и вызывает потери напора. Существуют и другие причины, вызывающие такие потери, например, внезапное изменение направления движения жидкости. Потери напора, вызванные резким изменением конфигурации границ потока (затрачиваемые на преодоление сопротивления формы), называются местными потерями напора или потерями напора на местные сопротивления.

При расчете потерь напора широко используется принцип наложения потерь. В соответствии с этим принципом предполагается, что отдельные виды сопротивлений возникают независимо друг от друга и определяются только местными, осредненными характеристиками потока. Применяя этот принцип, можно величину  $\sum h_n$  для всего потока определить как сумму потерь по длине на отдельных его участках и сумму местных потерь, т.е.

$$\sum h_n = \sum_{i=1}^m h_{mp_i} + \sum_{k=1}^n h_{m_k} \quad (2.2)$$

Определение потерь напора при движении жидкости является одной из важнейших задач гидравлики. В XIX веке эмпирическим путем были получены формулы для их определения .

Потери напора на трение определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления трения.

Потери напора на местные сопротивление определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2.4)$$

где  $\zeta$  - коэффициент местного сопротивления.

Формулы (2.3) и (2.4) можно получить аналитическим путем.

## 2.4. Режимы движения жидкости. Число Рейнольдса.

Для правильного определения величины потерь напора не гидравлические сопротивления, прежде всего необходимо составить ясное представление о механизме самого движения жидкости. При исследовании этого вопроса оказалось, что в природе существуют два различных, резко отличающихся вида движения жидкости. Это было известно еще в первой половине XIX века, но со всей очевидностью наличие двух режимов течения жидкости было подтверждено в 1883

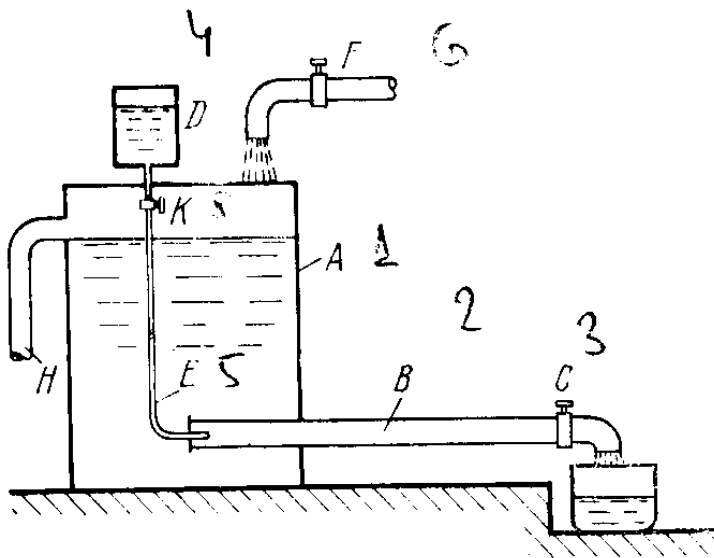


Рис. 2.4. Установка Рейнольдса

году в результате весьма простых и наглядных опытов английского физика О. Рейнольдса.

В опытной установке Рейнольдса к баку 1 присоединена стеклянная труба 2, снабженная краном 3 (рис.2.4). Над баком устанавливается бачок 4 с окрашенной жидкостью, подаваемой в трубу по тонкой трубке 5 через кран 8. Бак заполняется водой из водопровода через трубу 6 и ее уровень поддерживается постоянным при помощи переливной трубы 7. Затем, открывая кран 3, в трубе 2 создается поток жидкости, а открывая кран 8 на трубке 5, в этот основной поток подается тонкая струйка окрашенной жидкости. Постепенно открывая кран 3, можно повышать

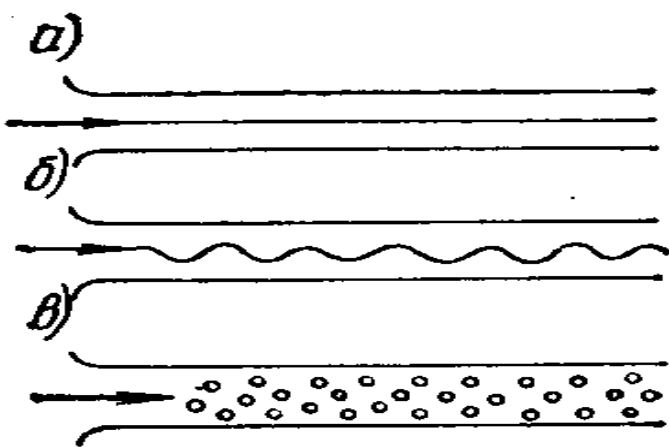


Рис 2.5 Виды движения жидкости

но открывая кран 3, можно повышать

расход , следовательно, скорость течения жидкости в трубе 2.

При небольших скоростях течения в трубе 2 окрашенная жидкость движется в виде отчетливо выраженной тонкой струйки (рис.2.5а), не смешиваясь с основным потоком воды; при повышении скорости течения окрашенная струйка начинает колебаться и принимает волнообразные очертания (рис.2.5б). Затем на отдельных ее участках начинают появляться разрывы, она теряет отчетливую форму и, наконец, при каком то определенном значении скорости полностью разрывается, целиком размываясь основным потоком жидкости (рис.2.5в). При этом отдельные частицы красящего вещества смешиваются со всей массой жидкости, равномерно ее окрашивая. При проведении опыта в обратном порядке, т.е. при постепенном закрытии крана 3, наблюдаемые явления повторяются в обратном порядке, но обычно при нескольких других значения скорости.

Движение жидкости при малых скоростях, когда отдельные струйки жидкости движутся параллельно оси потока, не перемешиваясь между собой (рис.2.5а), называется *ламинарным* (от латинского слова «ламина» - слой). Это течение без пульсации скоростей и давлений. В прямой трубе все линии тока направлены параллельно оси. Приборы для измерения давления и скорости жидкости, помещенные в поток, показывают неизменность давлений и скоростей во времени, отсутствие колебаний (пульсаций). Ламинарное течение является вполне упорядоченным и при постоянном напоре строго установившимся (хотя в общем случае может быть и неустановившимся). Однако его нельзя считать безвихревым, т.к. имеет место одновременно с поступательным вращательное движение отдельных частиц жидкости вокруг своих мгновенных центров.

Второй вид движения, наблюдаемый при больших скоростях, называется *турбулентным* («турбулентус» по-латински – вихревой). В этом случае (рис.2.5.в) в движении жидкости нет видимой закономерности. Отдельные частицы жидкости перемешиваются между собой и движутся по различным, все время изменяющимся траекториям. Приборы показывают непрерывные пульсации давления и скорости в потоке. При турбулентном течении векторы скоростей имеют не только осевые, но

и нормальные к оси трубы составляющие, поэтому наряду с основным, продольным перемещением жидкости вдоль трубы происходит поперечные перемещения (перемешивания) и вращательное движение отдельных объемов жидкости. Этим и объясняются пульсации скоростей и давлений.

Обобщив результаты опытов, а также исходя из некоторых теоретических соображений, Рейнольдс нашел общие условия, при которых возможны существование того или иного режима и переход от одного режима к другому. Оказалось, что режим течения жидкости в трубе зависит от безразмерного числа, которое учитывает основные факторы, определяющие это движение: среднюю скорость  $v$ , диаметр трубы  $d$ , плотность жидкости  $\rho$  и ее динамическую вязкость  $\mu$ . Это число, которое впоследствии стало называться *числом Рейнольдса*, имеет вид:

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu} = \frac{v d}{\nu}. \quad (2.16)$$

Этот результат согласуется с изложенными выше основами теории подобия, и вполне закономерно, что именно число Рейнольдса является критерием, определяющим режим течения жидкости. Диаметр  $d$  в числе Рейнольдса может быть заменен любым линейным размером, связанным с условием течения или обтекания. Для сечения любой формы необходимо диаметр заменить гидравлическим радиусом  $R_г$ .

Границы существования того или иного режима движения жидкости определяются двумя критическими значениями числа Рейнольдса - нижним  $Re_{кр.н}$  и верхним  $Re_{кр.в}$ . Значения скорости, соответствующие этим числам, также называют критическими. При  $Re < Re_{кр.н}$  возможен только ламинарный режим, а при  $Re > Re_{кр.в}$  - только турбулентный; при  $Re_{кр.н} < Re < Re_{кр.в}$  наблюдается неустойчивое состояние потока -(переходная область). В опытах самого Рейнольдса были получены следующие значения:  $Re_{кр.н} = 2000$ ,  $Re_{кр.в} = 12000$ . Многочисленные эксперименты показали, что критические числа Рейнольдса не являются постоянными величинами и в действительности неустойчивая зона может быть значительно шире. Критическое

число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного течения к турбулентному несколько выше, чем  $Re_{кр}$  для обратного перехода. В особых лабораторных условиях при полном отсутствии факторов, способствующих турбулизации потока, можно получить ламинарное течение при  $Re \gg Re_{кр}$ . Однако в этом случае ламинарное течение оказывается настолько неустойчивым, что достаточно небольшого возмущения, чтобы оно перешло в турбулентное. В настоящее время при расчетах принято исходить только из одного критического числа Рейнольдса для круглых цилиндрических труб  $Re_{кр} \approx 2300$ . При  $Re < 2300$  режим всегда считается ламинарным, при  $Re > 2300$  - всегда турбулентным, при этом движение жидкости в переходной зоне исключается из рассмотрения, что приводит к некоторому запасу и большей надежности в гидравлических расчетах.

Без особого труда можно получить значения  $Re$  для сечения любой формы. Зная, что при круговом сечении гидравлический радиус  $R_z = \frac{d}{4}$ , получим:

$$Re = \frac{4vR_z}{\nu} \quad (2.17)$$

В трубопроводах систем отопления, вентиляции, водоснабжения и др. движение, как правило, является турбулентным. Ламинарный режим возможен только в трубах очень малого диаметра, например, в капиллярах. Более вязкие жидкости, например минеральные масла в системах гидропривода, могут двигаться ламинарно даже в трубах относительно большого диаметра.