5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ.

5.1.Потери на трение при ламинарном течении в трубах.

При ламинарном течении эпюра распределения скоростей V по сечению потока носит параболический характер (рис.12,*а*) и описывается уравнением

$$V = \frac{\Delta p_{тр}}{4\mu l} \cdot (r_0^2 - r^2) \quad . \qquad (21)$$

где $\Delta p_{тр}$- потери давления на трение в трубе длиной l;

μ - динамическая вязкость жидкости;

r и r_0 - текущий радиус и радиус трубы.

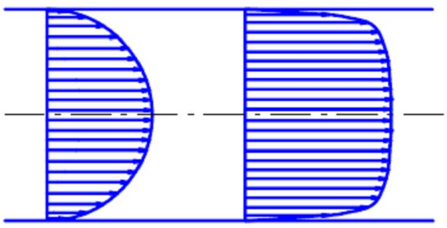

Рис. 12. Эпюры распределения скоростей.

Такой закон распределения скоростей определяет величину коэффициента Кариолиса для ламинарного режима течения $\alpha_л = 2$ (см. раздел 3.4). Кроме того, зависимость (21) позволяет найти соотношение максимальной V_{max} (на оси потока) и средней $V_{ср}$ скоростей: $V_{max} / V_{ср} = 2$.

Кроме того, формула (21) позволяет получить закон сопротивлений при ламинарном режиме течения (закон Пуазейля) в круглой трубе, т.е. зависимость потерь от расхода Q

$$\Delta p_{тр} = \frac{128 \cdot \nu \cdot l \cdot \rho}{\pi \cdot d^4} \cdot Q \qquad (22) \quad \text{или} \qquad h_{тр} = \frac{128 \cdot \nu \cdot l}{\pi \cdot g \cdot d^4} \cdot Q \ , \qquad (23)$$

где ν и ρ - кинематическая вязкость и плотность рабочей жидкости;

$h_{тр} = \Delta p_{тр}/\rho \cdot g$ - потери напора на трение в трубе.

Анализ зависимостей (22) и (23) позволяет сделать вывод, что при ламинарном режиме течения потери на трение пропорциональны расходу жидкости (рис.13).

Формула для вычисления коэффициента Дарси для ламинарного режима может быть получена из совместного решения уравнений (22) и (19), первое из которых справедливо только для ламинарного течения, а второе - при любом течении. Тогда, с учетом (20),

$$\lambda_л = 64 / Re . \qquad (24)$$

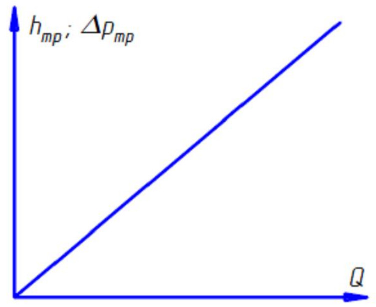

Рис. 13. Зависимость потерь от расхода.

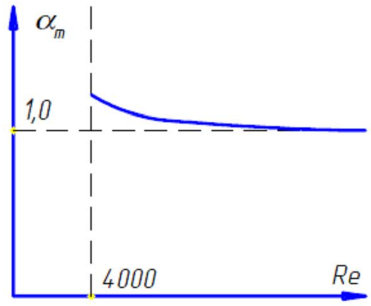

Рис. 14. Зависимость $\alpha_т$ от Re.

Таким образом, величина коэффициента Дарси при ламинарном режиме течения однозначно определяется числом Рейнольдса.

5.2. Потери на трение при турбулентном течении в трубах.

При турбулентном режиме течения из-за интенсивного вихреобразования и перемешивания слоев жидкости происходит выравнивание скоростей V по сечению потока. Поэтому эпюра распределения скоростей имеет характер трапеции со сглаженными вершинами (рис. 12,*б*), причем, при увеличении скоростей V (или чисел Рейнольдса Re) она все более приближается к виду прямоугольника. А коэффициент Кариолиса $\alpha_т$, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению, - к единице (рис.14). Следует отметить, что при решении практических задач принимают $\alpha_т = 1$.

Для вычисления величины потерь на трение при турбулентном течении используется формула Дарси (19). Но, в отличие от ламинарного режима, коэффициент $\lambda_т$ зависит не только от числа Рейнольдса, но и от шероховатости стенок трубы. Для определения этого коэффициента может быть использована эмпирическая формула Альтшуля

$$\lambda_т = 0{,}11 \cdot \sqrt[4]{\frac{68}{Re} + \frac{k}{d}} \;, \qquad (25)$$

где k - эквивалентная (средняя) высота бугорков шероховатости внутренних стенок трубы (выбирается по справочнику).

При турбулентном режиме течения выделяют три характерные области сопротивления.

Первая область - область гидравлически гладких труб, где коэффициент $\lambda_т$ от шероховатости не зависит, а определяется лишь числом Рейнольдса Re. Это объясняется тем, что при турбулентном режиме в трубе около стенки образуется вязкий (ламинарный) слой (из-за низких скоростей, см. рис. 12,*б*), и он скрывает бугорки шероховатости. В области гидравлически гладких труб величины Re имеют относительно небольшие значения. Поэтому в формуле (25) первое слагаемое $68/Re$ значительно больше второго k/d и последнее может быть отброшено. Тогда из формулы Альтшуля (25) получается формула Блазиуса

$$\lambda_т = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{Re}} \;. \qquad (26)$$

Подстановкой формулы Блазиуса (26) в формулу Дарси (19), с учетом выражения для числа Рейнольдса (20), можно показать, что в области гидравлически гладких труб потери на трения пропорциональны расходу в степени 1,75, т.е.

$$H_{тр} = K \cdot Q^{1,75},$$

где K - коэффициент пропорциональности.

Во второй области толщина вязкого (ламинарного) слоя уменьшается, и становиться соизмеримой с высотой бугорков шероховатости. Они начинают оказывать влияние на сопротивление. Коэффициент $\lambda_т$ в этой области зависит одновременно от числа Re и от относительной шероховатости k/d. Поэтому его величина определяется формулой Альтшуля в общем виде (25). Потери на трение здесь также растут с увеличением расхода, но показатель степени меняется в пределах от 1,75 до 2, т.е.

$$H_{тр}= K \cdot Q^{1,75\div2}$$

В третьей области толщина вязкого (ламинарного) слоя крайне мала и бугорки шероховатости оказывают определяющее влияние на сопротивление потоку. Это область больших чисел *Re*, поэтому в формуле (25) первое слагаемое 68/*Re* значительно меньше второго *k/d* и величиной 68/*Re* можно пренебречь. Тогда

$$\lambda_т = 0{,}11 \cdot \sqrt[4]{\frac{k}{d}} \quad , \qquad (27)$$

т.е. не зависит от числа Рейнольдса. Независимость $\lambda_т$ от *Re* определяет пропорциональность потерь на трение квадрату расхода, т.е.

$$h_{тр}= K \cdot Q^2 \quad .$$

Поэтому эту область сопротивления называют областью квадратичного сопротивления.

Таким образом, если при ламинарном режиме течения потери на трение по длине пропорциональны расходу в первой степени (рис.13), то при турбулентном течении эта зависимость нелинейна. Её степень меняется от 1,75 (в области гидравлически гладких труб) до 2 (в области квадратичного сопротивления) - рис. 15.

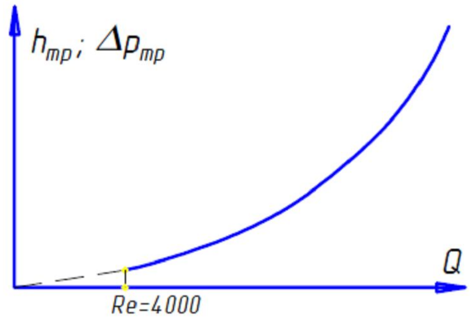

Рис. 15. Зависимость потерь от расхода.

5.3. Потери в местных гидравлических сопротивлениях.

Потери в большинстве местных гидравлических сопротивлений вызваны вихреобразованиями и являются следствием изменения конфигурации потоков (сужения, расширения, повороты и т. д.). Такие потери пропорциональны квадрату расхода или скорости и вычисляются по формуле Вейсбаха (18). Причем, коэффициенты местных сопротивлений ζ в большинстве случаев являются величинами постоянными. А их численные значения определяются геометрическими соотношениями. Рассмотрим некоторые наиболее часто встречающиеся местные гидравлические сопротивления.

При внезапном расширении потока величина ζ однозначно определяется соотношением его площадей до расширения S_1 и после S_2

$$\zeta_{\text{расш}} = (1 - S_1 / S_2)^2.$$

В частном случае, когда жидкость вытекает из трубы в бак, т. е. когда S_1 существенно меньше S_2, $\zeta_{\text{расш}}$ принимает значение равное единице. При плавном расширении потока этот коэффициент зависит не только от соотношения площадей, но и от угла расширения.

При внезапном сужении потока ζ также зависит от соотношения площадей до сужения S_1 и после S_2

$$\zeta_{\text{суж}} = 0{,}5\cdot(1 - S_2 / S_1).$$

В частном случае, когда жидкость вытекает из бака по трубе, т. е. когда S_1 существенно больше S_2, $\zeta_{\text{суж}} = 0{,}5$. При плавном сужении потока на величину коэффициента сопротивления оказывает влияние и угол сужения.

При повороте потока, который принято называть коленом, ζ зависит от угла и относительного радиуса поворота (соотношение радиуса и диаметра трубы). В частном случае, при повороте на 90 градусов без закругления, коэффициент сопротивления равен единице.

В перечисленных и других случаях местных гидравлических сопротивлений величины коэффициентов ζ можно определить с использованием справочной литературы по гидравлике.