

ЛЕКЦИЯ 9

2.8. Влияние шероховатости стенок на механизм турбулентного потока

На механизм турбулентного потока большое влияние оказывает состояние ограничивающих его твердых стенок, всегда в той или иной степени обладающих

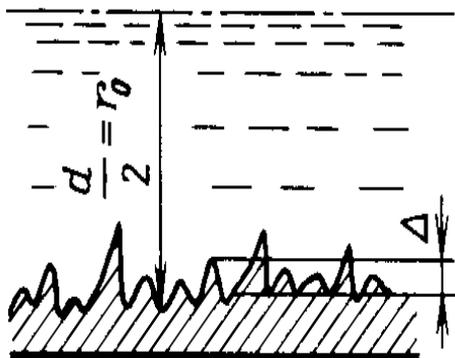


Рис.2.12. Геометрические параметры потока в трубе

известной шероховатостью. Шероховатость характеризуется величиной и формой различных, порой самых незначительных по размерам, выступов и неровностей, имеющих на стенках, и зависит от материала стенок и их обработки. Обычно с течением времени шероховатость изменяется от появления ржавчины, коррозии, отложения осадков и др.

В качестве основной характеристики шероховатости служит так называемая *абсолютная шероховатость* Δ , представляющая собой среднюю величину указанных выступов и неровностей, измеренную в линейных единицах (рис.2.12).

Для характеристики влияния шероховатости на гидравлические сопротивления с учетом условий соблюдения подобия в гидравлике вводится понятие *относительной шероховатости* $\bar{\Delta}$, под которой понимается безразмерное отношение абсолютной шероховатости к некоторому линейному размеру, характеризующему сечение потока (например, к радиусу трубы, глубине жидкости в открытом потоке и др.). Таким образом, для круглых труб относительная шероховатость:

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d} \text{ или } \bar{\Delta} = \frac{\Delta}{r_0}$$

В некоторых случаях вводится также понятие *относительной гладкости* ε - величины, обратной относительной шероховатости:

$$\varepsilon = \frac{1}{\bar{\Delta}} = \frac{d}{\Delta}$$

В действительности, однако, как показали исследования, на гидравлические сопротивления влияет не только абсолютное значение шероховатости (высоты выступов), но в значительной степени и форма выступов, густота и характер их расположения. Следует различать стенки с равномерной и неравномерной шероховатостью. Равномерная шероховатость обычно создается искусственно при лабораторных исследованиях. Стенки же промышленных трубопроводов, как правило, характеризуются неравномерной шероховатостью с большим разбросом величин выступов относительно их среднего значения.

Чтобы лучше уяснить особенности сопротивления шероховатых труб, необходимо учесть наличие ламинарного подслоя при течении.

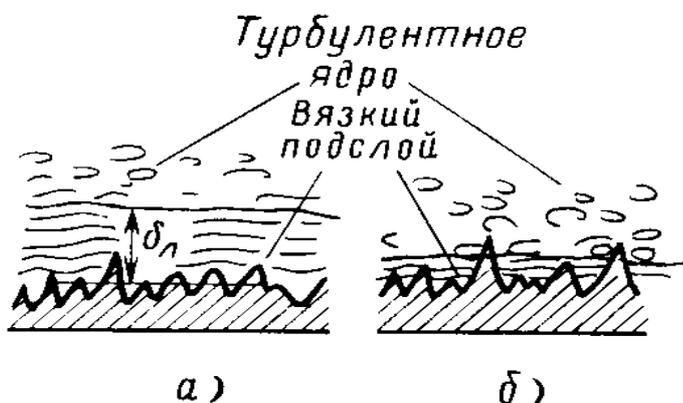


Рис.2.13. Структура турбулентного потока вблизи шероховатой стенки

димо учесть наличие ламинарного подслоя при течении. Как указывалось выше, при увеличении числа Рейнольдса толщина ламинарного слоя δ_{ec} уменьшается, поэтому для турбулентного потока при малых Re эта толщина больше высоты микронеровностей $\bar{\Delta}$ (рис.2.13а), тогда неровности стенки будут полностью погружены в этот слой,

турбулентная часть потока не будет входить в непосредственное соприкосновение со стенками и движение жидкости, а следовательно, и потери энергии, не будут зависеть от шероховатости стенок, а будут обусловлены лишь свойствами самой жидкости. Если высота выступов такова, что они превышают толщину вязкого подслоя ($\Delta > \delta_{ec}$), неровности стенок будут выступать в турбулентную область (рис.2.13б), увеличивая тем самым беспорядочность движения и существенным образом влияя на потерю энергии. В этом случае каждый отдельный выступ можно уподобить плохо обтекаемому телу, находящемуся в окружающем его потоке жидкости и являющемуся источником образования вихрей .

В соответствии со сказанным в гидравлике различают поверхности гидравлически гладкие ($\Delta < \delta_{ec}$) и шероховатые ($\Delta > \delta_{ec}$). Конечно, такое деление является условным. На самом деле, как уже указывалось, толщина вязкого ламинарного подслоя непостоянна и уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. У гидравлически гладких стенок с возрастанием числа Рейнольдса начинает проявляться их шероховатость, так как вязкий подслоя становится тоньше и выступы шероховатости, которые первоначально полностью располагались в этом слое, начинают выходить из него, выступая в турбулентную зону. Следовательно, одна и та же стенка в зависимости от числа Рейнольдса может вести себя по-разному: в одном случае - как гладкая, а в другом - как шероховатая. Поэтому абсолютная шероховатость не может полностью характеризовать влияние стенок на движение жидкости. Естественно, что стенки с одной и той же абсолютной шероховатостью в потоках небольших поперечных размеров должны будут вносить большие возмущения в поток жидкости и оказывать большее сопротивление движению, чем в потоках большого сечения. В действительности, однако, как показали исследования, на гидравлические сопротивления влияет не только абсолютное значение шероховатости (высоты выступов), но в значительной степени и форма выступов, густота и характер их расположения. Следует различать стенки с равномерной и неравномерной шероховатостью. Равномерная шероховатость обычно создается искусственно при лабораторных исследованиях. Стенки же промышленных трубопроводов, как правило, характеризуются неравномерной шероховатостью с большим разбросом величин выступов относительно их среднего значения.

Трубы с равномерной шероховатостью можно считать гидравлически гладкими, если $\bar{\Delta} \leq 33,7 \text{Re}^{-0,875}$.

Для труб с неравномерной шероховатостью для этого необходимо, чтобы $\bar{\Delta} \leq 10 \text{Re}^{-0,875}$.

Поскольку учесть влияние всех перечисленных выше факторов непосредственными измерениями невозможно, в настоящее время для характеристики шероховатости стенок промышленных труб при гидравлических расчетах обычно

используют понятие так называемой *эквивалентной шероховатости* $\Delta_{\text{экв}}$. Эта шероховатость представляет собой такую величину выступов однородной абсолютной шероховатости, которая дает при подсчетах одинаковую с действительной шероховатостью величину потери напора. Значения эквивалентной шероховатости определяют на основании гидравлических испытаний трубопроводов и пересчета их результатов по соответствующим формулам.

2.9. Полуэмпирические теории турбулентности.

До сих пор, как на это неоднократно указывалось, несмотря на большое число теоретических и экспериментальных работ, выполненных различными исследователями, нет еще строгой теории турбулентного перемешивания. Не установлены и необходимые для выполнения инженерных расчетов строго обоснованные расчетные зависимости для количественного описания явлений, происходящих в турбулентных потоках.

В связи с этим широкое применение получили полуэмпирические теории турбулентности, основанные на схематизированных физических моделях турбулентного потока. Наибольшую известность из них получила полуэмпирическая теория, разработанная Прандтлем. В ее основу положена рассмотренная выше двухслойная модель турбулентного потока, предполагающая его деление на две части: турбулентное ядро и ламинарный подслой. Используя эту модель получим следующие, удобные для практического использования формулы для распределения скоростей в круглой трубе при турбулентном режиме:

в случае гладких труб

$$u = u^* \left(5,75 \lg \frac{u^* y}{\nu} + 5,5 \right); \quad (2.35)$$

в случае шероховатых труб

$$u = u^* \left(5,75 \lg \frac{y}{\Delta} + 5,5 \right); \quad (2.36)$$

Наряду с полуэмпирическим описанием распределения скоростей в трубах используют и более простые эмпирические зависимости, наиболее распространенной из которых является степенная:

$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{y}{r_0} \right)^n,$$

где u_0 – значение скорости на оси трубы.

Показатель степени n в этой формуле не постоянен и убывает с возрастанием числа Рейнольдса. Среднее значение n равно $\frac{1}{7}$ и для этого случая получил широкое применение *закон корня седьмой степени* или так называемый *закон «одной седьмой» Кармана*:

$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{y}{r_0} \right)^{\frac{1}{7}}. \quad (2.37)$$

Недостатком степенной формулы, как и всякой эмпирической зависимости, является ограниченный диапазон изменения параметров (числа Рейнольдса), в котором она применима. Кроме этого, она дает неверные значения градиента скоростей на оси трубы и у стенки. Однако, простота этой формулы и удовлетворительное соответствие опытным данным в большей части сечения трубы делает ее удобной для технических расчетов.

Для того, чтобы в трубе установить распределение скоростей, соответствующее приведенным выше формулам, жидкость должна пройти от входного сечения трубы некоторый участок, называемый (по аналогии со случаем ламинарного потока) начальным участком турбулентного режима

Высказанные выше соображения о механизме движения и установленные закономерности распределения скоростей в турбулентном потоке подтверждается большим числом опытных данных. При турбулентном режиме, как и нужно было ожидать, скорости распределяются по сечению значительно более равномерно, чем при ламинарном.

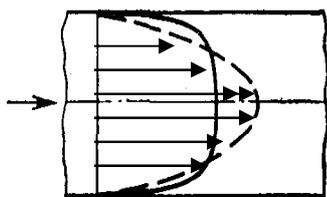


Рис.2.15. Распределение скорости

На рис. 2.15 показаны кривые распределения скоростей для потока жидкости в круглой цилиндрической трубе при турбулентном режиме (сплошная линия) и при ламинарном (пунктирная линия) при одном и том же расходе.

При этом следует иметь в виду, что чем больше число Рейнольдса, т. е. чем интенсивнее происходит процесс перемешивания, тем, естественно, больше это отношение и в

пределе при бесконечно больших числах Re оно стремится к единице.

Законы распределения скоростей имеют большое теоретическое и практическое значение, позволяют установить весьма важную для практических целей роль связи между распределением скоростей и коэффициентом гидравлического сопротивления.

2.10. Влияние различных факторов на величину коэффициента трения λ .

Вопросу влияния различных факторов на значение коэффициента гидравлического трения λ посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ. Не останавливаясь на истории вопроса, обратимся к опытам по изучению гидравлических сопротивлений в шероховатых трубах, произведенным Никурадзе в 1932 г. Указанные опыты были поставлены весьма тщательно и проводились в трубах с искусственной однородной шероховатостью, которая создавалась наклеиванием зерен песка определенного размера на внутреннюю поверхность труб. В трубах с такой шероховатостью при различных расходах определялась потеря напора, и по формуле Дарси вычислялся коэффициент λ , значения которого наносились на график в функции числа Рейнольдса.

Результаты опытов Никурадзе представлены на графике рис. 2.16. Рассматривая указанный график, можно сделать следующие важные выводы.

В области ламинарного режима (т. е. при $Re < 2320$, чему соответствует $lg Re = 3,36$) все опытные точки независимо от шероховатости стенок уложились на одну прямую I в левой части графика. Следовательно, здесь λ зависит только от числа Рейнольдса и не зависит от шероховатости.

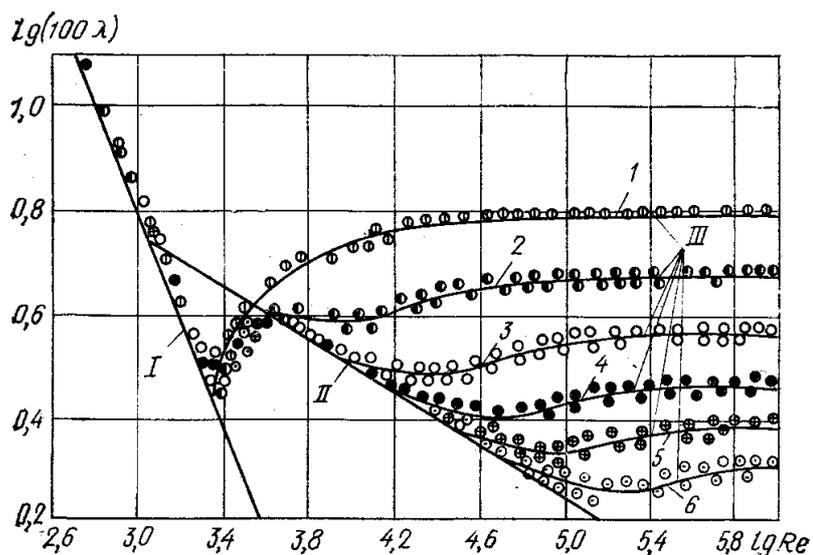


Рис.2.16. График Никурадзе.

(I – область ламинарного течения. II – область турбулентного течения в гидравлически гладких трубах, III – область турбулентного течения в вполне шероховатых трубах - $\frac{d}{\Delta} = 30$ (1), 61,2 (2), 120 (3), 352 (4), 504 (5), 1014(6)).

При значениях числа Рейнольдса от 2320 до 3000 (переходная область от ламинарного режима к турбулентному) коэффициент λ быстро возрастает с увеличением числа Re , оставаясь по-прежнему одинаковым для различных шероховатостей.

В области турбулентного режима (т. е. при $Re > 3000$, чему соответствует $lg Re > 3,48$) начинает сказываться влияние шероховатости стенок. При этом, чем больше шероховатость, тем выше значение λ для одних и тех же чисел Рейнольдса.

Для труб с большой относительной шероховатостью λ постепенно возрастает с увеличением Re , достигая некоторого значения, сохраняющегося потом постоянным.

Для труб с малой шероховатостью опытные точки в некотором интервале значений числа Рейнольдса располагаются вдоль наклонной прямой II, известной под названием *прямой Блазиуса для «гладких труб»*. Отклонение от этой

прямой наступает тем раньше, чем больше шероховатость стенок. При этом коэффициент λ тоже стремится к некоторому определенному пределу, разному для труб с различной шероховатостью, затем при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса также сохраняет свое значение постоянным. Это так называемая область «*вполне шероховатых труб*», отвечающая квадратичному закону сопротивлений.

Подытоживая, приходим к выводу, что всю область чисел Рейнольдса на рассмотренном графике Никурадзе можно разделить на пять зон:

1-я зона - ламинарный режим [$\lambda = f(Re)$];

2-я зона - переходная из ламинарного режима в турбулентный;

3-я зона - область «гидравлически гладких» труб при турбулентном режиме [$\lambda = f(Re)$];

4-я зона - область шероховатых труб (доквадратичная область «смешанного трения») при турбулентном режиме [$\lambda = f(\bar{\Delta}, Re)$];

5-я зона - область «вполне шероховатых труб» (квадратичная или автомодельная область) при турбулентном режиме [$\lambda = f(\bar{\Delta})$].

Примерные границы отдельных зон турбулентного режима определяются следующими соотношениями:

$$3\text{-я зона} - Re \cdot \frac{\bar{\Delta}}{d} > 10; \quad (2.40)$$

$$4\text{-я зона} - 10 < Re \cdot \frac{\bar{\Delta}}{d} < 500; \quad (2.41)$$

$$5\text{-я зона} - Re \cdot \frac{\bar{\Delta}}{d} > 500. \quad (2.42)$$

Полученным результатам можно дать следующее истолкование, находящееся в полном соответствии с установленной выше схемой турбулентного режима (рис.2.13). До тех пор пока выступы шероховатости полностью погружены в ламинарный пограничный слой, т. е. когда $\Delta < \delta_{sc}$, они не создают различий в шероховатости, понимаемой в гидравлическом смысле. В этом случае для структуры потока нет разницы между гладкими и шероховатыми поверхностями стенок

и коэффициент λ , зависит только от числа Рейнольдса и определяется как для гладких труб (1 - 3-я зоны).

Если выступы шероховатости выходят за пределы пограничного слоя ($\Delta > \delta_{ac}$), ламинарное течение нарушается и выступы шероховатости приводят к отрыву жидкости от стенок и образованию в ней вихрей.

Как указывалось выше, толщина пограничного слоя уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Поэтому в случае относительно небольших значений этого числа, когда Δ имеет тот же порядок, что и δ_{ac} , коэффициент λ должен зависеть не только от шероховатости стенок, но и от числа Рейнольдса (4-я зона). Если число Рейнольдса весьма велико и $\Delta \gg \delta_{ac}$, λ зависит только от шероховатости (5-я зона).

Основные закономерности, установленные Никурадзе, были в дальнейшем подтверждены рядом исследователей для различных случаев однородной шероховатости.

А. П. Зегжда установил, что данные, полученные Никурадзе для круглых труб, оказываются справедливыми и для открытых безнапорных потоков.

Е. З. Рабинович показал, что выводы Никурадзе подтверждаются при изотермическом течении в песчаных цилиндрических каналах литниковых систем таких необычных жидкостей, как расплавленные металлы (сталь, чугун).

Как уже указывалось, опыты Никурадзе проводились в трубах с однородной искусственной шероховатостью. Трубы же, применяемые на практике, имеют шероховатость неоднородную и неравномерную. Поэтому долгое время оставалось неясным, насколько правильными будут выводы, сделанные Никурадзе для труб с искусственной шероховатостью, в применении к обычным промышленным трубам с естественной шероховатостью и каковы численные значения шероховатости для подобных труб. Выяснению этих вопросов были посвящены проведенные в дальнейшем фундаментальные экспериментальные исследования (работы Кольбрука- Уайта, И. А. Исаева, Г. А. Мурина, Ф.А.Шевелева). Из них наибольший интерес представляют весьма обстоятельные опыты Г. А. Мурина по

исследованию гидравлических сопротивлений в обычных промышленных стальных трубах. Результаты этих опытов представлены на графике рис. 2.17.

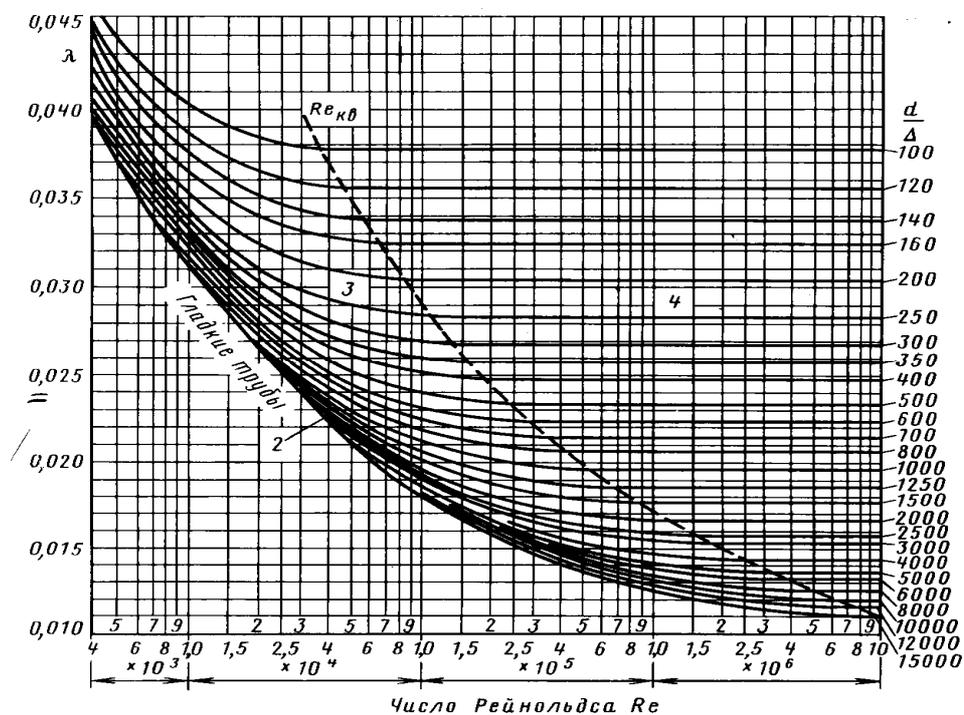


Рис.2.17. График Мурина (диаграмма Кольбука – Уайта).

Подтвердив основные закономерности, установленные Никурадзе, эти опыты позволили сделать ряд важных, существенно новых выводов. Они показали, что для труб с естественной шероховатостью коэффициент λ в переходной области оказывается всегда больше, чем в квадратичной (а не меньше, как у Никурадзе для труб с искусственной шероховатости), и при переходе из первой области во вторую непрерывно снижается. Поэтому кривые, полученные Г. А. Муриным, не имеют впадины, характерной для кривых Никурадзе.

Аналогичные результаты были получены и другими исследователями.

2.11. Эмпирические формулы для определения коэффициента трения λ .

Выводы, сделанные в предыдущем разделе, позволяют критически оценить формулы для определения коэффициента λ и являются основанием для рассмотрения лишь тех из них, которые, с одной стороны, достаточно хорошо обоснованы теоретически, с другой - подтверждены экспериментально. Формулы, применяемые в настоящее время в практических расчетах, рассматриваются ниже.

При ламинарном режиме в круглых трубах для определения коэффициента λ применяют формулу Пуазейля (2.24), полученную ранее из сопоставления формулы Дарси—Вейсбаха (2.14) с выражением (2.23) для потери напора при ламинарном режиме; на графике Никурадзе (рис. 2.16) она соответствует прямой I .

Справедливость формулы Пуазейля хорошо подтверждается многочисленными опытами, проводившимися с целью изучения движения различных жидкостей в трубах разных диаметров при ламинарном режиме. Из ее рассмотрения следует, что коэффициент λ (следовательно, и потери напора) при ламинарном режиме не зависит от шероховатости трубы. Это объясняется наличием у стенок пристенного, вязкого, «прилипшего» слоя жидкости, по которому скользит жидкость, движущаяся в трубе.

При турбулентном режиме для определения коэффициента λ в разное время было предложено большое число расчетных формул.

Первоначально этот коэффициент принимался постоянным (например, по Дюпюи $\lambda=0,03$). В дальнейшем для определения λ был предложен ряд формул, полученных на основании обработки опытных данных, учитывающих зависимость λ от ряда факторов: средней скорости (формулы Прони, Этельвейна) размеров поперечного сечения (формула Дарси), размеров и формы поперечного сечения, а также шероховатости стенок (формулы Куттера, Базена, Маннинга).

Недостатки этих чисто эмпирических формул в дальнейшем были в значительной мере устранены благодаря применению теории подобия, что позволило на основе большого экспериментального материала получить ряд обобщенных зависимостей, достаточно полно отражающих действительные условия в трубах и каналах при движении жидкостей. Таковы, например, формулы Блазиуса, Ми-

зеса, Ланга, в которых $\lambda = f(\text{Re})$. Еще более совершенными являются формулы, предложенные в более позднее время (Прандтлем и Никурадзе, Кольбруком и Уайтом, Альтшулем).

Однако некоторые из этих формул имеют ограниченную область применения и пригодны лишь для отдельных зон турбулентного режима. В связи с этим возникла задача об установлении единой универсальной формулы, справедливой для всей области турбулентного режима

Впервые такая формула была предложена Кольбруком и Уайтом, которая, применима для всей области турбулентного течения в шероховатых трубах с естественной шероховатостью:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2g \left(\frac{2,5}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7d} \right). \quad (2.43)$$

Из этой формулы как частные случаи легко получаются формулы Прандтля — Никурадзе:

для гидравлически гладких труб (3 зона):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,5}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7d} \right); \quad (2.44)$$

для вполне шероховатых труб (4 зона):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A \lg \frac{d}{\Delta} + B. \quad (2.45)$$

(Коэффициенты A и B устанавливаются путем обработки экспериментальных данных и для труб с искусственной шероховатостью $A = 2$, $B = 1,14$).

Формула Кольбрука и Уайта принята в настоящее время за рубежом в качестве основной для гидравлического расчета трубопроводов, однако она несколько неудобна для практических расчетов, так как содержит неизвестный коэффициент

гидравлического трения в левой и правой частях, что приводит к некоторым трудностям.

В настоящее время наиболее широко применяется формул А. Д. Альтшуля, выражающая зависимость $\lambda = f(\text{Re})$ в явном виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \lg \frac{\text{Re}}{\text{Re} \frac{\Delta}{10d} + 7}, \quad (2.46)$$

и предложенную им же более простую степенную приближенную формулу:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}. \quad (2.47)$$

Указанные формулы наиболее полно и правильно учитывают влияние различных факторов на гидравлические сопротивления и в настоящее время получили широкое применение в практике гидравлических расчетов. Известными недостатками их являются некоторая громоздкость, осложняющая вычисления и отсутствие полных данных об эквивалентной шероховатости.

Для отдельных зон турбулентного режима применимы следующие формулы:

— в области «гидравлически гладких труб» (3-я зона на графике Никурадзе) — формула *Блазиуса*, устанавливающая зависимость коэффициента λ только от числа Рейнольдса:

$$\lambda = 0,3164 \text{Re}^{0,25}; \quad (2.48)$$

Эта формула может быть легко получена как частный случай ($\frac{\Delta}{d} = 0$) формулы (2.47); значения λ , вычисленные по формуле, хорошо отвечают действительности для области «гладких труб» (прямая II на графике Никурадзе).

При $\text{Re} > 100000$ формула Блазиуса оказывается неверной, дает приуменьшенные значения λ ; на практике формула Блазиуса получила широкое применение при расчетах трубопроводов для вязких жидкостей (нефтепроводов), где ввиду большой вязкости движение обычно характеризуется относительно небольшими значениями числа Рейнольдса;

— в докватратичной области шероховатых труб—универсальные формулы (2.47);

— в квадратичной области вполне шероховатых труб — формула *Б. Л. Шифрина* (частный случай формулы (2.47) при $Re \rightarrow \infty$):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} . \quad (2.49)$$

Значения абсолютной эквивалентной шероховатости приведены в таблицах

Приведенные выше формулы появились сравнительно недавно. В различных областях техники до сих пор продолжают пользоваться многочисленными эмпирическими зависимостями, полученных непосредственно путем обработки опытных данных и действительных лишь в ограниченных условиях (для определенных жидкостей, определенных диаметрах труб, скоростей течения и т.д.).

Специальные формулы используют для определения потерь напора в трубопроводах специального назначения, изготовляемых из особых материалов (деревянные и асбоцементные трубы, гибкие рукава, прорезиненные шланги и др.). Эти формулы установлены на основании обработки опытных данных и могут быть использованы для расчетов лишь в условиях, близких к опытным.