

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 26.12.2021 15:29:47  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668a0b71301d426039e0f1e11ca1d4943a7ca4831ca538029

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Юго-Западный государственный университет»

(ЮЗГУ)

Кафедра водоснабжения и охраны водных ресурсов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г.Локтионова



2014 г.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Методические указания по выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Механика жидкостей и газа» для студентов специальностей 270102, 270105, 270109, 270112, 270115, 190601

Курск 2014

УДК 532 (075.8)

Составители: В.А.Незнанова, Ю.Г.Алымов, А.И.Поздняков

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор кафедры  
водоснабжения и охраны водных ресурсов *В.А.Морозов*

**Определение режима течения жидкости в горизонтальной трубе:**  
методические указания по выполнению лабораторной работы по  
дисциплине «Механика жидкости и газа»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.:  
В.А.Незнанова, Ю.Г.Алымов, А.И.Поздняков. Курск, 2014. 11 с.:  
ил.4 , табл.1. Библиогр.: с.11.

Излагаются основные сведения о режимах течения жидкости в цилиндрической трубе. Дается описание установки и порядок проведения эксперимента.

Предназначены для студентов специальностей 270102, 270105, 270109, 270112, 270115, 190601 дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Усл.-печ. л. 0,6 . Уч.-изд. л. 0,6 . Тираж 100 экз. Заказ 54 . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Цель работы:

- экспериментальное исследование режима течения жидкости в горизонтальной трубе, установленной на гидростенде ГС-3;
- визуальное наблюдение за сменой режимов течения;
- определение критерия гидродинамического подобия и сравнение его с критическим значением.

### Общие сведения

При течении жидкости на поток действуют силы вязкого трения (Т) и сила инерции потока (F).

Сила вязкого трения определяется законом Ньютона-Петрова

$$T = \mu s \left| \frac{du}{dr} \right| \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости [Па·с];

$s$  – площадь трения соседних слоёв;

$du/dr$  – градиент скорости в поперечном направлении потока.

Сила инерции потока

$$F = am \quad (2)$$

$a$  – ускорение,  $m$  – масса рассматриваемого объёма жидкости.

О.Рейнольдс опытным путем установил и теоретически обосновал наличие двух режимов движения жидкости. Наличие того или иного режима определяются: средней скоростью потока, характерным линейным размером сечения потока жидкости и кинематической вязкостью жидкости. В зависимости от условий проведения опыта характер движения потока может быть различным. Параметр, определяющий режим движения потока, определяется соотношением сил, действующих на поток и получил в дальнейшем название критерий динамического подобия или число Рейнольдса (Re)

$$Re = \frac{F}{T} = \frac{am}{\mu s \left| \frac{du}{dr} \right|} \sim \frac{(u/t)pw}{\mu s(u/r)} \sim \frac{(u/t)L^3}{(\mu/\rho)L^2(u/L)} \sim \frac{vL}{\nu}, \quad (3)$$

где  $\nu = \mu/\rho$  – кинематический коэффициент вязкости [ $m^2/c$ ];

$v$  – средняя скорость потока;

$L$  – линейный размер потока.

В качестве линейного размера используется диаметр трубы или гидравлический радиус  $R_r$ . Гидравлический радиус чаще всего используется для некруглой формы русла потока и является отношением площади поперечного сечения потока к длине смоченного периметра этого сечения. Смоченный периметр – сечение потока, при соприкосновении с твердыми стенками русла.

Таким образом, для любого потока

$$Re = vR_r / \nu. \quad (4)$$

Режимы течения жидкостей получили название: ламинарный (от латинского «ламина» – слой, пластина) и турбулентный (от латинского «турбо» – вихрь). Смена режимов течения происходит при критических значениях числа Рейнольдса  $Re_{кр} = 580$  (для любого сечения потока) и 2320 (для напорной круглой трубы).

Смена режимов наблюдается при критической скорости  $v_{кр} = Re_{кр} \cdot \nu / R_r$ , соответствует критическому значению числа Рейнольдса. Если  $Re < Re_{кр}$  - режим ламинарный; при  $Re > Re_{кр}$  - режим турбулентный.

О. Рейнольдсом было установлено, что смена режимов возможна и при более низких или высоких значениях числа Рейнольдса. В отдельных случаях смена режимов наблюдалась и при  $Re \approx 100000$  (полированные трубы, термоконстантные условия).

Кроме того смена режимов зависит от порядка их формирования. Если развивать турбулентный режим из ламинарного, например, постепенно увеличивая скорость потока, то критическое значение  $Re$  будет превышать, примерно, в пять раз критическое значение  $Re$  для случая формирования ламинарного потока из турбулентного. Это объясняется свойством потока “по инерции” сохранять предшествующее состояние.

Следует отметить, что не существует одновременного перехода потока по всей длине из одного режима в другой. Существование переходной области между ламинарным и турбулентным режимами объясняется тем, что течение жидкости носит перемежающийся характер: появляются очаги турбулентности (вихри), скорость в определенной рассматриваемой точке потока то изменяется по величине и направлении, то стабилизируется.

В ламинарном потоке силы трения преобладают над силами инерции и стабилизируют течение, подавляя возмущения, вихри. В результате наблюдается течение слоистое, упорядоченное, без перемешивания жидкости.

Теоретический анализ позволил выявить параболический профиль эпюры скоростей по сечению ламинарного потока в круглой цилиндрической трубе (рис.1), а также соответствующую аналитическую зависимость для эпюры скоростей.

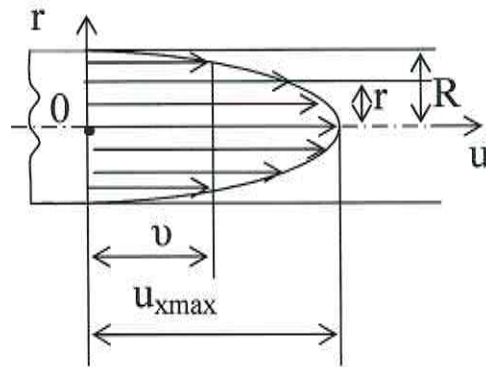


Рис.1. Профиль скоростей по сечению трубы при ламинарном течении

Максимальная скорость  $u_{x\max}$  достигается на оси потока, а текущие значения скорости  $u$  в любом слое радиусом  $r$  определяются соотношением

$$u/u_{\max}=1-r^2/R^2, \quad (4)$$

при этом средняя скорость потока равна половине максимальной ( $v=0,5u_{\max}$ ) и жидкость прилипает к внутренней поверхности трубы ( $v=0$  при  $r=R$ ).

Многочисленные экспериментальные данные подтверждают приведенные аналитические соотношения для ламинарного потока.

При турбулентном режиме в потоке наблюдаются пульсации параметров, например, изменения во времени продольной скорости в фиксированной точке потока.

Мгновенное значение скорости продольного течения в фиксированной точке турбулентного потока

$$\tilde{u}=\bar{u}+u',$$

где  $\bar{u}$  – осредненная скорость течения в продольном направлении;

$u'$  - пульсация скорости продольного течения.

Осредненная скорость – это среднее арифметическое значение мгновенных скоростей:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u} dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\bar{u} + u') dt. \quad (5)$$

Последнее выражение показывает, в частности, что турбулентный поток можно представить как результат наложения двух потоков: одного с осредненной скоростью  $\bar{u}$  и другого пульсационного со

скоростью  $u'$ . Пульсационная скорость объясняется хаотичным движением частиц жидкости, многократным пересечением траекторий.

Наряду с пульсациями  $u'$  продольной скорости в турбулентном потоке существуют и поперечные перемещения частиц жидкости. Скорости поперечных перемещений также имеют свои пульсации  $u'_r$ .

Указанные особенности значительно усложняют анализ турбулентного течения, а отсутствие стройной теории вызывает необходимость использования различных гипотез. Наиболее распространенная из них – гипотеза Л.Прандтля о длине пути смещения, которая позволяет получить значение касательного напряжения трения в виде

$$\tau_T = \rho \ell^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dr} \right| \frac{d\bar{u}}{dr}. \quad (6)$$

Здесь  $\ell$  - длина пути смещения, т.е. расстояние в поперечном направлении потока, на котором частица жидкости сохраняет своё количество движения до попадания в слой с иным значением скорости, а следовательно, и другим количеством движения. Именно это обстоятельство вызывает появление в турбулентном потоке напряжений  $\tau_T$  силы инерционного трения, которые значительно превышают напряжения силы вязкого трения в ламинарном потоке. С учетом наличия в турбулентном потоке пристенного ламинарного подслоя, напряжение определяется уже зависимостью

$$\tau = \mu \frac{d\bar{u}}{dr} + \rho \ell^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dr} \right| \frac{d\bar{u}}{dr}. \quad (7)$$

Принципиально важным является и то, что турбулентное движение всегда является неустановившимся.

При использовании гипотезы Прандтля был получен логарифмический закон изменения по сечению турбулентного потока осредненной продольной скорости. Профиль осредненных скоростей по сечению напорного турбулентного потока в круглой цилиндрической трубе представлен на рис.2.

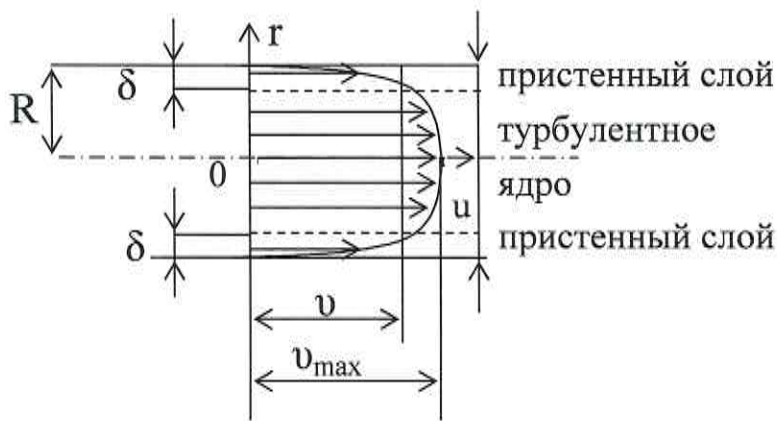


Рис.2. Профиль осредненных скоростей по сечению турбулентного потока в круглой цилиндрической трубе

Более наполненный профиль осредненных скоростей объясняется пульсационным поперечным движением.

Для упрощения аналитического описания профиля осредненных скоростей турбулентного потока используют закон «одной седьмой»:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}}. \quad (8)$$

Несмотря на наличие мощных вихревых областей (турбулентного ядра потока), вблизи стенки существует ламинарный подслой, толщина которого  $\delta$  уменьшается с увеличением числа  $Re$  ( $\delta \sim Re^{-1}$ ), а градиент скорости в поперечном направлении резко увеличивается, причем

$$\left(\frac{du}{dr}\right)_{\max \text{ турб}} > \left(\frac{du}{dr}\right)_{\max \text{ лам}}. \quad (9)$$

В отличие от ламинарного потока величина средней скорости в поперечном сечении турбулентного потока не является постоянной, а изменяется в пределах  $v=0,7 \div 0,9 u_{\max}$  и с развитием турбулентности ( $Re \rightarrow \infty$ ) приближается к максимальной ( $v \rightarrow u_{\max}$ ).

В инженерной практике для напорных потоков в круглых цилиндрических трубах в качестве характерного линейного размера применяют не гидравлический радиус, а внутренний диаметр трубы  $d$ . Нетрудно подсчитать, что в этом случае

$$R_r = \pi R^2 / (2\pi R) = R/2 = d/4,$$

а число Рейнольдса  $Re=ud/\nu$  оказывается в 4 раза большим, следовательно и критическое значение числа Рейнольдса:  $Re_{кр}=4 \cdot 580=2320$ .

### Описание установки

Принцип действия и основные части гидростенда представлены на рис.3. Установленный на стойке 4 расходный бачок 2 выполнен в виде сферы и обеспечивает установившийся поток воды в рабочем участке 12. Рабочий участок установлен над лотком 9 и крепится к выходному патрубку 3 с помощью уплотнения. Другой конец рабочего участка укрепляется в патрубке 11.

В напорную магистраль вода поступает от насоса 6 при открытии вентиля 5. В процессе эксперимента расход воды регулируется вентилями 5 и 10. Насос 6 подает воду из бака 7 в расходный бачок. В верхней части бака 7 крепится мерный бачок 8, ёмкость которого  $3600 \text{ см}^3$ . В днище мерного бачка установлен клапан, управляемый рычажным механизмом. При закрытии клапана включается электросекундомер, расположенный на панели гидростенда. После наполнения мерного бака осуществляется остановка секундомера. Избыточное давление в расходном бачке контролируется образцовым манометром 1.

Техническая характеристика гидростенда:  
напряжение питания насоса - 220 В; частота – 50 Гц; максимальный секундный расход воды – 1 л/с;  
регулируемый напор  $H=0 \div 10$  м вод.ст..

Рабочий участок стенда представляет собой стеклянную трубку с внутренним диаметром  $d=2,1$  см и длиной  $\sim 100$  см.

### Порядок проведения эксперимента

На вход трубки с помощью шприца подаётся подкрашенная жидкость (индикатор). Это позволяет визуально наблюдать ламинарное течение, когда струйки индикатора не перемешиваются с основным потоком воды, а при увеличении расхода воды - наблюдать переход от ламинарного к турбулентному режиму. Дальнейшее увеличение расхода воды приводит к тому, что окрашенная струйка (индикатор) размывается вследствие перемешивания потока воды и поток



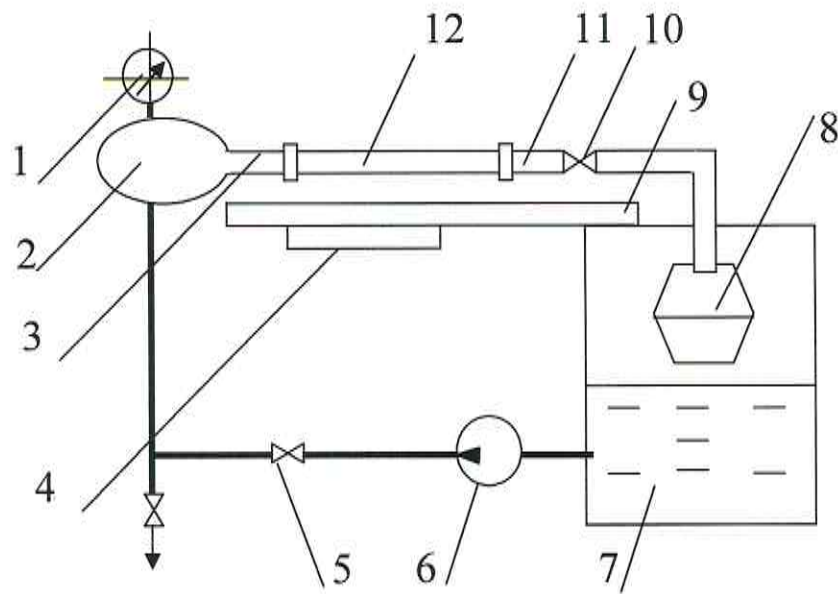


Рис.3. Схема гидравлического стенда ГС-3

в стеклянной трубке становится равномерно окрашенным.

Наряду с визуальным наблюдением используется и расчетный метод.

С помощью секундомера при работающем насосе и фиксированном положении вентиля 10 измеряется продолжительность наполнения мерного бака. Расход воды  $Q$  определяется отношением объема мерного бака  $w$  к продолжительности его наполнения  $t$ . Средняя скорость потока вычисляется как отношение расхода к площади поперечного сечения потока в стеклянной трубке:  $v=Q/(\pi d^2/4)$ . Измерив с помощью термометра температуру воды, по графику (рис.4) можно определить значение кинематического коэффициента вязкости и вычислить число Рейнольдса

$$Re=vd/\nu.$$

Сравнив полученное значение числа Рейнольдса с критическим можно сделать вывод о режиме течения. Изменяя положение вентиля, можно получить другое значение числа  $Re$ .



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы особенности ламинарного течения жидкости в трубе?
2. Каковы особенности турбулентного течения жидкости?
3. Каков физический смысл числа Рейнольдса, как с его помощью определяется режим течения?
4. Изобразить профиль скоростей по сечению трубы для ламинарного и турбулентного потоков в трубе, каковы их отличия?
5. Как определяется число  $Re$  при проведении эксперимента?

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудинов В.А. Гидравлика. М.: Высшая школа, 2007 г.- 199с.
2. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Изд. Центр «Академия»; 2010 г. – 269с.
3. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями. М.: Высшая школа, 2007 г.-192с.
4. Гусев А.А. Гидравлика. М.: ЮРАЙТ; 2013 г. -288с.
5. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: КолосС; 2008г.