

Лабораторная работа № 3

Изучение режимов движения жидкости

Цель работы: закрепление знаний по разделу "Режимы течения жидкостей", визуальное наблюдение характера и структуры потока жидкости при разных скоростях движения и приобретение навыков по установлению режима течения.

3.1. Общие сведения.

В 1883 г. английский физик Осборн Рейнольдс обосновал теоретически и показал на опытах существование двух принципиально различных режимов движения жидкости.

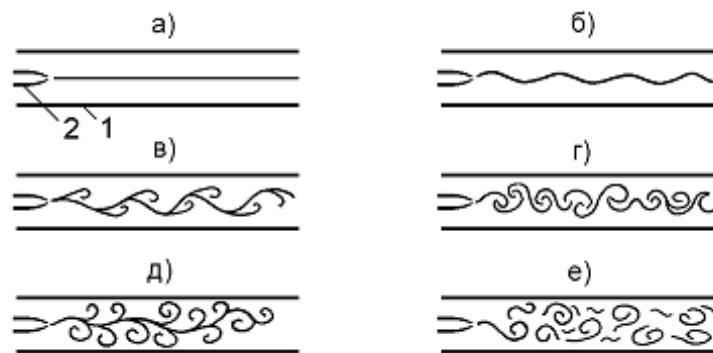


Рис. 3.1. Режимы движения жидкости

О. Рейнольдс разработал установку, которая давала бы возможность наблюдения режимов движения жидкости и постепенного преобразования одного режима в другой (рис. 3.1). Установка позволяет наблюдать эти режимы при движении подкрашенной жидкости, подаваемой через трубку 2 в поток прозрачной жидкости, протекающей по стеклянному трубопроводу 1.

При небольшой скорости движения жидкости краска, попав в поток жидкости в виде тонкой струйки, продолжает на всем протяжении потока двигаться струйкой (рис. 3.1, а). Это значит, что частицы испытуемой жидкости также движутся струйчато (слоисто). Это *ламинарный* режим.

При увеличении скорости движения жидкости окрашенная струйка приобретает волнистое очертание (переходная зона), а затем внезапно разрушается на отдельные частицы, которые далее двигаются по случайным неопределенно искривленным траекториям, окрашивая весь поток жидкости (рис. 3.1, е). Это *турбулентный* режим.

При таком режиме часть энергии затрачивается на поперечное перемещение и перемешивание частиц жидкости, вследствие чего турбулентный режим требует больших удельных затрат на перемещение жидкости, чем ламинарный.

Рейнольдс установил, что критерием режима движения жидкости является безразмерная величина, представляющая собой отношение произведения средней скорости потока v на характерный линейный l размер поперечного сечения потока к кинематической вязкости жидкости ν , которая впоследствии была названа *числом Рейнольдса*.

Для потока жидкости в трубе круглого сечения (характерный размер l равен внутреннему диаметру d) число Рейнольдса вычисляется по формуле:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}.$$

При движении жидкости в прямых круглых трубах на участках, достаточно удаленных от входа, и при отсутствии различных возмущающих условий установлено, что

— при $Re < 2320$ – режим движения жидкости устойчиво ламинарный;

— при $Re > 2320$ режим движения жидкости – турбулентный.

При $2320 < Re < 10\,000$ турбулентный режим течения еще не полностью развит. Здесь зоны турбулентного движения могут перемежаться с зонами ламинарного движения. Такой режим течения жидкости называют *переходным*.

Ламинарный режим наиболее вероятен при малых скоростях течения в каналах небольшого поперечного сечения (порах, капиллярах) или при движении жидкостей с большой вязкостью (нефть, мазут, масло и пр.). Турбулентный режим чаще встречается при движении маловязких жидкостей (вода, бензин, керосин и др.) в трубах и каналах.

Физический смысл числа Рейнольдса заключается в следующем. Из теории гидродинамического подобия известно, что силы инерции пропорциональны плотности жидкости ρ , скорости жидкости v во второй степени и характерному линейному размеру l во второй степени:

$$Re_{ин} \approx \rho \cdot v^2 \cdot l^2.$$

В свою очередь, силы вязкости пропорциональны плотности, скорости потока, характерному линейному размеру и коэффициенту кинематической вязкости:

$$Re_{в} \approx \rho \cdot v \cdot l \cdot \nu$$

Число Рейнольдса есть величина, пропорциональная отношению силы инерции к силам вязкости:

$$Re = \frac{Re_{ин}}{Re_v} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot l^2}{\rho \cdot v \cdot l \cdot \nu} = \frac{v \cdot l}{\nu}.$$

В зависимости от того, какие силы (вязкости или инерции) будут преобладать, и установится режим движения жидкости – ламинарный или турбулентный.

На основе эксперимента может быть построен график зависимости числа Рейнольдса от скорости потока жидкости (рис. 3.2), на котором отмечены моменты перехода режимов движения жидкости один в другой и наоборот.

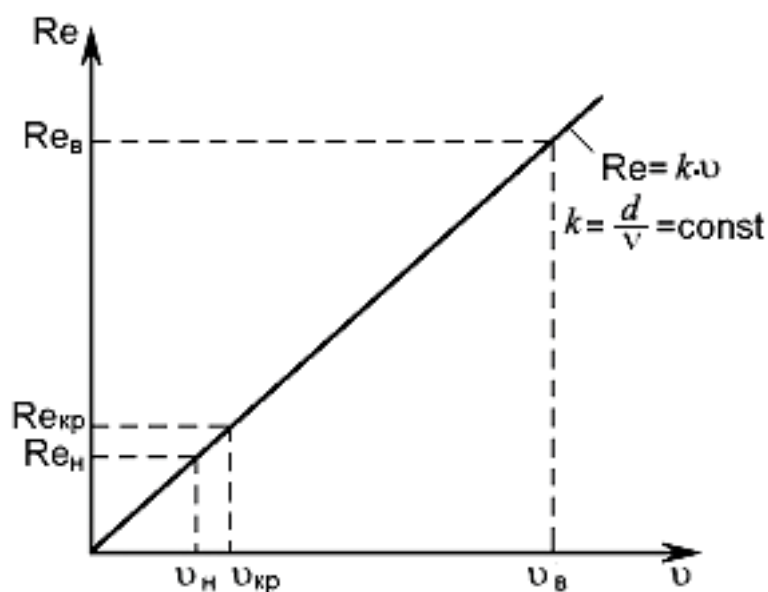


Рис. 3.2. Зависимость Re от скорости потока жидкости

Рейнольдс определил два критических числа – верхнее и нижнее. Верхнее критическое число Рейнольдса соответствует моменту перехода от ламинарного режима к турбулентному: $Re = 12000$. Нижнее критическое число Рейнольдса соответствует моменту перехода от турбулентного режима к ламинарному: $Re = 998$.

На участке между этими двумя критическими числами Рейнольдса возможно существование как ламинарного, так и турбулентного режима движения жидкости. Это зависит от условий входа жидкости в трубу, шероховатости стенок и других случайных факторов.

В практических расчетах число Рейнольдса используется при определении сопротивления трубопроводов. Обычно для жестких трубопроводов критическое число Рейнольдса принимают $Re_{кр} = 2320$.

При $Re < 2320$ ламинарное движение является вполне устойчивым: всякого рода искусственная турбулизация потока и его возмущения (сотрясение трубы, введение в поток колеблющегося тела и др.) погашаются влиянием вязкости, и ламинарный режим течения жидкости снова восстанавливается.

При $Re > 2320$, наоборот, турбулентный режим устойчив, а ламинарный не устойчив.

Если живое сечение потока отличается от круглого или в трубопроводе имеется большое число близко расположенных местных сопротивлений, критическое число Рейнольдса может отличаться от приведенного выше значения. Так, например, для гибких шлангов в системе гидропривода $Re = 1600$.

От режима движения жидкости зависят энергетические параметры потока. На рис. 3.3 показаны эпюры скоростей в живом сечении потока жидкости в круглой трубе.



Рис. 3.3. Эпюры скоростей при ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах движения жидкости

Эпюра скоростей в случае ламинарного режима в трубопроводе круглого сечения представляет собой параболоид вращения, ось которого совпадает с геометрической осью трубы. Сопротивление трубопровода в этом случае прямо пропорционально вязкости жидкости и обратно пропорционально числу Рейнольдса и средняя скорость равна половине от максимального значения $v_{cp} = 0,5 \cdot v_{max}$.

Эпюра скоростей турбулентного режима имеет ярко выраженное турбулизированное ядро потока с примерно одинаковыми средними скоростями. Лишь частицы жидкости, близко расположенные к стенке, испытывают от нее тормозящее действие сил трения и образуют так называемый ламинарный подслой. В этом случае сопротивление трубопровода в наибольшей степени определяется шероховато-

стью стенок трубы и имеет квадратичную зависимость от скорости жидкости и числа Рейнольдса. Средняя скорость потока v_{cp} несколько меньше v_{max} , а при абсолютно турбулентном режиме (что возможно только теоретически для идеальной жидкости) $v_{cp} = v_{max}$.

Кинетическая энергия потока, подсчитанная по средней скорости течения, отнесенная к единице массы жидкости, равна $v_{cp}^2 / 2$.

Отношение действительной кинетической энергии к подсчитанной по средней скорости называется коэффициентом кинетической энергии или коэффициентом Кориолиса α . Он характеризует неравномерность распределения скоростей в поперечном сечении потока. Его минимальное значение равно 1 в случае течения идеальной жидкости. Для реальных жидкостей $\alpha = 1,05-1,13$ при турбулентном режиме и $\alpha = 2$ при ламинарном режиме. В некоторых случаях, например, в местах изгиба трубопровода, эпюра скоростей может иметь еще большую неравномерность скоростей и тогда α может быть больше 2.

Коэффициент Кориолиса при ламинарном режиме можно вычислить по формуле:

$$\alpha = \frac{v_{max}}{v_{cp}}.$$

3.2. Описание опытной установки

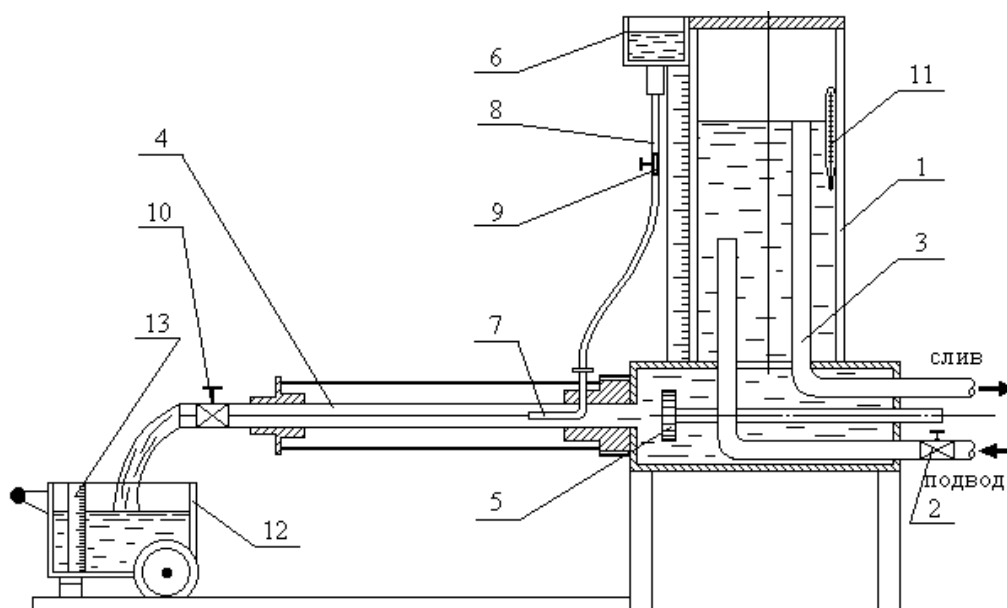


Рис. 3.4. Схема опытной установки

Опытная установка (рис. 3.4) состоит из напорного резервуара 1, снабженного подводящей трубой и вентилем 2, сливной трубой 3, служащей для поддержания постоянного уровня воды во время опытов.

В напорном резервуаре смонтированы: горизонтальная стеклянная трубка 4, клапан 5, служащий для закрытия входа в горизонтальную стеклянную трубку, а также емкость 6 с окрашенной жидкостью. Внутри горизонтальной стеклянной трубки закреплена игла 7, которая соединяется с емкостью 6 гибкой трубкой 8 с краном 9.

В конце горизонтальной стеклянной трубки 4 имеется кран 10 для изменения скорости течения воды в трубе.

Для измерения температуры воды в напорном резервуаре установлен термометр 11.

Для измерения объема вытекшей воды служит мерный сосуд 12, снабженный линейкой 13.

3.3. Порядок проведения работы.

- 1) Открыть вентиль 2 на подводящей трубе и заполнить водой напорный резервуар 1. При этом уровень воды в резервуаре должен поддерживаться постоянным, т. е. Непрерывно работает слив.
- 2) Открыть клапан 5.
- 3) Открыть кран 10 так, чтобы вода в стеклянной горизонтальной трубке протекала с наибольшей скоростью.
- 4) Открывая кран 9 подать краситель в поток воды. С помощью крана 10 уменьшить скорость течения воды в горизонтальной стеклянной трубке 4 и добиться устойчивого ламинарного режима, когда окрашенная струйка будет представлять собой отчетливо выраженную нить по всей длине трубки.
- 5) Объемным способом определить расход воды в стеклянной трубке 4. Для этого под струю воды, вытекающую из крана 10 подставляется мерный сосуд 12 с одновременным включением секундомера. Одновременно фиксируется температура воды термометром 11.

Одновременно с проведением данных замеров необходимо определить при помощи секундомера время прохождения характерной точки подкрашенной струйки (в центре потока) мерного участка. Таких замеров должно быть сделано 6-10 раз. Результаты замеров занести в таблицу 3.1.

Во время проведения этого опыта необходимо убедиться в неравномерности распределения скоростей в поперечном сечении трубы.

Для этого необходимо путем резкого нажатия на резиновую трубку выпустить из емкости 6 большую порцию краски и проследить за ее перемещением. Максимальная скорость наблюдается в центре потока.

6) Постепенным открытием крана 10 увеличивается скорость течения в трубке 4 и все измерения повторяются. Таким образом, делается 2...3 опыта при ламинарном режиме движения.

7) При некотором открытии крана 10 краситель начнет интенсивно перемешиваться с потоком воды в горизонтальной стеклянной трубке 4, т. е. режим течения становится турбулентным. Этот момент следует уловить и измерить расход воды.

8) При последующем открытии крана 10 будет наблюдаться устойчивый турбулентный режим с интенсивным перемешиванием красителя с водой. При этом режиме следует провести 2...3 опыта с возрастающими расходами.

3.4. Обработка опытных данных.

По результатам замеров производится расчет требуемых величин по формулам.

1) Объем воды, вытекшей за время опыта, см³:

$$V = S_6 \cdot \Delta H,$$

где $S_6 = 620 \text{ см}^2$ – площадь сечения мерного бака;

ΔH – приращение уровня воды в баке за время опыта, см.

2) Расход воды, см³:

$$Q = V / t,$$

где t – время опыта.

3) Средняя скорость движения воды, см/с:

$$v_{\text{ср}} = Q / S_{\text{п}},$$

где $S_{\text{п}}$ – площадь живого сечения потока воды, определяется как площадь поперечного сечения круглой трубы диаметром $d = 0,7 \text{ см}$.

4) Кинематический коэффициент вязкости воды, Ст:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2},$$

где T – температура воды в период опыта, °C.

5) Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}.$$

6) Максимальная скорость воды в трубопроводе (только для ламинарного режима), см/с:

$$v_{\max} = L/t_{\text{cp}},$$

где t_{cp} – среднее время прохождения частицами воды контрольного участка, с;

L – длина контрольного участка, см.

7) Коэффициент Кориолиса:

$$\alpha = \frac{v_{\max}}{v_{\text{cp}}}.$$

Результаты измерений и вычисления записываются в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

Результаты измерений и расчетов

Наименование измеренных и вычисленных величин	Опыты					
	1	2	3	4	5	6
1. Приращение уровня воды в баке ΔH , см						
2. Время опыта t , с						
3. Объем вытекшей воды V , см ³						
4. Расход воды Q , см ³ /с						
5. Средняя скорость v_{cp} , см/с						
6. Число Рейнольдса Re						
7. Время прохождения частицей струйки мерного участка t_i , с						
7. Температура воды T , °C						
8. Кинематический коэффициент вязкости ν , см ² /с						
9. Максимальная скорость v_{\max} , см/с						
10. Коэффициент Кориолиса α						

По результатам расчетов в масштабе строится график зависимости $Re = f(v)$, на котором нужно показать зоны различных режимов движения и точки перехода от одного режима к другому.

Среднее время прохождения частицами воды контрольного участка $t_{\text{cp}} = t_i/n =$ _____ с.

Длина контрольного участка $L =$ _____ см.

3.5. Контрольные вопросы.

1. Кто и когда впервые исследовал режимы движения жидкости?
2. Что такое ламинарный режим движения жидкости и чем он характеризуется?
3. Что такое турбулентный режим движения жидкости и чем он характеризуется?
4. Что такое число Рейнольдса и по какой формуле оно определяется для круглых труб?
5. Что такое критическое число Рейнольдса?
6. Чему равно критическое число Рейнольдса для разных случаев?
7. Какой режим течения жидкости называется переходным?
8. Где чаще всего наблюдается ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости?
9. В чем заключается физический смысл числа Рейнольдса?
10. Как зависит число Рейнольдса от скорости движения жидкости?
11. В каких пределах чисел Рейнольдса могут одновременно существовать ламинарный и турбулентный режимы?
12. Для чего используется число Рейнольдса при практических расчетах?
13. Каким образом распределяются скорости по живому сечению потока при ламинарном режиме движения?
14. Каким образом распределяются скорости по живому сечению потока при турбулентном режиме движения?
15. Что такое коэффициент Кориолиса?
16. Как определяется и чему равен коэффициент Кориолиса?
17. Как вычисляется гидравлический радиус и гидравлический диаметр?
18. Опишите схему опытной установки.
19. В какой последовательности производится опыт?
20. По какой формуле определяется кинематический коэффициент вязкости?
21. Как определяется максимальная скорость воды в трубопроводе?