

## Лабораторная работа № 4

### 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.

#### 4.1 Общие сведения

Существует два принципиально разных режима течения жидкостей: ламинарный и турбулентный. Наиболее полно этот вопрос исследовал О. Рейнольдс.

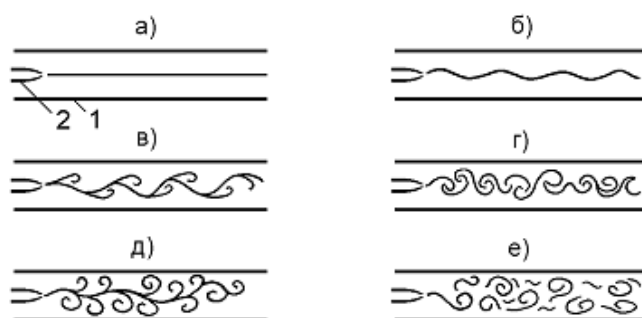


Рисунок 4.1 – Режимы движения жидкости

При **ламинарном** режиме все струйки движутся параллельно друг другу без заметного перемешивания слоев и без пульсаций скоростей и давлений. При таком течении все линии тока определяются формой русла, по которому течет жидкость. Такое течение возможно при сравнительно малых скоростях. Если в поток жидкости, протекающей в стеклянной трубе, ввести окрашенную струйку плотностью, близкой к окружающей жидкости (рисунок 4.1, а), то при ламинарном режиме движения подкрашенная струйка будет выделяться, не смешиваясь с основным потоком, по всей длине трубы.

Если же постепенно увеличивать расход, то при некоторой большей скорости траектория струйки становится волнистой (рисунок 4.1, б, в). Если после этого еще более увеличивать скорость, то подкрашенная струйка полностью рассеивается в основной массе движущегося потока (рисунок 4.1, г-е). Это показывает, что ламинарный режим переходит в **турбулентный** – это хаотичное течение с интенсивным перемешиванием жидкости и пульсацией скоростей и давлений.

Рейнольдс установил, что критерием режима движения жидкости является безразмерная величина - **число Рейнольдса**.

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

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

Ламинарный режим наиболее вероятен при малых скоростях течения и 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 – это величина, пропорциональная отношению сил 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.

В общем случае, при движении жидкости в прямых круглых трубах на участках, достаточно удаленных от входа, и при отсутствии различных возмущающих условий установлено критическое число Рейнольдса

$$Re_{кр} = 2300.$$

Эта величина существенно зависит от условий входа потока в трубу и условий движения жидкости к этому входу, шероховатости стенок и других случайных факторов.

Исследования показывают, что при числах Рейнольдса  $Re = 2000 \dots 4000$  возможно существование как ламинарного, так и турбулентного режима движения жидкости и периодически происходит смена режимов – это **переходной режим** или перемежающаяся турбулентность.

Т.о. более точно считать при  $Re < 2000$  ламинарное движение является устойчивым: всякого рода искусственная турбулизация потока и его возмущения (сотрясение трубы, введение в поток колеблющегося тела и др.) гасаются влиянием вязкости, и ламинарный режим течения жидкости снова восстанавливается.

При  $Re > 4000$ , наоборот, турбулентный режим устойчив, а ламинарный не устойчив.

При неравномерном движении жидкости значения верхнего и нижнего критического числа Рейнольдса могут существенно отличаться.

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  $Re = 1600$ .

Для труб некруглой формы характерным линейным размером является **гидравлический радиус**  $R$  – это отношение площади живого сечения (перпендикулярного линиям тока) к его смоченному периметру

$$R = \frac{S}{\chi}.$$

**Смоченным периметром** называется линия соприкосновения жидкости с твердыми стенками. При напорном движении (под избыточным давлением) смоченный периметр равен полному периметру живого сечения (рис. 4.2, а)  $\chi = \pi \cdot D$ . При безнапорном движении (при наличии свободной поверхности) смоченной является только часть периметра поперечного сечения потока  $\chi = b + 2 \cdot h$  (рис. 4.2, б).

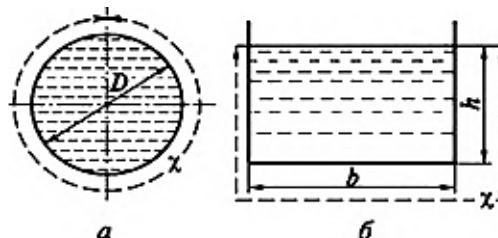


Рисунок 4.2 – Смоченный периметр для круглого напорного (а) и прямоугольного безнапорного (б) сечения

Число Рейнольдса для любой формы поперечного сечения определяется по формуле

$$Re = \frac{v \cdot R}{\nu} \text{ или } Re = \frac{v \cdot d_{\text{э}}}{\nu},$$

где  $d_{\text{э}} = 4 \cdot R$  - эквивалентный (гидравлический) диаметр.

От режима движения жидкости зависят энергетические параметры потока. На рисунок 4.3 показаны эпюры скоростей в живом сечении потока жидкости в круглой трубе.

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  $v_{\text{ср}} = 0,5 \cdot v_{\text{max}}$ .

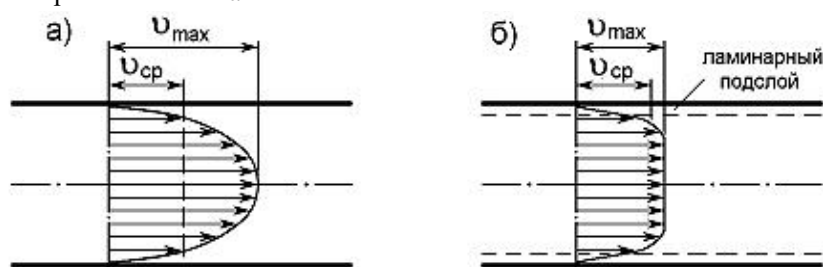


Рисунок 4.3 – Эпюры скоростей при ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах движения жидкости

Эпюра скоростей турбулентного режима имеет турбулизированное ядро потока с примерно одинаковыми средними скоростями. Лишь частицы жидкости, близко расположенные к стенке, испытывают тормозящее действие сил трения и образуют ламинарный подслой. В этом случае сопротивление трубопровода в наибольшей степени определяется шероховатостью стенок трубы и имеет квадратичную зависимость от скорости жидкости и числа Рейнольдса. Средняя скорость потока  $v_{\text{ср}}$  несколько меньше  $v_{\text{max}}$ .

Неравномерность распределения скоростей в поперечном сечении потока характеризует **коэффициент Кориолиса  $\alpha$**

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

Минимальное значение коэффициента Кориолиса равно 1 в случае течения идеальной жидкости. Для реальных жидкостей  $\alpha = 1,05\text{--}1,13$  при турбулентном режиме и  $\alpha = 2$  при ламинарном режиме.

#### 4.2 Описание опытной установки

Опытная установка (рисунок 4.4) 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.

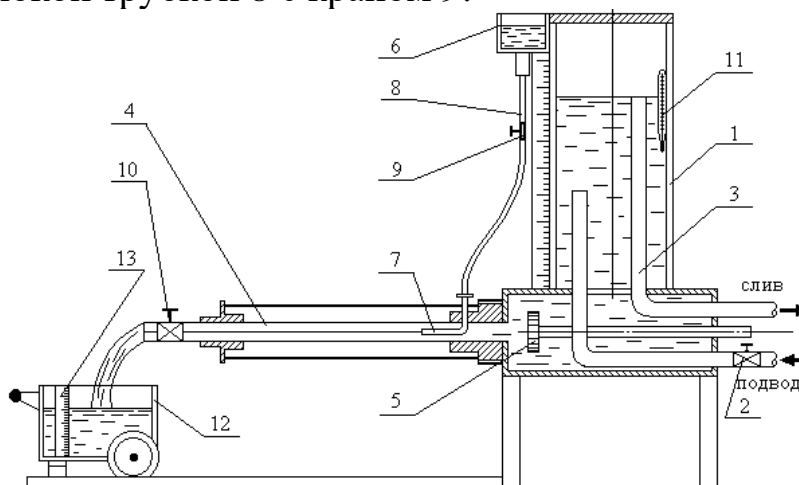


Рисунок 4.4 – Схема опытной установки

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.

#### 4.3 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.
- 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.
- 6) Постепенным открытием крана 10 увеличивается скорость течения в трубке 4 и все измерения повторяются.
- 7) При последующем открытии крана 10 будет наблюдаться устойчивый турбулентный режим с интенсивным перемешиванием красителя с водой. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

#### 4.4 Обработка опытных данных

По результатам замеров производится расчет требуемых величин по формулам.

- 1) Расход воды

$$Q = V / t = \text{_____} \text{ см}^3/\text{с},$$

где  $V$  – измеренный объем воды;  $t$  – время опыта.

- 2) Средняя скорость движения воды

$$v_{\text{ср}} = Q / S_{\text{п}} = \text{_____} \text{ см/с},$$

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

- 3) Кинематический коэффициент вязкости воды

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

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

- 4) Число Рейнольдса

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

- 5) Максимальная скорость воды в трубопроводе (только для ламинарного режима)

$$v_{\text{max}} = L / t_{\text{ср}} = \text{_____} \text{ см/с},$$

где  $t_{\text{ср}} = t_i / n = \text{_____}$  с – среднее время прохождения частицами воды контрольного участка;

$L = \text{_____}$  - длина контрольного участка, см.

- 6) Коэффициент Кориолиса

$$\alpha = \frac{v_{\max}}{v_{\text{cp}}} = \underline{\hspace{10cm}}.$$

Результаты измерений и вычисления записываются в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. - Результаты измерений и расчетов

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

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

#### 4.5 Контрольные вопросы

- 1) Что такое ламинарный режим движения жидкости?
- 2) Чем он характеризуется ламинарный режим движения жидкости?
- 3) Что такое турбулентный режим движения жидкости?
- 4) Чем он характеризуется турбулентный режим движения жидкости?
- 5) Когда наиболее вероятен ламинарный режим течения жидкости?
- 6) Когда наиболее вероятен турбулентный режим течения жидкости?
- 7) Формула числа Рейнольдса для круглых труб.
- 8) В чем заключается физический смысл числа Рейнольдса?
- 9) Что такое критическое число Рейнольдса?
- 10) Чему равно критическое число Рейнольдса для разных случаев?
- 11) Какой режим течения жидкости называется переходным?
- 12) В каких пределах чисел Рейнольдса могут одновременно существовать ламинарный и турбулентный режимы?
- 13) Формула числа Рейнольдса для любой формы поперечного сечения жидкости.
- 14) Что такое гидравлический радиус?
- 15) Что такое смоченный периметр?
- 16) Как зависит число Рейнольдса от скорости движения жидкости?
- 17) Каким образом распределяются скорости по живому сечению потока при ламинарном режиме движения?
- 18) Каким образом распределяются скорости по живому сечению потока при турбулентном режиме движения?
- 19) Что такое коэффициент Кориолиса?
- 20) Как определяется и чему равен коэффициент Кориолиса?
- 21) Опишите схему опытной установки.
- 22) В какой последовательности производится опыт?
- 23) По какой формуле определяется кинематический коэффициент вязкости?
- 24) Как определяется максимальная скорость воды в трубопроводе?