

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра автоматизации технологических процессов
и производств**

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ГИДРОПРИВОДА

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности 23.05.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

УДК 665.6.65 (073)

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ГИДРОПРИВОДА: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Кускова Я.В.* СПб, 2021. 30 с.

Приведены методические указания для лабораторных работ по курсу «Основы гидравлика и гидропривода».

Предназначены для студентов специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» специализации «Автомобильная техника в транспортных технологиях».

Научный редактор проф. *В.Ю. Бажин*

Рецензент *А.С. Ракипов* (ООО «ТОМС-Инжиниринг»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ГИДРОПРИВОДА

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности 23.05.01*

Сост. *Я.В. Кускова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой автоматизации технологических процессов и производств

Ответственный за выпуск *Я.В. Кускова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 16.06.2021 . Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,7. Усл.кр.-отт. 1,7. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 75 экз. Заказ 606.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Методика выполнения лабораторных работ.....	6
Работа 1. Исследование режимов движения жидкости	8
Работа 2. Исследование закономерностей свободного падения тел в физических средах.....	17
Работа 3. Экспериментальное изучение прямого гидравлического удара в напорном трубопроводе	24
Библиографический список.....	29

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Основы гидравлики и гидропривода» содержит нескольких разделов. Гидравлика – раздел дисциплины, в которой изучаются законы равновесия и движения несжимаемой жидкости. Знания гидравлики необходимо для успешного усвоения второго раздела – гидроприводов. Гидравлические приводы– раздел дисциплины, при изучении которой студенты знакомятся с принципами действия, расчетом, областью применения и эксплуатацией различных гидравлических машин и гидроприводов.

Цель изучения дисциплины – развитие у студентов способности самостоятельно решать в будущей инженерной деятельности многочисленные вопросы, непосредственно связанные с работой различных гидравлических устройств, ориентироваться в производственных условиях их работы и находить в зависимости от условий соответствующие технические решения.

Теоретическую базу гидравлики составляют физика, высшая математика и гидромеханика.

Эксперимент является неотъемлемой частью гидравлических исследований. Особенно большое значение эксперимент приобретает при рассмотрении задач, связанных с таким движением жидкости, которое не поддается теоретической схематизации. Например, для потоков в некоторых местных сопротивлениях и в каналах гидравлических машин.

При изучении такого курса как «Основы гидравлики и гидропривода», весьма важно ознакомить студентов на практике (в лабораториях) с методикой экспериментальных гидравлических исследований напорных трубопроводов и гидротехнических сооружений, конструкциями насосов, гидроприводов и методами их испытаний. Для этой цели в основном и предназначен предполагаемый лабораторный практикум.

Выполнение описанных в практикуме лабораторных работ по «Основам гидравлики и гидропривода», позволяет студентам глубже понять физическую сущность основных законов гидромеханики, получить реальное представление о возможностях гидромашин и гидроприводов для механизации и автоматизации производственных процессов и технологий в области избранной ими

специальности, а также разобраться в принципах работы гидроприводов и освоить методы их испытаний в соответствии с требованиями государственных стандартов.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Методика выполнения лабораторной работы сводится к следующему:

- Выполняется изучение теоретических основ выбранной работы, ознакомление с описанием и принципом действия лабораторной установки или стенда, целью и порядком выполнения экспериментов, формой таблицы для записи и обработки получаемых данных, основными расчетными формулами и контрольными вопросами.
- Выполняется подготовка протокола выполняемой работы по следующей форме:
 1. Номер и название лабораторной работы. Фамилия, И. О. и № группы исполнителя
 2. Теоретическая часть.
 3. Схема экспериментальной установки и ее состав.
 4. Цель и порядок выполнения работы (заполняется после проведения экспериментов на установке или стенде).
 5. Результаты измерений и вычислений. Форма таблицы принимается в соответствии с формой, приведенной в руководстве по выполняемой работе.
 6. Основные расчетные формулы. Приводятся формулы необходимые для расчета таблицы.
 7. Вкладыш из миллиметровой бумаги для графического представления результатов работы.
 8. Вывод по работе. Заполняется после полного завершения и обработки работы и представляет самостоятельную оценку и анализ проведенного исследования.

Цель предлагаемых лабораторных работ - изучить проявления основных законов гидравлики, ознакомиться на практике с характеристиками гидравлических приводов, а также получить элементарные навыки по экспериментальному изучению гидравлических процессов, включая знакомство с основными измерительными приборами и способами обработки экспериментальных данных.

До начала работы студент должен усвоить её содержание, ознакомиться с описанием лабораторной установки и понять физические процессы, происходящие в ней, а также заготовить бланк отчёта, в котором должны быть приведены: схема лабораторной установки, её основные параметры, необходимые для последующих расчётов, расчётные формулы и таблица для записи величин с обязательным указанием единиц измерения.

После проверки готовности студента к лабораторной работе, преподаватель даёт разрешение на её проведение. Необходимую консультацию можно получить у преподавателя.

РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Общие сведения

Экспериментальным путём установлено, что существует два принципиально различных режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный. Ламинарным называется упорядоченное слоистое движение жидкости без поперечного перемешивания и пульсаций скорости и давления. Ламинарный режим может установиться при движении очень вязких жидкостей: глицерина, минеральных масел, нефти, мазута. Он наблюдается в тонких капиллярных трубках: при фильтрации воды в порах грунта и системах объемного гидропривода, например в добычном комбайне.

Турбулентным называется хаотичное, крайне нерегулярное движение жидкости. Оно сопровождается активным поперечным перемешиванием, пульсациями скорости и давления. Примерами турбулентного режима движения является течение воды в реках и каналах, системах отопления и водоснабжения, центробежных насосах и турбинах. Турбулентный режим наблюдается в трубах, по которым движутся бензин, керосин, спирты, кислоты и другие маловязкие жидкости.

Первые систематические опыты по определению режимов движения жидкости осуществил английский физик Осборн Рейнольдс. Характер потока жидкости или газа - ламинарный или турбулентный - определяется безразмерным числом, зависящим от скорости потока, вязкости и плотности жидкости и характерной длины элемента потока.

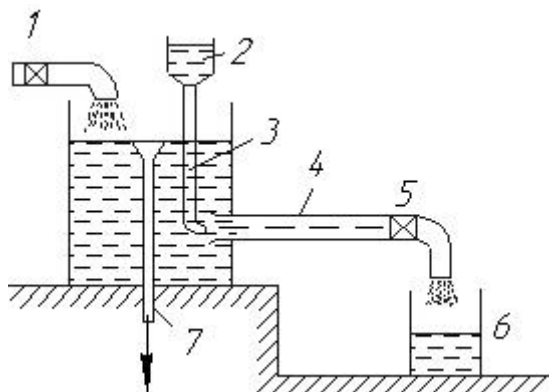


Рис.1.1 Принципиальная схема установки Рейнольдса

Установка работает следующим образом: вода поступает через стеклянные трубки разного диаметра, скорость движения воды регулируется в них кранами 1 и 5 (рис. 1.1). По тонкой трубке 3 с заостренным концом ко входу в стеклянную трубку 4 подводится окрашенная жидкость из сосуда 2. Средняя скорость в трубке 4 площадью сечения ω определялась по объему воды V , поступившей в сосуд 6 за время t :

$$v = \frac{V}{\omega t} \quad (1.1)$$

При постоянном напоре (для его поддержания была использована сливная труба 7), краска, при малых скоростях движения воды в трубке 4, движется в ней в виде тонкой струйки, не перемешиваясь с водой. После достижения определенной для данных условий опыта средней скорости движения воды, когда движение частиц жидкости приобретает как бы беспорядочный характер, струйка краски начинает размываться, отчего вся вода в трубке окрашивается.

Таким образом, поток жидкости в трубке может характеризоваться двумя режимами:

- 1) ламинарным (параллельно струйным)
- 2) турбулентным (беспорядочным).

Опыты показали, что режим движения в трубе круглого сечения можно оценить по величине значения безразмерного соотношения, называемого числом Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{v^4 R_r}{\nu} = \frac{vd}{\nu} \quad (1.2)$$

где v - средняя скорость движения жидкости; R_r - гидравлический радиус потока, d - диаметр трубы; ν - соответственно кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Число Рейнольдса характеризует соотношение сил инерции и вязкости в потоке. Число Рейнольдса, соответствующее переходу от турбулентного режима к ламинарному, называется нижним критическим числом Рейнольдса и обозначается $Re_{кр.н.}$. В круглых трубах $Re_{кр.н.} = 2000 - 3000$. Число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного движения к турбулентному, называется верхним критическим числом Рейнольдса $Re_{кр.в.}$. Верхнее критическое число Рейнольдса изменяется в широком диапазоне $Re_{кр.в.} \approx 4000 - 13800$. Исключая случайные возмущения, в лабораторных условиях удавалось сохранить ламинарный режим при числах Рейнольдса $Re > 13800$.

В диапазоне $Re_{кр.н.} < Re < Re_{кр.в.}$ в зависимости от условий течение жидкости может быть ламинарным или турбулентным. Однако ламинарный режим в этой области крайне неустойчив и легко переходит в турбулентный.

Для практических расчётов круглых напорных труб можно полагать, что при значениях $Re < 2300$ - режим ламинарный, а при $Re > 2300$ - режим турбулентный.

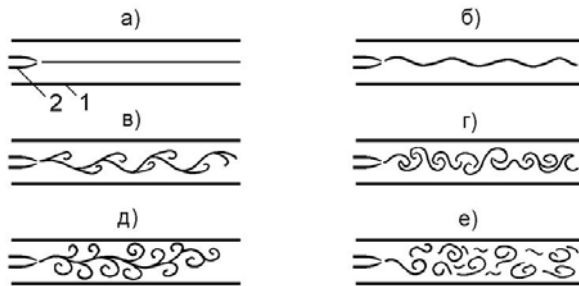


Рис. 1.2. Иллюстрации режимов течения жидкости

Цель работы:

1. Определить режимы движения жидкости методом визуализации картин течения на установке Рейнольдса.
2. Определить режим движения по значениям критерия Рейнольдса.

Схема лабораторной установки:

Описание установки (рис 1.3) включает в себя две расположенные горизонтально трубы: стеклянную 1 ($d=1,6$ см) и винипластовую 2 ($d=0,9$ см), в которых и изучается движение воды при различных режимах, напорный бак 3, емкость 11 с раствором красителя, подаваемого открытием крана 10 по трубке 9 во входное сечение трубы 1. Для измерения расхода воды в трубах 1 и 2 служат мерная емкость 16 и секундомер 15.

Вода в напорный бак 3 подается по питающему трубопроводу 4 открытием вентиля 5 из резервуара лаборатории. Для поддержания уровня воды в баке 3 во время опытов на постоянной отметке имеется переливное устройство 6, для контроля за уровнем воды служит электрический уровнемер 7 со световой сигнализацией. Температура воды в баке 3 измеряется термометром 8.

Регулирование расхода воды, а, следовательно, и средней скорости ее движения в трубах 1 и 2, осуществляется кранами соответственно 14 и 13. На винипластовой трубе 2 имеются пьезометры 12 для определения потерь напора по длине h_e (по разности их показаний).

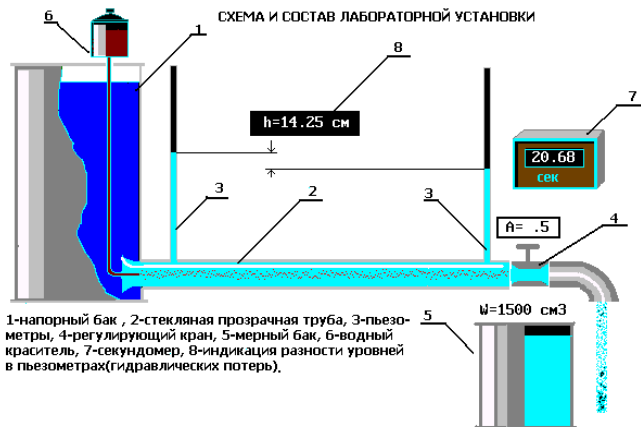


Рис. 1.3. Схема опытной установки

Порядок выполнения работ и обработка опытных данных:

1. Открыть вентиль 5 на трубопроводе 4 и наполнить водой бак 3 настолько, чтобы переливное устройство 6 начало работать, после чего вентиль 5 прикрыть.

2. Открыть незначительно кран 14 на стеклянной трубе 1 ,чтобы скорость движения воды в ней была небольшой (вода из трубы 1 должна течь тонкой струйкой).

3. Приоткрыть краник на трубке 9 и подать из емкости 11 в трубу 1 небольшое количество раствора красителя, чтобы окрашенная струйка воды представляла собой отчетливо выраженную нить по всей длине трубы.

4. Измерять с помощью мерного сосуда 16 и секундомера 15 расход воды Q в трубе. При этом измеряемый объем воды в сосуде 16 должен быть также, чтобы время наполнения составляло не менее 20...30 секунд.

5. Измерить температуру воды в баке 3 термометром 8.

6. Результаты измерений записать в табл.1.1.

Увеличить открытием крана 14 скорость движения воды в трубе 1, но так, чтобы окрашенная струйка жидкости сохранялась,

т.е. чтобы режим остался ламинарным, и выполнив те же измерения, что и в первом опыте, записать их результаты в табл.1.1.

Дальнейшим увеличением открытия крана 14 создать в трубе 1 турбулентный режим (об этом будет свидетельствовать интенсивное перемешивание с водой раствора красителя, подачу которого следует увеличить, чтобы эффект был ярче) и выполнить третий и четвертый опыты так, как описано выше. После чего закрыть краник 10 и кран 14. Результаты измерений записать в табл.1.4.

Открыть кран 13 на винипластовой трубе 2 так, чтобы разность показаний пьезометров 12 составляла не более 0,3 см и измерить расход воды и ее температуру. Результаты измерений записать в табл.1.5.

10. Сделать ещё девять аналогичных опытов, увеличивая в каждом после дующем опыте открытие крана 13 так, чтобы разность показаний пьезометров 12 (потеря напора по длине h_e) при этом возрастала примерно в 1,5...1,6 раза. Результаты измерений записать в таблицу 1.5.

11. Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицами 1.1 и 1.2.

12. Построить в масштабе по данным таблицы 1.2 график $\lg h_e = f(\lg v)$ и определить с его помощью критическую

скорость $v_{кр}$, а через неё и $R_{e_{крон}} = \frac{v_{кр} \cdot d}{\nu}$, а также показатели

степени m_n и m_m и коэффициенты пропорциональности B_n и B_m .

13. Дать заключение по результатам работы.

Таблица 1.1

№ позиций	Наименование и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений			
			Ламинарный режим		Турбулентный режим	
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	2	3	4	5	6	7
1	Объём воды в мерном сосуде W	см ³				
2	Время наполнения объёма t	с				
3	Расход воды $Q = W/t$	см ³ /с				
4	Внутренний диаметр стеклянной трубы d	см				
5	Площадь попереч. сечения трубы $\omega = \pi d^2/4$	см ²				
6	Средняя скорость движения воды $v = Q/\omega$	см/с				
7	Температура воды	°C				
8	Кинематический коэффициент вязкости воды ν (по справочнику)	см ² /с				
9	Число Рейнольдса $R_{e_d} = \frac{v \cdot d}{\nu}$	-				
10	Критическое число Рейнольдса $R_{e_{кр(d)сп}}$ (по справочнику)	-				

Таблица 1.2

№ позиций	Наименование и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений										
			Номера опытов										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	Объём воды в мерном сосуде W	см ³											
2	Время наполнения t	с											
3	Расход воды $Q = W/t$	см ³ /с											
4	Внутренний диаметр трубы d	см											
5	Площадь попереч. сечения трубы $\omega = \pi d^2/4$	см ²											
6	Средняя скорость потока $v = Q/\omega$	см/с											
7	Логарифм средней скорости $\lg v$	-											
8	Отметка уровня воды в пьезометре 1, ∇_1	см											
9	Отметка уровня воды в пьезометре	см											
10	Потеря напора по длине $h_e = \nabla_1 - \nabla_2$	см											
11	Логарифм потерь напора по длине $\lg h_e$	-											
12	Температура воды	°C											
13	Кинематический коэффициент вязкости воды ν (по справочнику)	см ² /с											

Основные контрольные вопросы:

1. Назовите режимы движения жидкости и укажите их характерные особенности.
2. Поясните, что такое критерий Рейнольдса, и назовите факторы, от которых он зависит.
3. Поясните, что такое критическое число Рейнольдса?
4. Поясните, каким образом при гидравлических расчётах определяют режим движения жидкости и, с какой целью?
5. Поясните, что такое критическая скорость, от каких факторов она зависит и как её определяют?
6. Напишите и поясните аналитические зависимости потерь напора по длине от средней скорости потока при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.
7. Изобразите график зависимости потерь напора по длине от средней скорости (в логарифмических координатах) и дайте пояснения к нему

РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛ В ФИЗИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Общие сведения

Падение (осаждение) - один из основных видов движения тел в гидравлических процессах. Свободное падение - это падение единичного тела в неограниченном пространстве среды или падение массы тел при небольшой объемной концентрации твердого ($\lambda < 0,1$). Под объемной концентрацией твердого понимают отношение объема падающих тел к объему всей взвеси. При свободном падении тела испытывают сопротивление только со стороны среды - гидродинамическое (при падении в воде) или аэродинамическое, (при падении в воздухе).

Максимальная постоянная скорость, которую при данных условиях может иметь определенное тело при свободном падении, называется конечной скоростью свободного падения. Условно её обозначение обычно V_0 . Такая скорость достигается в момент, когда движущая сила становится равной силе сопротивления среды. Поскольку последняя не является постоянной величиной, а зависит, в свою очередь, от скорости падения и от режима движения среды, для расчета конечной скорости падения используют несколько частных формул, которые для тел правильной сферической формы приведены в табл.2.1.

Область применения отдельных формул определяется безразмерным первым параметром Лященко $Re^2\psi$ (пределы его изменения также приведены в табл.2.1). Значение параметра $Re^2\psi$ рассчитывается по формуле

$$Re^2 \psi = \frac{G_0 \Delta}{\mu^2} \quad (2.1)$$

$$Re^2 \psi = \frac{G_0}{\nu^2} \quad (2.2)$$

где Re – число Рейнольдса; ψ - коэффициент сопротивление; G_0 – вес тела в среде (сила тяжести); ν - коэффициент кинематической вязкости, значение его для воды при разной температуры приведена в прил.1; $\nu = \mu/\Delta$; Δ - плотность среды; μ -

коэффициент динамической вязкости

Вес тела в среде:

$$G_0 = \frac{4\pi d^3}{6}(\rho - \Delta)g \quad (2.3)$$

где ρ - плотность падающего тела; g - ускорение свободного падения,

$$g=9,81 \text{ м/с}^2$$

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd\Delta}{\mu} \quad (2.4)$$

или

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.5)$$

Диаграмма Рейля (рис.2.1) представлена в логарифмической сетке в виде плавной кривой для всего диапазона изменения функции ψ от Re . Плавный вид кривой указывает на постепенный переход от ламинарного режима движения к турбулентному. Основные закономерности падения шаров в жидкости справедливы и для несферических частиц с поправками на влияние их формы.

График зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для шаров имеет четыре характерные области:

1. Область малых чисел Рейнольдса ($Re < 1$), иначе ламинарная область, где коэффициент сопротивления уменьшается обратно пропорционально Re . На рис.2.1 этот участок представлен прямой линией с угловым коэффициентом, равным единице.

2. Переходная область ($1 < Re < 10^3$), где коэффициент сопротивления убывает медленнее, чем в первой области, постепенно приближаясь к постоянной величине. Хотя коэффициент сопротивления уменьшается, сила сопротивления при этом непрерывно растет.

3. Турбулентная область ($10^3 < Re < 10^5$), в которой коэффициент сопротивления является приблизительно постоянной величиной.

4. Кризисная область ($10^5 < Re < 10^6$), в которой при $Re \approx (2 \div 3)10^5$ происходит резкое падение коэффициента

сопротивления.

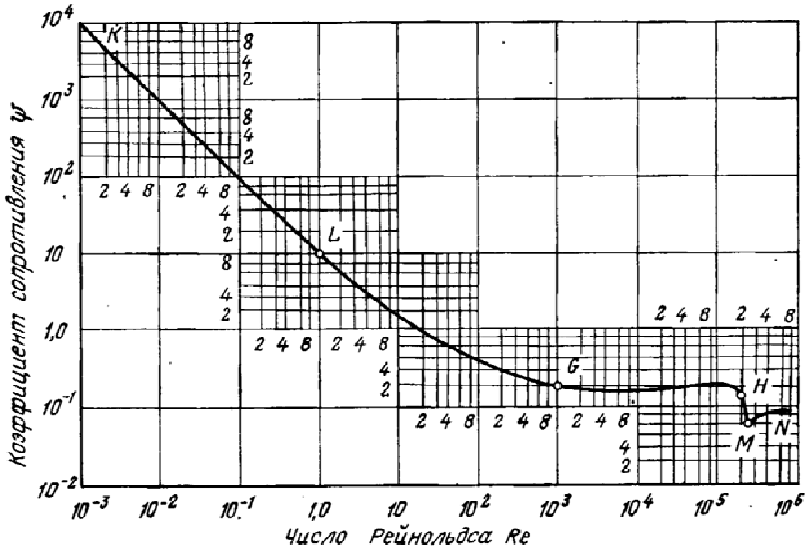


Рис. 2.1 Диаграмма Рейля

Также для расчета скорости может быть применен графический метод Лященко – Шиллера – Наумана: по формуле (2.1) рассчитывают первый параметр Лященко $Re^2 \psi$. Пользуясь графиком – диаграммой Лященко, показывающей зависимость $Re_s^2 \psi_s = f(Re_s)$. Рис. 2.1. По найденному значению $Re^2 \psi$ определяют Re и по нему, используя формулу (2.5), вычисляют скорость $V_0 = Re v / d$.

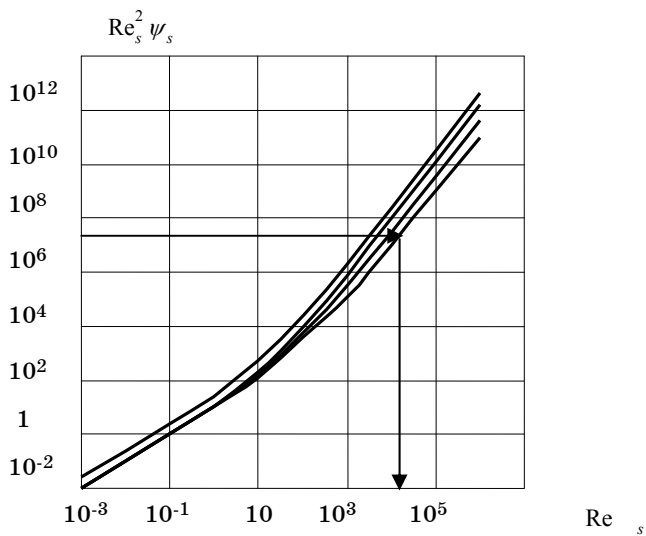


Рис. 2.2 Диаграмма Лященко

Цель работы

1. Определить значение параметра $Re^2 \psi$ и выбрать частную формулу для расчета конечной скорости падения V_0 .
2. Определить конечную скорость падения V_0 .

Таблица 2.1

Формулы для расчета конечных скоростей свободного падения

Область применения	Формула скорости	По числу Re		По $Re^2\psi$	
		от	до	от	до
Ламинарное движение (область Стокса)	$V_0 = 0,545d^2\delta v^{-1}$	0	0,5	0	$5,25$
Переходная область (формула Антонычева-Нагирняка)	$V_0 = \frac{v}{d} (\sqrt{20,4 + 2,95\sqrt{Re^2\psi}} - 4,52)^2$	0,5	$3 \cdot 10^3$	$5,25$	$1,4 \cdot 10^6$
Турбулентное движение (область Ньютона-Риттенгера)	$V_0 = 5,75d^{0,5} \left(\frac{\rho - \Delta}{\Delta}\right)^{0,5}$	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^7$
Турбулентное движение (область Ньютона-Риттенгера)	$V_0 = 5,26d^{0,5} \left(\frac{\rho - \Delta}{\Delta}\right)^{0,5}$	$2 \cdot 10^4$	10^6	$7 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^9$

Порядок выполнения работ и обработка опытных данных:

Первый и второй параметры Лященко используются для отнесения частиц к тому или иному диапазону по крупности, что позволяет использовать ту или иную частную формулу для расчета конечной скорости свободного падения (или размера частицы по известной конечной скорости падения).

Порядок расчета скорости следующий: вычисляем $Re^2\psi$ по формуле (2.1); выбираем частную формулу по таблице 2.1 и рассчитываем скорость. Коэффициент вязкости зависит от температуры и определяется, например, по справочнику.

При определении скорости падения минеральных зерен (тел

неправильной формы) в формуле для расчета V_0 необходимо вводить коэффициент формы P :

$$V_{0_{\text{зерна}}} = PV_0 \quad (2.6)$$

где $V_{0_{\text{зерна}}}$ - конечная скорость свободного падения минерального зерна; V_0 - конечная скорость свободного падения шара, равнообъемного зерну, т.е. за крупность зерна принимают его эквивалентный диаметр по объему.

Коэффициент формы определяют опытным путем или рассчитывают по эмпирическим формулам в зависимости от коэффициента сферичности χ : для мелких зерен

$$P_1 = \sqrt{\chi} \quad (2.7)$$

для крупных зерен

$$P_2 = \sqrt{\frac{1,5\chi}{8,95 - 7,4\chi}} \quad (2.8)$$

Значения коэффициента формы, рассчитанные по формулам (2.7) и (2.8). Соответствующие поправки на форму зерна вводят при расчете коэффициента равнопадаемости и его крупности по известной скорости падения.

Графический метод определения скорости падения тел правильной несферической формы аналогичен применяемому для шаров. Рассчитывают параметр $Re_s^2 \psi_s$. По его значению с помощью графика (рис.2.2) для заданной формы находят значение Re_s , после чего искомая скорость определяется по формуле

$$V_0 = Re_s v / d_s \quad (2.9)$$

Таким образом, алгоритм вычисления конечной скорости падения тел правильной несферической формы следующий: определяют $Re_s^2 \psi_s$, выбирают формулу для расчета (при $350 < Re_s^2 \psi_s < N$ используют графический метод), рассчитывают

скорость. Для нахождения эквивалентного диаметра частицы по заданной конечной скорости падения можно пользоваться, как и для шаров, графиком, причем значение второго параметра Лященко рассчитывают по формуле:

$$\frac{\Psi_s}{Re_s} = \frac{\pi g (\rho - \Delta) \chi^{3/2}}{6 v_0^3 \Delta} v \quad (2.10)$$

Основные контрольные вопросы:

1. Какова графическая зависимость коэффициента сопротивления Ψ от числа Рейнольдса Re при свободном падении?
2. Описать характерные области на диаграмме Реелея.
3. Как изменяется скорость свободного падения частиц во времени?
4. Охарактеризовать следующие понятия: эквивалентный диаметр, гидравлическая крупность, коэффициент сферичности, равнопадающие частицы.
5. Дайте определение коэффициента сопротивления среды. В чем он выражается?
6. Какова область применения формул Риттингера, Аллена и Стокса по определению конечной скорости падения?
7. В чем заключается метод определения конечной скорости падения (по Лященко)?
8. Как влияют форма зерен и температура среды на скорость их падения?

РАБОТА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Общие сведения

Гидравлическим ударом называется изменение (повышение или понижение) давления в напорном трубопроводе при резком изменении скорости движения жидкости (например, в результате резкого закрытия или открытия затвора).

Повышения давления при гидравлическом ударе может быть настолько большим, что способно привести к разрыву трубопровода.

При быстром закрытии затвора сначала остановится не вся масса жидкости, заключенная в трубопроводе, а лишь часть ее, находящаяся непосредственно перед затвором (рис.3.1). Это происходит благодаря инерции и упругим свойствам жидкости и материала трубы (остановившаяся масса жидкости несколько сжимается, труба расширяется, а давление в жидкости резко возрастает). Затем повышение давления весьма быстро распространяется по трубопроводу от затвора к резервуару. Скорость распространения повышения давления называют скоростью распространения ударной волны C . После того как во всем трубопроводе давление повысится, жидкость начнет выходить из зоны повышенного давления обратно в резервуар и давление в трубопроводе начнет понижаться. Затем в зону пониженного давления снова пойдет жидкость из резервуара и давление снова повысится. Благодаря упругим свойствам жидкости и стенок трубопровода этот процесс довольно быстро затухает. Наиболее опасным является первое повышение давления.

Ударная волна пройдет по всему трубопроводу (от затвора до резервуара) за время $t = l/d$ (здесь l – длина трубопровода). Время одного цикла, включающего повышение и понижение давления, называются фазой удара $T = 2l/d$

Если время закрытия t_3 затвора меньше или равно фазе удара T ($t_3 \leq T$), удар называется прямым.

Удар может возникнуть, например, при внезапном выключении насоса, подающего воду по нагнетательному трубопроводу в

резервуар. Жидкость после выключения насоса по инерции некоторое время будет двигаться, и в трубопроводе возникнет пониженное давление. Затем начнется обратное движение жидкости из резервуара в область пониженного давления в трубопроводе и давление здесь повысится подобно тому как это наблюдалось при прямом ударе.

Из изложенного ясно, что параметры движения жидкости при гидравлическом ударе изменяются с течением времени. Следовательно, при гидравлическом ударе движение жидкости является неустановившимся.

Для определения повышения давления Δp при прямом гидравлическом ударе Н. Е. Жуковским в 1898 г. предложена формула :

$$\Delta p = \rho C v \quad (3.1)$$

где ρ - плотность жидкости;

C - скорость распространения ударной волны;

v - средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до закрытия затвора(при установившемся движении).

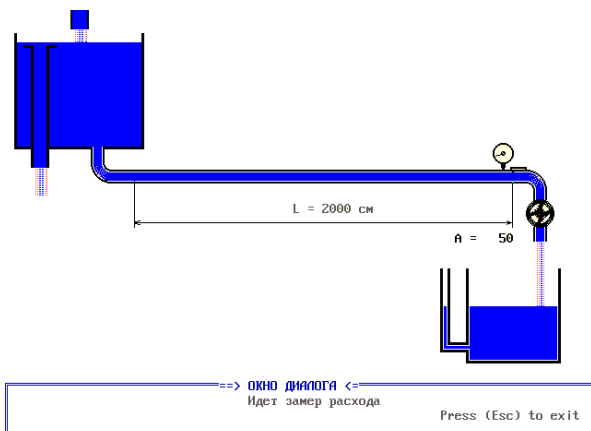


Рис. 3.1 Лабораторная установка

Величину C вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{E_{жс}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{жс} d}{E_{тр} \delta}}}, \quad (3.2)$$

где $\sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho}} = C_{зв}$ - скорость звука в жидкой среде (для воды

$C_{зв} \approx 1425$ м/с; $E_{ж}$ и $E_{тр}$ – модули упругости соответственно жидкости и материала трубопровода (для воды $E_{в} \approx 1,96 \cdot 10^9$ Па, для стали $E_{тр} \approx 1,96 \cdot 10^{11}$ Па);

d - внутренний диаметр трубопровода;

δ - толщина стенки трубопровода.

Цель работы:

Определить опытным путем величину повышения давления Дроп при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе, сравнить ее с величиной Δp , вычисленной по формуле Н. Е. Жуковского (см. формулу 3.1), и подсчитать относительное отклонение.

Схема лабораторной установки:

Установка (см. рис. 3.1) состоит из горизонтального стального трубопровода 3, присоединенного к напорному резервуару 2, в котором уровень воды во время опытов поддерживается на постоянной отметке с помощью переливного устройства I. конце трубопровода 3 имеется вентиль 6 для регулирования скорости движения воды в нем, клапанный затвор 5, позволяющий практически мгновенно перекрывать трубопроводу пружинный манометр 4, с помощью которого измеряется давление в жидкости до и в момент закрытия затвора.

Для измерения расхода воды служит мерный бак 12 снабженный водомерной трубкой 9 со шкалой 10, и секундомер 8.

Порядок выполнения работы и обработка опытных данных

1. Измерить по манометру 4 давление в трубопроводе 3 до удара (при закрытом вентиле 6) и результаты измерения записать в таблицу 3.1.

2. Открыв (неполностью) вентиль 6, обеспечить пропуск по трубопроводу 3 некоторого расхода воды.

3. Измерить расход воды Q с помощью мерного бака 12 и секундомера 8. При этом измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров.

4. Перекрыть затвором 5 трубопровод 3 и измерить по манометру 4 величину максимального давления при ударе.

5. Записать в таблицу 3.1. полученные при измерениях данные.

6. Сделать еще два аналогичных опыта при других расходах воды.

7. Обработать опытные данные так, как указано в таблице 3.1.

8. Дать заключение по результатам работы.

Основные контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятия гидравлического удара.

2. Прямой и непрямой гидравлический удар.

3. Что такое фаза удара?

4. Объясните процесс изменения давления в трубопроводе, питаемом из резервуара, при прямом гидравлическом ударе.

5. Напишите и поясните формулу Н. Е. Журавского для определения повышения давления при ударе.

6. Напишите и поясните формулу для определения скорости распространения ударной волны.

Таблица 3.1

№ поз.	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. Изм.	Результаты измерений и вычислений		
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1	2	3	4	5	6
1	Внутренний диаметр трубопровода d	М			
2	Толщина стенки трубопровода δ	М			
3	Площадь поперечного сечения трубопровода $\omega = \pi d^2/4$	м ²			
4	Объем воды в мерном баке W	м ³			
5	Время наполнения объема t	С			
6	Расход воды в трубопроводе Q = W/t	М ³ /с			
7	Средняя скорость движения воды в трубопроводе (до удара) V = Q/ω	м/с			
8	Скорость распространения ударной волны	м/с			
	$C = \frac{1425}{\sqrt{1 + E_g d / E_{Tp} \cdot \delta}}$				
9	Повышение давления при ударе по формуле Н. Е. Жуковского Δp = ρCV	Па			
10	Давление в трубопроводе до удара (по манометру) p ₁	Па			
11	Наибольшее давление в трубопроводе при ударе (по опытам) Δp _{он} = p ₂ - p ₁	Па			
12	Повышение давления при ударе (по опытам) Δp _{он} = p ₂ - p ₁	Па			
13	Относительное отклонение	%			
	$\Delta_{\Delta p} = \frac{\Delta p - \Delta p_{on}}{\Delta p} \cdot 100$				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кошман В.С.* Гидравлика / В.С. Кошман, И.П. Машкарева. Пермь: Пермская ГХСА, 2013, 152 с.
2. *Проценко Г.Г.* Лабораторные работы по курсу «Гидравлика». Челябинск: Издательский центр ЧИПС, 2004, 36 с.
3. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасови др. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
4. *Большаков В.А., Попов В.Н.* Гидравлика. Общий курс: Учебник для вузов. Киев: Высшая школа. Головное издательство, 1989. 215 с.
5. *Штеренлихт Д.В.* Гидравлика: Учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1984. 640 с.
6. *Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И.* Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: В 2 ч. Ч.1. Общие законы. М.: Высшая школа, 1987. 304 с.
7. *Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И.* Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: В 2 ч. Ч.2. Специальные вопросы. М.: Высшая школа, 1987. 431 с.
8. *Богомолов А.И., Михайлов К.А.* Гидравлика: Учебник для гидротехнических специальностей вузов. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
9. *Кисилёв П.Г.* Гидравлика. Основы механики жидкости: Учебное пособие для студентов гидротехнических специальностей вузов. М.: Энергия, 1980. 360 с.
10. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач: Учебное пособие для машиностроительных вузов / О.В. Байбаков, Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова и др. М.: Машиностроение, 1974. 416 с.
11. Лабораторный практикум по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводам: Учебное пособие для студентов вузов / С.М. Казарям, А.Ш. Барекян, Д.Д. Скубаренко, А.К. Чельшев. Ереван: Луйс, 1984. 319 с.
12. *Яковлева Л.В.* Практикум по гидравлике: Учебное пособие для учащихся с.-х. техникумов. М.: Агропромиздат, 1990. 144 с.

13. *Башта Т.М.* Объёмные насосы и гидравлические приводы гидросистем. М.: Машиностроение, 1974. 607 с.
14. *Гавриленко Б.А., Семичастнов И.Ф.* Гидродинамические передачи. М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
15. *Гидравлика и гидропривод / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Г. Боруменский, А.М. Заря.* М.: Недра, 1981. 295 с.
16. *Коваль П.В.* Гидравлика и гидропривод горных машин. М.: Машиностроение. 1979. 319 с.
17. *Данилов Ю.А., Кирилловский Ю.А., Колпаков Ю.Г.* Аппаратура объёмных гидроприводов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
18. *Руднёв С.С., Подвидз Л.Г.* Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач. М.: Машиностроение, 1974. 416 с.
19. *Васильев Б.А., Герцев Н.А.* Гидравлические машины. М.: Агропромиздат, 1988. 272 с.
20. *Пономаренко Ю.Ф.* Испытание гидропередач. М.: Машиностроение, 1969. 292 с.
21. *Докукин А.В.* и др. Радиально-поршневые гидромоторы многократного действия. М.: Машиностроение, 1980. 288 с.
22. *Васильченко В.А.* Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 301 с.
23. *Соколов Е.Я., Зингер Н.М.* Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.