



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)

Кафедра «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы»

***Лабораторная (практическая) работа №4В***

по дисциплине «Экспериментальная гидромеханика судна»

**«ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, УСТАНОВЛЕНИЕ  
ЗАКОНОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА»**

Выполнил(а) студент(ка) группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Проверил: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Отметка о выполнении практической части работы	Отметка о защите

Ростов-на-Дону, 20\_\_

## Лабораторная работа 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

#### 1. Теоретическая часть.

При описании физических процессов, обуславливающих сопротивление воды движению судна, и в практических расчетах ходкости, основанных на результатах испытаний моделей и натурных судов, возникает необходимость использования критериев подобия. Для обеспечения механического подобия судна и его модели необходимо выполнение трех видов подобия — *геометрического, кинематического и динамического*.

*Геометрическое подобие* соблюдается, когда соответствующие линейные размеры модели ( $L_M, B_M, T_M$ ) и натурного судна ( $L_N, B_N, T_N$ ) находятся в постоянном соотношении:

$$L_N/L_M = B_N/B_M = T_N/T_M = k, \quad (1)$$

где  $k$  — геометрический масштаб.

Для соответствующих площадей натурны и модели отношение равно квадрату масштаба, а для соответствующих объемов — кубу масштаба:

$$\Omega_N / \Omega_M = k^2; V_N / V_M = k^3, \quad (2)$$

*Кинематическое подобие* соблюдается в том случае, когда сходственные точки геометрически подобных судна и модели проходят подобные отрезки траекторий в течение промежутков времени  $\Delta t$ , находящихся в постоянном отношении:

$$\Delta t_N / \Delta t_M = \tau, \quad (3)$$

где  $\tau$  — масштаб времени.

Соотношение скоростей в сходственных точках при кинематическом подобии постоянно:

$$V_N / V_M = k / \tau, \quad (4)$$

*Динамическое подобие* соблюдается, когда при наличии кинематического подобия отношение масс сходственных объемов постоянно:

$$D_N / D_M = X. \quad (5)$$

Для описания основных закономерностей сопротивления воды движению судов используются безразмерные критерии динамического подобия потоков жидкости — **число Фруда  $Fr$**  и **число Рейнольдса  $Re$** .

**Число Фруда** характеризует отношение инерционных сил к силам тяжести. В динамически подобных случаях движения числа Фруда равны между собой. Это означает, что картины волнообразования двух судов при равных числах Фруда будут геометрически подобны, силы, вызванные волнообразованием, будут относиться как  $\kappa^3$ , а моменты, как  $\kappa^4$ . Число Фруда является также мерой относительной скорости судна, которая выражается соотношением скорости  $v$  набегающего потока на значительном удалении впереди тела или скорости движения тела и одного из характерных размеров судна. Для водоизмещающих судов таким размером является длина по ватерлинии; для судов с динамическим поддержанием, у которых в процессе движения длина по ватерлинии изменяется, используют значение ширины  $B$  (преимущественно для глиссеров) и, в наиболее универсальной форме, корень кубический из объемного водоизмещения  $\sqrt[3]{V}$ . При исследовании движения на мелководье характерной величиной является глубина воды  $H$ . Исходя из конкретной ситуации используют различные формы записи числа Фруда:

$$Fr_L = v / \sqrt{gL}; Fr_B = V / \sqrt{gB}; Fr_V = v / \sqrt{g \sqrt[3]{V}}; Fr_H = v / \sqrt{gH}. \quad (5.7)$$

**Число Рейнольдса** характеризует отношение инерционных сил к силам вязкостной природы:

$$Re = vL / \gamma, \quad (6)$$

где  $v$  — скорость судна, м/с;  $L$  — длина, м;  $\gamma$  — кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с

В динамически подобных системах числа Рейнольдса равны между собой. При этом картины вихреобразования и пограничные слои будут геометрически подобны. Вместе с тем необходимо учитывать, что в реальных условиях помимо числа Рейнольдса на картине обтекания существенно сказываются шероховатость поверхности тела и начальная турбулентность потока.

Полное динамическое подобие явлений *ходкости* достигается для рассматриваемых надводных судов при условии одновременного равенства чисел Фруда и чисел Рейнольдса. Однако это достижимо только в случае полного равенства модели и натуре, т. е.  $\kappa = 1$ . Поэтому обычно ограничиваются частичным подобием — по числу Фруда или по числу Рейнольдса. Первое обеспечивают при определении ходкости надводных судов, второе — при изучении движения глубоко под поверхностью воды рулей, выступающих частей и других тел. По числу Рейнольдса обеспечивают также подобие для судов, движущихся с малыми скоростями — в доволновых режимах.

В лабораторной работе, исследование режимов течения жидкости будет производиться на виртуальном стенде-модели в трубопроводе.

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что движение жидкости может происходить или при ламинарном, или при турбулентном режиме. Ламинарный режим наблюдается при небольших скоростях движения. При этом окрашенные струйки жидкости не перемешиваются, сохраняясь по всей длине потока, т.е. движение жидкости при ламинарном режиме является струйчатым, перемешивание частиц жидкости отсутствует.

Турбулентный режим наблюдается при значительных скоростях и характеризуется интенсивным перемешиванием частиц жидкости, что обуславливает пульсацию скоростей и давления.

Средняя скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется критической ( $v_{кр}$ ). Величина ее, как показывают опыты в трубопроводах круглого сечения, зависит от рода жидкости, характеризуемого динамической вязкостью  $\mu$  и плотностью  $\rho$ , а также от диаметра трубопровода  $d$ . Одновременно опытами установлено, что величина безразмерного алгебраического комплекса, отвечающего критической скорости  $v_{кр}$ :

$$Re_{кр(d)} = \frac{v_{кр} \rho d}{\mu} = \frac{v_{кр} d}{\nu} \approx 2320 = const, \quad (7)$$

от  $\mu$ ,  $\rho$  и  $d$  не зависит.

$Re_{кр(d)}=2320$ , называется критическим числом Рейнольдса. Устойчивый ламинарный режим наблюдается при значениях числа Рейнольдса

$Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu} < Re_{кр(d)} \approx 2320$ , а турбулентный – при

$Re_{(d)} > Re_{кр(d)} \approx 2320$ . Таким образом, **число Рейнольдса**

$$Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu} \quad (8)$$

является критерием, позволяющим судить о режиме движения жидкости в круглой трубе, работающей полным сечением.

Величину  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , входящую в формулы (1) и (2), называют кинематическим коэффициентом вязкости жидкости.

Из изложенного следует, что для определения режима движения жидкости в круглом трубопроводе при напорном движении достаточно вычислить по формуле (2) число Рейнольдса и сравнить его с критическим.

Знание режима движения жидкости необходимо для правильной оценки потерь напора при гидравлических расчетах. Как показывают опыты в круглых трубах при напорном равномерном движении (результаты их

представлены на рис.1 в виде графика зависимости потерь напора по длине  $h_l$  от средней скорости  $U$ ), при ламинарном режиме потери напора  $h_l$  пропорциональны средней скорости  $U$  в первой степени, а при турбулентном - в степени  $1,75 \leq m \leq 2$ . Заметим, что с помощью этого графика определяют величину критической скорости  $U_{кр}$ , а через нее - и критическое число Рейнольдса по формуле (1).

**Описание установки.** Установка включает в себя расположенную горизонтально стеклянную трубу ( $d=1,0$  см), в которой и изучается движение воды при различных режимах, напорный бак, емкость с раствором красителя, подаваемого открытием краника по трубке во входное сечение стеклянной трубы. Для измерения расхода воды в стеклянной трубе служат мерная емкость и секундомер.

Вода в напорный бак подается по питающему трубопроводу открытием вентиля из резервуара лаборатории. Для поддержания уровня воды в напорном баке во время опытов на постоянной отметке имеется переливное устройство. Температура воды в напорном баке измеряется термометром.

Регулирование расхода воды, а следовательно и средней скорости ее движения в стеклянной трубе, осуществляется краном. На стеклянной трубе имеются пьезометры для определения потерь напора по длине  $h_l$  (по разности их показаний).

## 2. Цель работы:

1. Убедиться на опыте путем окрашивания струйки воды в стеклянной трубе в существовании ламинарного и турбулентного режимов.

2. Вычислить по данным опытов, проведенных на этой трубе, числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах, сравнить их с критическим, убедиться, что при ламинарном режиме  $Re < Re_{кр}$ , а при турбулентном –  $Re > Re_{кр}$ .

3. Построить по опытным данным график  $lgh_l=f(lg U)$ , определить с его помощью критическую скорость  $U_{кр}$ , а через нее вычислить критическое число

$$Re_{кр(d)} = \frac{U_{кр} d}{\nu}.$$

4. Подтвердить с помощью графика  $lgh_l=f(lg U)$ , что при ламинарном режиме потери напора по длине  $h_l$  пропорциональны средней скорости в первой степени, а при турбулентном - в степени  $1,75 \leq m \leq 2$ .

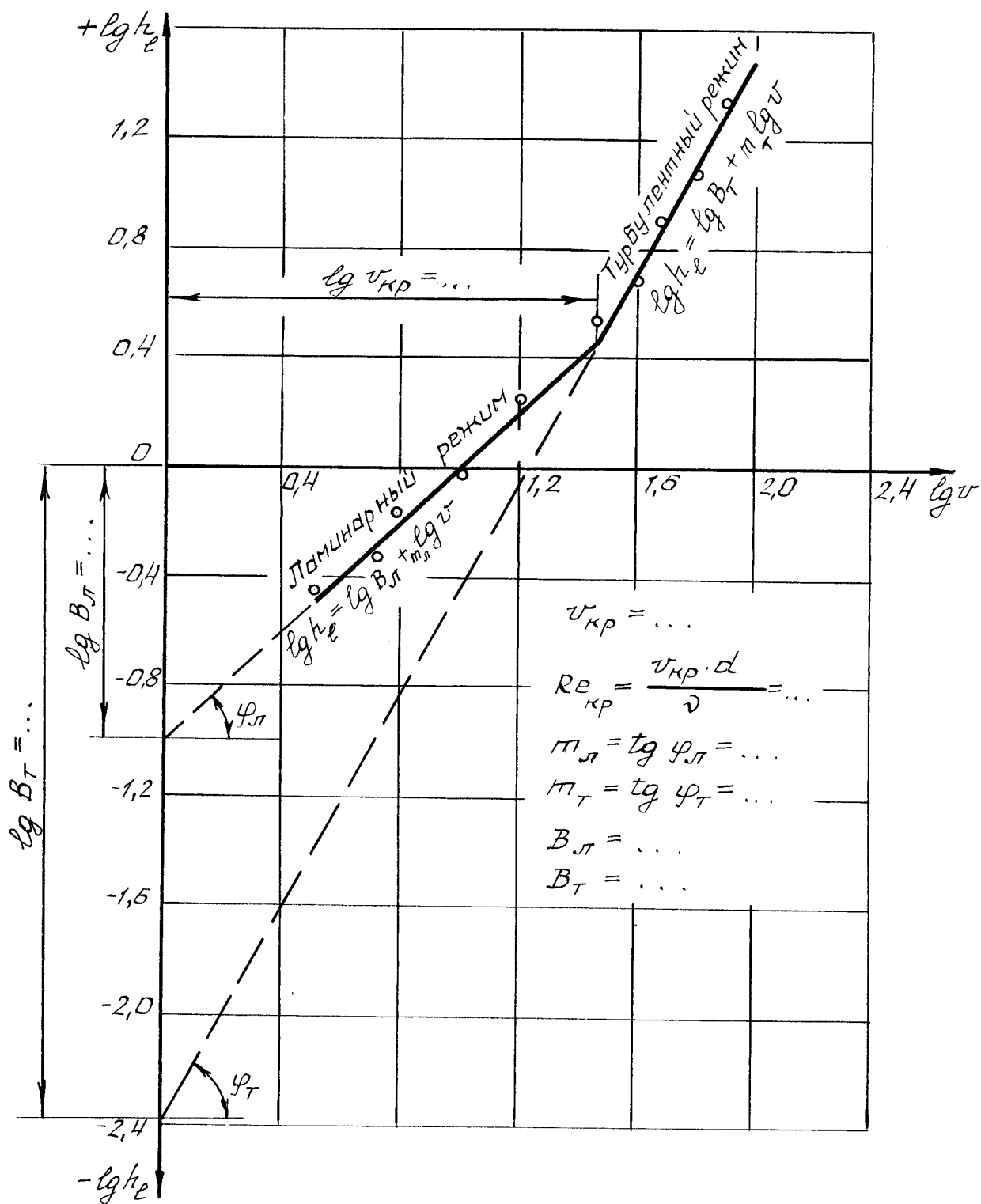


Рис.7. График зависимости потери напора по длине  $h_l$  от средней скорости  $U$  в логарифмической форме

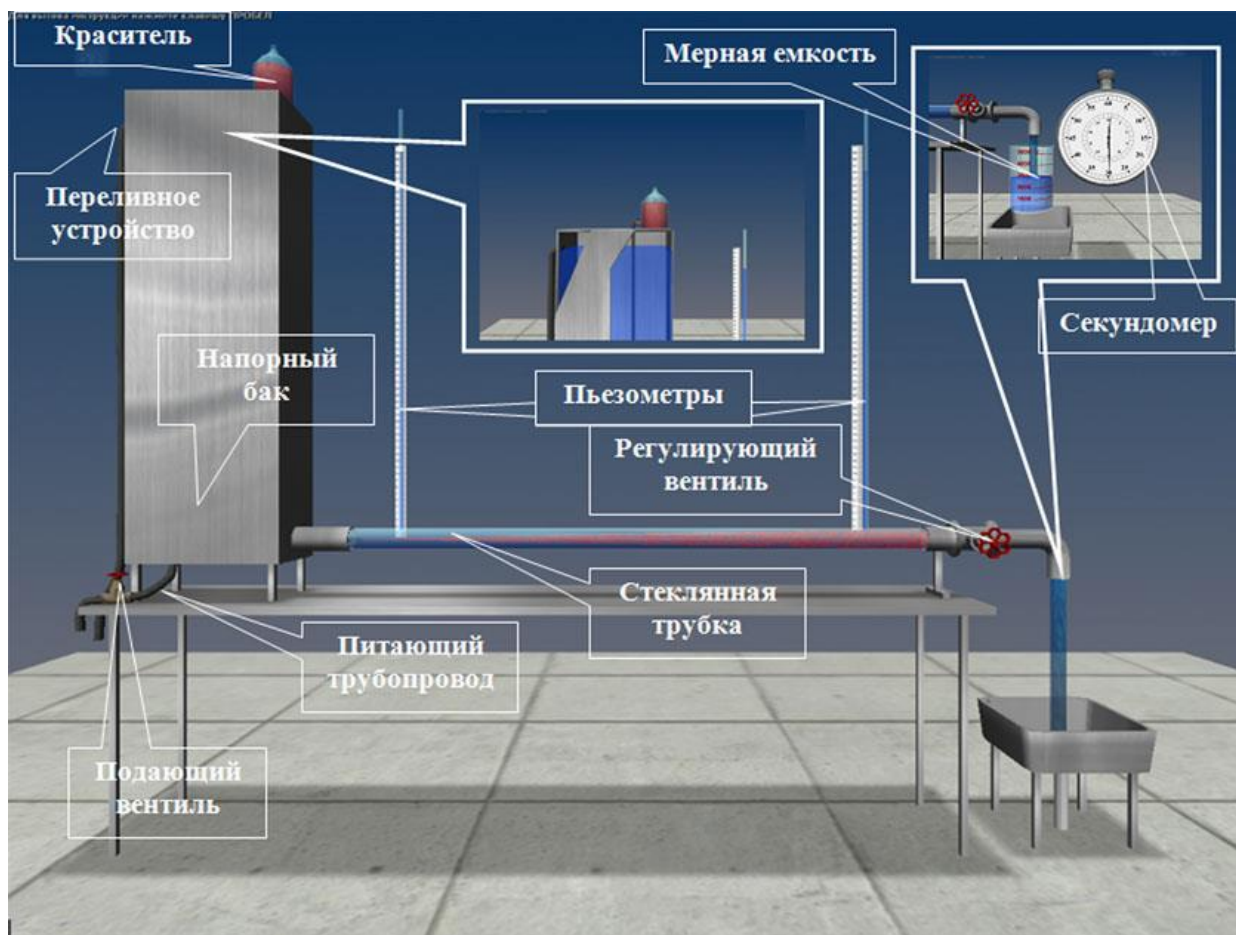


Рис.8. Схема установки для изучения режимов движения жидкости.

### 3. Порядок выполнения работы.

1. Открыть подающий вентиль на питающем трубопроводе и наполнить водой напорный бак настолько, чтобы работало переливное устройство.
2. Открыть незначительно регулирующий вентиль на стеклянной трубке, чтобы скорость движения воды в ней была небольшой (вода должна течь тонкой струйкой).
3. Приоткрыть краник на емкости с красителем и направить в стеклянную трубку небольшое количество раствора красителя, чтобы окрашенная струйка воды представляла собой отчетливо выраженную нить по всей длине трубы.
4. Измерить с помощью мерной емкости и секундомера расход воды  $Q$  в трубе.
5. Измерить температуру воды в напорном баке термометром.
6. Результаты измерений записать в таблицу 1.
7. Увеличить открытием регулирующего вентиля скорость движения воды в стеклянной трубке, 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 таблицу 1.
8. Дальнейшим увеличением открытия регулирующего вентиля со-

здать в стеклянной трубке турбулентный режим (об этом будет свидетельствовать интенсивное перемешивание с водой раствора красителя) и выполнить третий и четвертый опыты так, как описано выше. Результаты измерений записать в таблицу 1.

9. Для заполнения таблицы 2 сделать десять аналогичных опытов, увеличивая в каждом опыте открытие регулирующего вентиля в диапазоне от 0 до 100% так, чтобы 4-5 замеров были выполнены в ламинарном режиме, а 5-6 - в турбулентном. Результаты измерений записать в табл. 2.

10. Выполнить все вычисления, предусмотренные табл. 1 и 2.

11. Построить в масштабе по данным табл. 2 график  $lgh_l = f(lgv)$  и определить с его помощью критическую скорость  $v_{кр}$ , а через неё и

$Re_{крон} = \frac{v_{кр} \cdot d}{\nu}$ , а также показатели степени  $m_l$  и  $m_T$  и коэффициенты пропорциональности  $B_l$  и  $B_T$ .

13. Дать заключение по результатам работы.

### Контрольные вопросы

1. Назовите критерии подобия используемые при описании сопротивления воды движению судна.
2. Поясните, что такое критерий Рейнольдса, и назовите факторы, от которых он зависит, и укажите, в чем заключается его физический смысл?
3. Поясните, что такое критерий Фруда, и назовите факторы, от которых он зависит, и укажите, в чем заключается его физический смысл?
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.
8. Поясните, почему график  $h_l = f(v)$  строят в логарифмических координатах?



Таблица 1. Результаты обработки экспериментальных данных

№ позиции	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Рез. измерений и вычислений			
			Ламин. режим		Турбул. режим	
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	2	3	4	5	6	7
1	Объём воды в мерном сосуде $W$	см <sup>3</sup>				
2	Время наполнения объёма $t$	с				
3	Расход воды $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с				
4	Внутренний диаметр стеклянной трубы $d$	см				
5	Площадь попереч. сечения трубы $\omega = \pi d^2/4$	см <sup>2</sup>				
6	Средняя скорость движения воды $v = Q/\omega$	см/с				
7	Температура воды $T$	°C				
8	Кинематический коэффициент вязкости воды $\nu$ (по справочнику)	см <sup>2</sup> /с				
9	Число Рейнольдса $Re_d = \frac{v \cdot d}{\nu}$	-				
10	Критическое число Рейнольдса $Re_{кр(d)спр}$ (по справочнику)	-				

## Вывод

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Таблица 2. Результаты обработки экспериментальных данных

№ пози- ций	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений							
			Номера опытов							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Объём воды в мерном сосуде $W$	см <sup>3</sup>								
2	Время наполнения $t$	с								
3	Расход воды $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с								
4	Внутренний диаметр трубы $d$	см								
5	Площадь попереч. сече- ния трубы $\omega = \pi d^2/4$	см <sup>2</sup>								
6	Средняя скорость потока $v = Q/\omega$	см/с								
7	Логарифм средней ско- рости $\lg v$	-								
8	Отметка уровня воды в пьезометре 1, $\nabla_1$	см								
9	Отметка уровня воды в пьезометре 2, $\nabla_2$	см								
10	Потеря напора по длине $h_l = \nabla_1 - \nabla_2$	см								
11	Логарифм потери напора по длине $\lg h_l$	-								
12	Температура воды $T$	°C								
13	Кинематический коэф- фициент вязкости воды $\nu$ (по справочнику)	см <sup>2</sup> /с								

### Учебная литература

1.(с.124...128, 140...144); 2.(с.147...152); 3.(с.62...65, с.69..72, с.82...84);  
4.(с.76...81); 5.(с.110...118).

## Перечень использованных информационных ресурсов

1. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления [Текст] / А.Д. Альтшуль. М.: Недра, 1982. 224 с.
2. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст] / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.
3. Богомолов, А.И. Гидравлика [Текст] / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
4. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений [Текст]: справочное пособие. М.: Энергия, 1988. 624 с.
5. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст]: учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 545 с.
6. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Б.Т. Емцев. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
7. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / И.Е. Идельчик. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
8. Казарян, С.М.. Лабораторный практикум по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводам [Текст]: учеб. пособие для вузов / С.М. Казарян, А.Ш. Барекян, Д.Д. Скубаренко, А.К. Челышев. Ер.: Луйс. 319 с.
9. Константинов, Н.М., Петров Н.Н., Высоцкий Л.И., Гидравлика, гидрология, гидрометрия [Текст]: учебник для вузов. В 2 ч. / Н.М. Константинов, Н.Н. Петров, Л.И. Высоцкий. Ч.1. М.: Высш. шк., 1987. 304 с. Ч. 2. М.: Высш. шк., 1987. 431 с.
10. Павловский, Н.Н. Гидравлический справочник [Текст] / Н.Н. Павловский. Л.-М.: ОНТИ, НКТП, 1937. 890 с
11. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1997. 312 с.
12. Чертоусов, М.Д. Гидравлика. Специальный курс [Текст] / М.Д. Чертоусов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 640 с.
13. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов [Текст] / В.Т. Чоу. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.
14. Чугаев, Р.Р. Гидравлика [Текст]: учебник для вузов В 2 кн. / Р.Р. Чугаев. Кн.1. М.: Энергоатомиздат, 1991. 351 с. Кн. 2. М.: Энергоатомиздат, 1991. 367 с.
15. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт. М.: Колос, 2006. 656 с.
16. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) : учебник / А. Д. Гиргидов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : ИНФРА-М, 2021. — 704 с. - ISBN 978-5-16-013367-6. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1136795>