электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 62-52

Экспериментальное определение коэффициента гидравлического сопротивления круглой трубы из нержавеющей стали

***Смыкалов М.В.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва МГТУ им. Н. Э. Баумана,
кафедра «Гидромашины, гидромеханика и гидропневмоавтоматика»

Научный руководитель: Ефремова К. Д.
кандидат технических наук, доцент кафедры
efr13ant@bmstu.ru

Введение

Цель работы: получить зависимость потерь напора на трение по длине трубы от расхода жидкости в трубе и зависимость коэффициента потерь напора на трение по длине трубы от числа Рейнольдса.

Для турбулентного течения жидкости характерно перемешивание её слоёв, пульсации скоростей и давлений. Турбулентное течение всегда является неустановившимся, так как значения скоростей и давлений, а также траектории частиц, изменяются по времени.

Распределение скоростей в поперечном сечении турбулентного потока существенно отличается от того, которое характерно для ламинарного течения. Если сравнить кривые распределения скоростей в ламинарном и турбулентном потоках в одной и той же трубе и при одном и том же расходе, то можно обнаружить существенное их различие (рис. 1). Распределение скоростей при турбулентном течении более равномерное, а нарастание скорости у стенки более крутое, чем при ламинарном течении, для которого характерен параболический закон распределения скоростей.

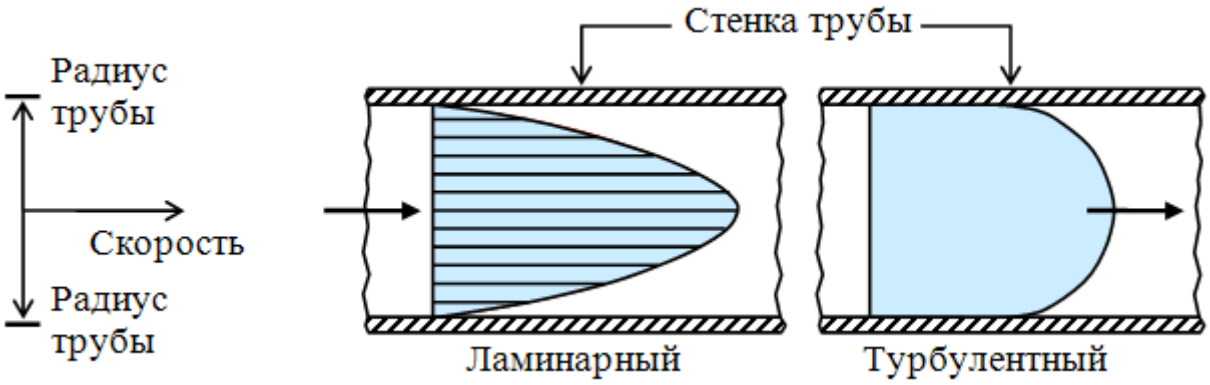


Рис. 1. Профили скоростей в ламинарном и турбулентном потоках

Потери энергии при турбулентном течении жидкости в трубах также получаются иными, нежели при ламинарном. В турбулентном потоке при $Re > Re_{KP}$ потери напора на трение по длине значительно больше, чем при ламинарном течении при тех же размерах трубы, расходе и вязкости жидкости, а, следовательно, при одинаковых числах Рейнольдса.

Если при ламинарном течении потеря напора на трение возрастает пропорционально скорости (расходу) в первой степени, то при переходе к турбулентному течению заметны некоторый скачок сопротивления и затем более крутое нарастание величины h_{TP} по кривой, близкой к параболе второй степени (рис. 2).

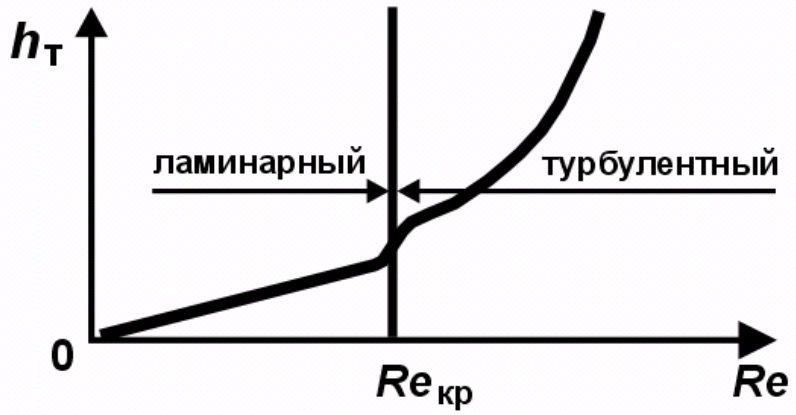


Рис. 2. Зависимость потерь напора на трение по длине трубы от числа Рейнольдса для ламинарного и турбулентного режима течения жидкости

В большинстве случаев для практических расчетов, связанных с турбулентным течением жидкостей в трубах, пользуются экспериментальными данными, систематизированными на основе гидродинамического подобия.

Основной расчетной формулой для потерь напора при турбулентном течении в круглых трубах является формула Вейсбаха-Дарси, имеющая следующий вид:

$$h_{TP} = \lambda_T \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\upsilon^2}{2 \cdot g}$$

где λ_T - коэффициент потерь на трение при турбулентном течении, или коэффициент Дарси.

Эта основная формула применима как при турбулентном, так и при ламинарном течении. Различие заключается лишь в значениях коэффициента λ. Из закона гидродинамического подобия следует, что коэффициент λ_T так же, как и $\lambda_Л$ должен быть функцией основного критерия подобия напорных потоков – числа Рейнольдса Re, а также может зависеть от безразмерного геометрического фактора – относительной шероховатости внутренней поверхности трубы, т.е. $\lambda_T = f(\mathrm{Re}, \Delta / d)$, где Δ - средняя высота бугорков шероховатости, d - диаметр трубы.

Когда шероховатость трубы не влияет на ее сопротивление (на λ_T), трубу называют гидравлически гладкой. Для этих случаев коэффициент λ_T является функцией лишь числа Рейнольдса: $\lambda_T = f_1(\mathrm{Re})$. Существует ряд эмпирических и полуэмпирических формул, выражающих эту функцию для турбулентного течения в гидравлически гладких трубах; одной из наиболее удобных и употребительных является формула П. К. Конакова

$\lambda_T = 1/(1.8 \cdot \lg \mathrm{Re} - 1.5)^2$,применимая при числе Re от Re_{KP} до Re, равного нескольким миллионам. При $2300 < \mathrm{Re} < 10^5$ можно пользоваться так же формулой Блазиуса:

$$\lambda_T = 0.316 / \sqrt[4]{\mathrm{Re}}$$

С увеличением числа Рейнольдса Re коэффициент λ_T уменьшается, однако это уменьшение гораздо менее значительно, чем при ламинарном течении (рис. 3). Это различие в законах изменения коэффициента λ_T связано с тем, что непосредственное влияние вязкости жидкости на сопротивление в турбулентном потоке гораздо меньше,

чем при ламинарном. Основную роль в образовании потерь энергии при турбулентном течении играют перемешивание и рассеивание кинетической энергии завихренных частиц.

К числу *гидравлически гладких* труб можно без большой погрешности отнести цельнотянутые трубы из цветных металлов (включая и алюминиевые сплавы), а также высококачественные бесшовные стальные трубы. Таким образом, трубы, употребляемые в качестве топливопроводов и гидросистем, в обычных условиях можно считать гидравлически гладкими и для их расчета пользоваться приведенными выше формулами. Водопроводные стальные и чугунные трубы гладкими нельзя считать, так как они обычно дают повышенное сопротивление, и формулы, приведенные выше, для них несправедливы.

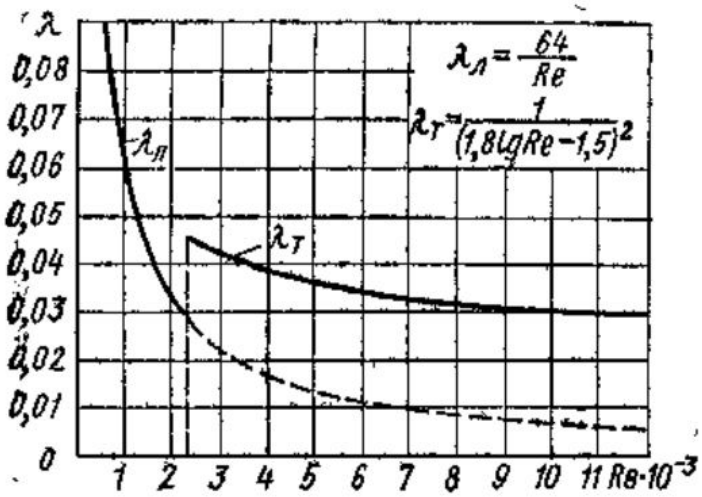


Рис. 3. Зависимость $\lambda_Л$ и $\lambda_Т$ от числа Re

Если для гидравлически гладких труб коэффициент потерь на трение вполне определяется числом Re, то для *шероховатых труб* $\lambda_Т$ зависит еще и от шероховатости внутренней поверхности трубы. При этом важен не абсолютный размер Δ бугорков шероховатости, а отношение этого размера к радиусу (или диаметру) трубы, т.е. так называемая относительная шероховатость Δ / d . Одна и та же абсолютная шероховатость может совершенно не оказывать влияния на сопротивление трубы большого диаметра, но способна значительно увеличить сопротивление трубы малого диаметра. Кроме того, на сопротивление влияет характер шероховатости. Простейшим случаем будет тот, когда все бугорки шероховатости имеют один и тот же размер Δ и одинаковую форму, т.е. при так называемой равномерно распределенной зернистой шероховатости. Таким образом, в этом случае коэффициент $\lambda_Т$ зависит как от Re, так и от отношения Δ / d :

$$\lambda_T = f(\mathrm{Re}, \Delta / d)$$

Характер влияния этих двух параметров на сопротивление труб отчетливо виден из графика (рис. 4), который является результатом опытов И. И. Никурадзе.

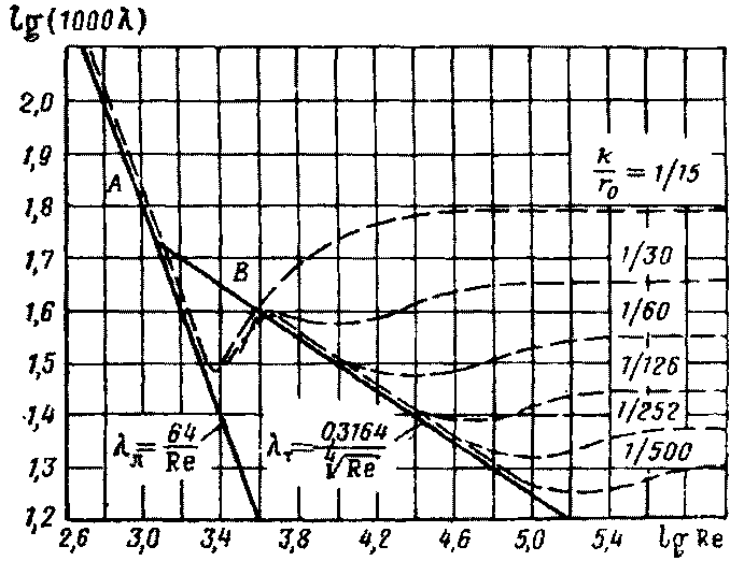


График И.И. Никурадзе

Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь напора на трение по длине трубы от числа Рейнольдса

Из рассмотрения графика можно сделать следующие основные выводы:

1. При ламинарном течении шероховатость на сопротивление не влияет; штриховые кривые, соответствующие различным шероховатостям, практически совпадают с прямой А.

2. Критическое число Re от шероховатости практически не зависит; штриховые кривые отклоняются от прямой А приблизительно при одном и том же Re_{KP}.

3. В области турбулентного течения, но при небольших Re и Δ / r_0 шероховатость на сопротивление не влияет; штриховые линии на некоторых участках совпадают с прямой В. Однако при увеличении Re это влияние начинает сказываться, и кривые для шероховатых труб начинают отклоняться от прямой, соответствующей закону сопротивления гладких труб.

4. При больших Re и больших относительных шероховатостях коэффициент λ_T перестает зависеть от Re и становится постоянным для данной относительной

шероховатости. Это соответствует тем участкам штриховых кривых, где они после некоторого подъема располагаются параллельно оси абсцисс.

Таким образом, для каждой из кривых, соответствующих шероховатым трубам при турбулентном течении, можно отметить следующие три области Re и Δ / r_0 отличающиеся друг от друга характером изменения коэффициента λ_T.

Первая область – область малых Re и Δ / r_0, где коэффициент λ_T от шероховатости не зависит, а определяется лишь числом Re; это область гидравлически гладких труб.

Во второй области коэффициент λ_T зависит одновременно от двух параметров - числа Re и относительной шероховатости.

Третья область – область больших Re и Δ / r_0, где коэффициент λ_T не зависит от Re, а определяется лишь относительной шероховатостью. Эту область называют областью автомодельности или режимом квадратичного сопротивления, так как независимость коэффициента λ_T от Re означает, что потеря напора пропорциональна скорости во второй степени:

$$h_{TP} = \lambda_T \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\upsilon^2}{2 \cdot g}$$

При увеличении Re толщина ламинарного слоя $\delta_Л$ уменьшается, поэтому для турбулентного потока при малых Re толщина ламинарного слоя больше высоты бугорков шероховатости, последние находятся внутри ламинарного слоя, обтекаются плавно (безотрывно) и на сопротивление не влияют. По мере увеличения Re толщина $\delta_Л$ уменьшается, бугорки шероховатости начинают выступать за пределы слоя и влиять на сопротивление. При больших Re толщина ламинарного слоя становится весьма малой, а бугорки шероховатости обтекаются турбулентным потоком с вихреобразованием за каждым бугорком; этим и объясняется квадратичный закон сопротивления, характерный для данной области.

График И. И. Никурадзе (рис. 4) позволяет построить примерную зависимость от Re допустимой шероховатости, т.е. такого максимального значения, при котором шероховатость трубы еще не влияет на ее сопротивление. Для этого следует взять те точки на графике в которых кривые для шероховатых труб начинают отклоняться от прямой В для гладких труб. Очевидно, что с увеличением Re значение допустимой шероховатости уменьшается.

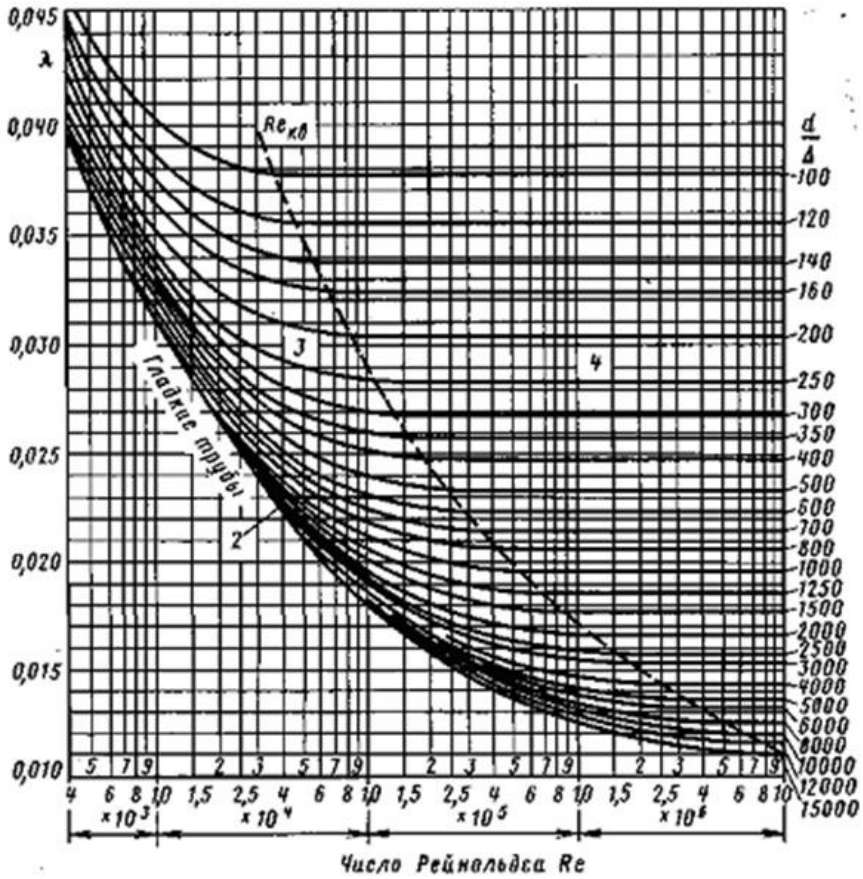


Рис. 5. Зависимость λ_T от Re для труб с естественной шероховатостью

Различие в характере кривых, представленных на рис. 4 и 5 объясняется тем, что в натурной трубе бугорки шероховатости имеют различную высоту и при увеличении числа Re начинают выступать за пределы ламинарного слоя не одновременно, а при разных Re. Ввиду этого переход от линии, соответствующей сопротивлению гладких труб к горизонтальным прямым, соответствующим квадратичному закону, происходит для натурных труб более плавно, без провала кривых, характерного для графика И. И. Никурадзе.

Исследование проводится на гидравлическом испытательном стенде. Исследуется ламинарный и турбулентный режим течения жидкости, изменение параметров с увеличением расхода жидкости через трубу.

Описание гидравлического стенда

Стенд гидравлический универсальный ТМЖ 2.

Технические характеристики стенда

Максимальная подача насоса, $м^3$/час (л/мин)	5 (83)
Максимальное давление на входе сменного модуля, кПа	128
Потребляемая мощность насоса, Вольт-Ампер	1500
Ёмкость питающего бака, литр	80
Рабочая жидкость	пресная вода
Установочная длина сменных модулей, мм	1100

Гидравлическая схема стенда представлена на рис.6.

Центробежный насос подаёт воду из бака Б1 через блок ротаметров БР в буферный (успокоительный) бак Б2. Из буферного бака вода поступает в исследуемый сменный модуль СМ. Для выпуска воздуха при заполнении буферного бака предназначена пластиковая трубка Тр1, перекрываемая металлическим зажимом. На панели пьезометров ПП установлено 17 стеклянных трубок, верхние концы которых выведены в коллекторы: путевые пьезометры с №1-№13 предназначены для измерения пьезометрических напоров в сечениях исследуемого сменного модуля; пьезометры №14 и №15 работают по дифференциальной схеме и предназначены для измерения разности пьезометрических напоров на мерной шайбе сменного модуля № 6; два крайних левых пьезометра постоянно подключены к мерной шайбе МШ, установленной в напорном коллекторе. В процессе проливки пьезометров их коллекторы соединяются с атмосферой посредством пластиковых трубок Тр2, Тр3 и Тр4, выведенных в сливную кювету Б3 и перекрываемых металлическими зажимами.

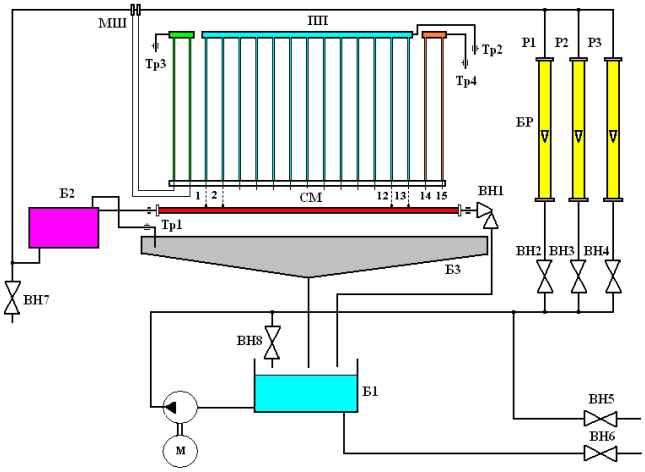


Рис. 6. Гидравлическая схема стенда ТМЖ 2

Регулирование расхода в сменном модуле осуществляется вентилями ВН2–ВН4 ротаметров и регулирующим дросселем ВН1, установленном на выходе сменного модуля. Максимальное значение расхода воды в системе при исследовании конкретного сменного модуля ограничивается байпасом ВН8. Для слива воды из системы предназначены вентили ВН5-ВН7. Сменный модуль устанавливается в кронштейнах над сливной кюветой.

Характеристики сменного модуля

Сменный модуль №1 представлен на рис. 7.

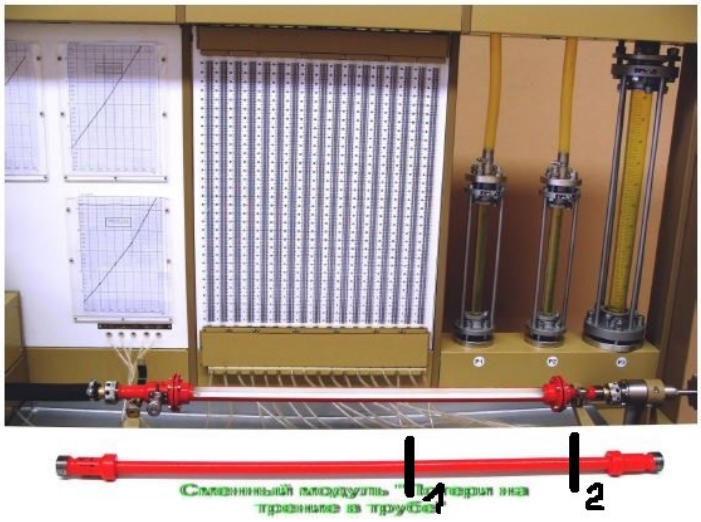


Рис. 7. Сменный модуль №1 «Потери на трение в трубе»

Модуль №1: круглая труба из нержавеющей стали с внутренним диаметром $d = 15(мм)$; длина контрольного участка $L = 301(мм)$ (расстояние между двумя сечениями). Рабочая жидкость –вода $\rho = 1000(кг/м^3)$.

Проведение эксперимента

В работе исследуется один сменный модуль – круглая труба из нержавеющей стали с внутренним диаметром $d = 15(мм)$; длина контрольного участка $L = 301(мм)$. Для контроля напора в сечениях присоединяются пластиковые трубки путевых пьезометров №1 и №2 к соответствующим штуцерам на сменном модуле. Увеличение расхода жидкости в сменном модуле от минимального до возможного максимального осуществляется ротаметрами Р1, Р2, Р3. Максимальный расход в трубе достигается одновременной работой трех ротаметров.

Методика проведения эксперимента

- Монтировать сменный модуль на стенд, надежно закрепив на кронштейнах монтажными хомутами (рис. 8).

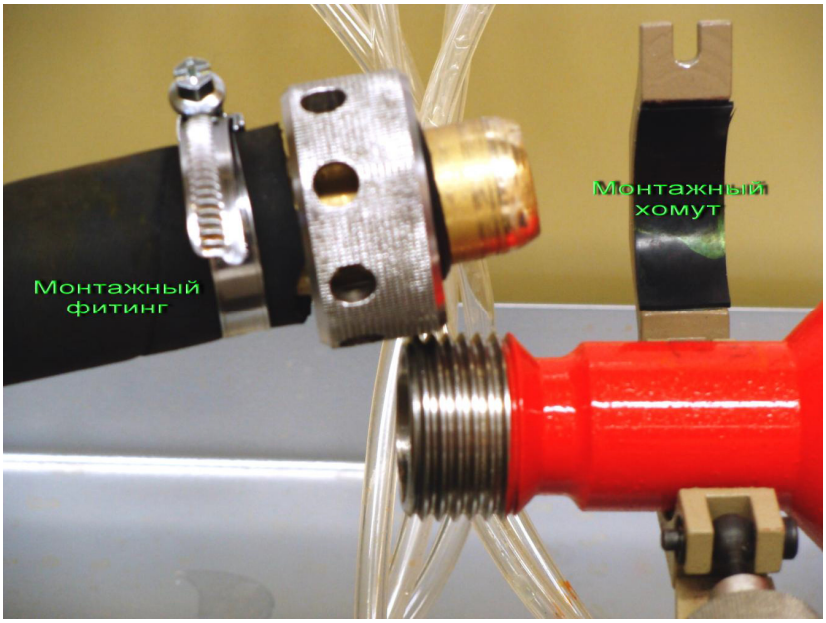


Рис. 8. Коммутация сменного модуля с буферным баком

- Подсоединить трубки пьезометров к штуцерам, соответствующим двум сечениям трубы. При этом строго соблюдать нумерацию пьезометров и контрольных сечений потока. *Пьезометры предназначены* для измерения пьезометрических напоров в сечениях исследуемой трубы.
- Перед запуском стенда полностью перекрыть вентили ротаметров Р1, Р2, Р3. Пережимать металлическими зажимами пластиковые трубки, соединяющие верхние свободные концы пьезометров с атмосферой, чтобы предотвратить переполнение пьезометров при запуске насоса и открытии ротаметров.
- Полностью открыть регулирующий дроссель сменного модуля (рис. 9).

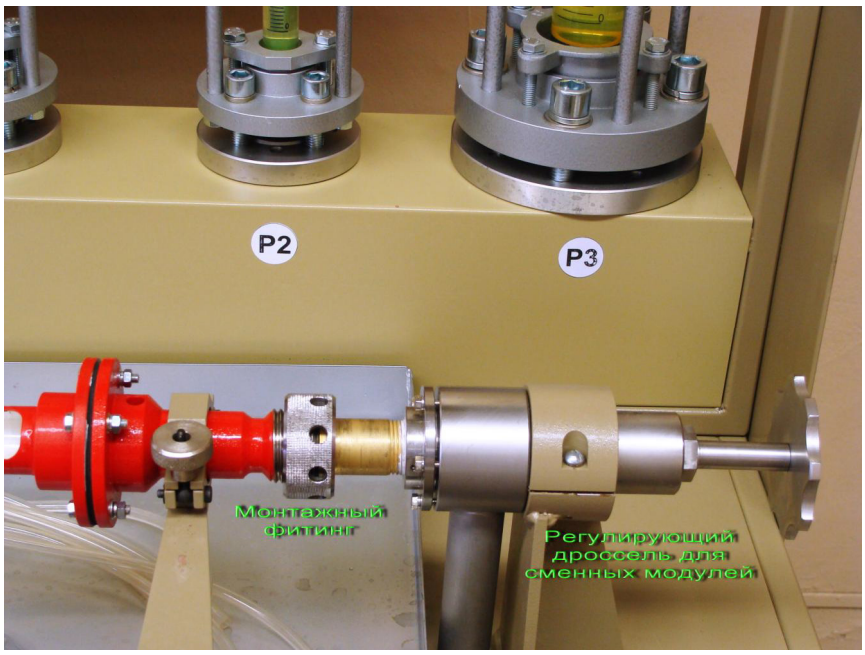


Рис. 9. Регулирующий дроссель

- Включить электропривод насоса и приоткрыть вентиль ротаметра Р3.
- Закрыть регулирующий дроссель, обеспечивая заполнение буферного бака водой. Индикатором заполненного буферного бака послужит установившаяся струя воды из пластиковой трубки, выведенной из буферного бака. После появления установившейся струи из трубки выпуска воздуха из буферного бака пережать трубку металлическим зажимом. Стенд готов к проведению эксперимента.

Для расширения диапазона измерений пьезометров допускается перекрытие пластиковых присоединительных трубок металлическими зажимами.

Изменяя расход воды в исследуемой трубе с помощью вентилей, соответствующих ротаметрам, от минимального до максимального значения, фиксировать изменение разности уровней воды в пьезометрах, соответствующих двум сечениям круглой трубы.

Важным требованием к проведению эксперимента было *единовременное снятие показаний* пьезометров и ротаметров. Для выполнения этого условия использовался фотоаппарат.

При изменении расхода воды, необходимо время для установления постоянного уровня воды в пьезометрах и прекращения колебаний поплавка в ротаметре. Далее фотографировали. Эксперимент проводился до тех пор, пока разность уровней в пьезометрах находилась в пределах наблюдаемости. После окончания эксперимента

полученные данные обработаны, вычислены необходимые величины, которые занесены в протокол испытаний.

Результаты эксперимента

Обработка экспериментальных данных

Показания ротаметров переведены в ($м^3/с$) с помощью тарировочных графиков, соответствующих каждому ротаметру.

Расчеты:

1. Потери напора на трение по длине: $h_{TP} = \dfrac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g}$

где p_1 и p_2 - давления столба жидкости в пьезометрах, соответствующих сечениям 1 и 2 (рис. 7).

2. Число Рейнольдса: $\mathrm{Re} = \dfrac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \nu}$, где $\nu = 1 \cdot 10^{-6} [м^2/сек]$ - кинематическая вязкость воды при температуре $t^0 C = 20^0 C$; $Q[м^3/с]$ - расход жидкости в сменном модуле; $d = 15[мм]$ - внутренний диаметр трубы.

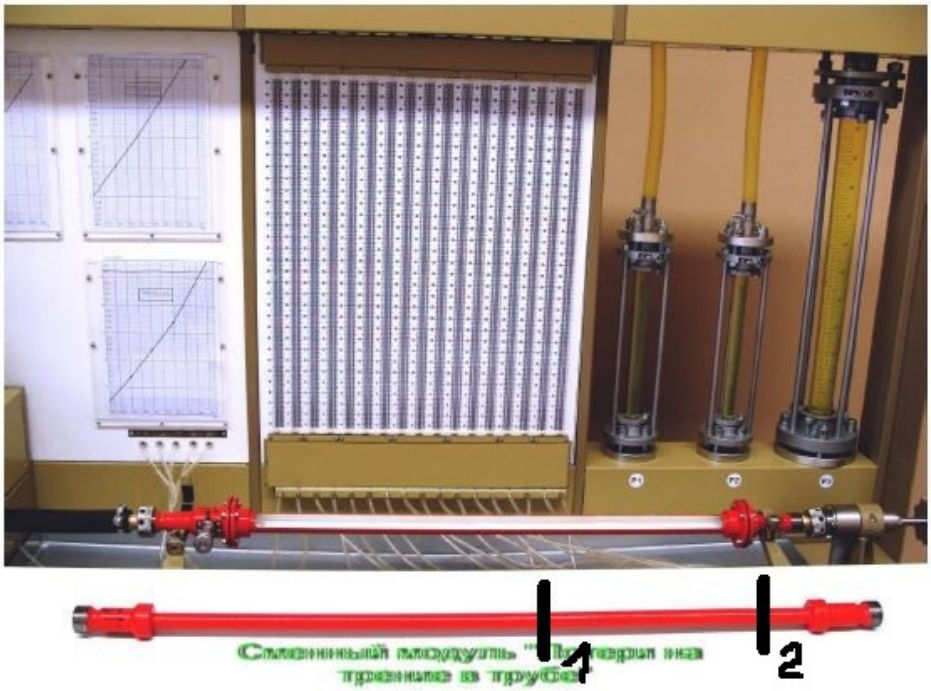


Рис. 7. Сменный модуль №1 «Потери на трение в трубе»

3. Коэффициент потерь на трение по длине трубы:

Из основной расчетной формулы потерь на трение по длине трубы при турбулентном течении в круглых трубах (формулы Вейсбаха-Дарси): $h_{TP} = 0.0827 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{d^5} \cdot Q^2$

где λ - коэффициент потерь напора на трение по длине трубы; $L[м]$ - длина контрольного участка.

Коэффициент потерь напора по длине трубы λ **при ламинарном течении** определяется соотношением: $\lambda_Л = 64 / \mathrm{Re}$

Коэффициент потерь напора по длине трубы λ **при турбулентном течении** определяется соотношением: $\lambda_T = \frac{h_{TP} \cdot d^5}{0.0827 \cdot Q^2 \cdot L}$

Расчеты выполнены для ламинарного и турбулентного режима течения жидкости.

Таблица 1

Протокол испытаний круглой трубы из нержавеющей стали $d = 15[мм]$

№ опыта	Показания ротаметров, %			Значения расходов $\cdot 10^{-6} (м^3 / с)$				Показания пьезометров, м			Число Re	λ
	P1	P2	P3	Q1	Q2	Q3	Q∑	h1	h2	hтр		
1	10	0	0	9,5	0	0	9,5	0,476	0,475	0,001	807	0,079
2	19	0	0	12,8	0	0	12,8	0,488	0,487	0,001	1087	0,059
3	30	0	0	17,2	0	0	17,2	0,458	0,457	0,001	1461	0,044
4	38	0	0	20	0	0	20	0,462	0,461	0,001	1698	0,038
5	50	0	0	24,8	0	0	24,8	0,455	0,454	0,001	2106	0,030
6	60	0	0	29,2	0	0	29,2	0,5	0,499	0,001	2480	0,036
7	68	0	0	32,7	0	0	32,7	0,455	0,454	0,001	2777	0,029
8	80	0	0	37,7	0	0	37,7	0,465	0,463	0,002	3202	0,043
9	91	0	0	42,2	0	0	42,2	0,48	0,477	0,003	3584	0,051
10	100	0	0	45	0	0	45	0,473	0,468	0,005	3822	0,075
11	99	10	0	44,7	25,7	0	70,4	0,504	0,494	0,01	5979	0,062
12	97	20	0	44,2	34,2	0	78,4	0,482	0,47	0,012	6658	0,060
13	98	30	0	44,3	42,5	0	86,8	0,477	0,462	0,015	7372	0,061
14	100	41	0	45	52	0	97	0,465	0,447	0,018	8238	0,058
15	96	47	0	44	58	0	102	0,475	0,456	0,019	8662	0,056
16	98	59	0	44,3	70,7	0	115	0,445	0,424	0,021	9766	0,048

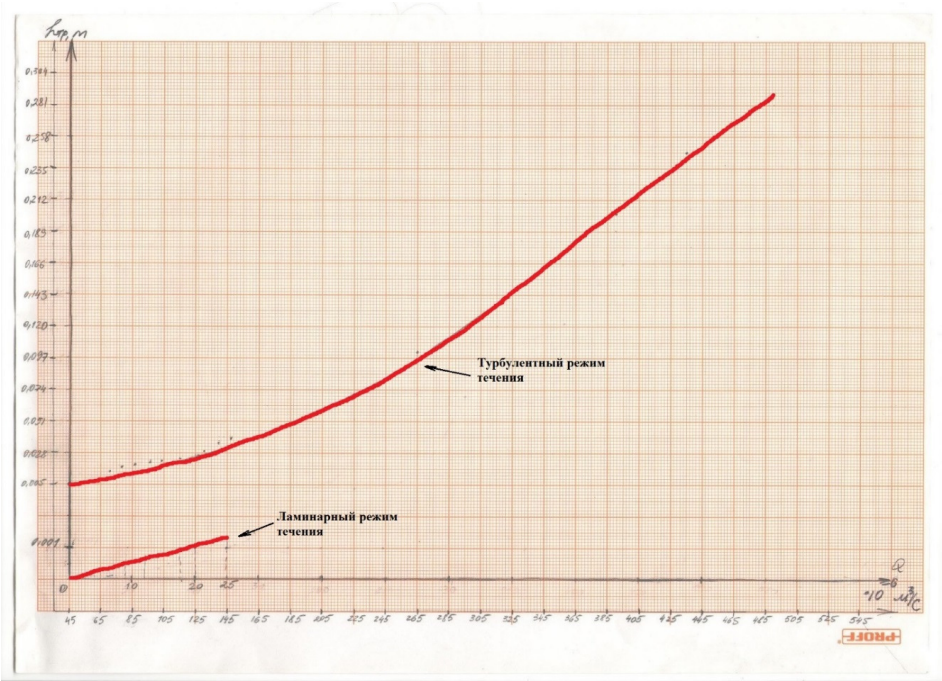
Таблица 1. Продолжение

17	100	70	0	45	81,7	0	126,7	0,478	0,451	0,027	10760	0,051
18	98	77	0	44,3	83,8	0	128,1	0,486	0,457	0,029	10879	0,054
19	100	90	0	45	94,8	0	139,8	0,522	0,488	0,034	11873	0,053
20	100	100	0	45	101,3	0	146,3	0,488	0,451	0,037	12425	0,053
21	100	100	10	45	101,3	78,3	224,6	0,441	0,371	0,07	19074	0,042
22	96	99	21	44	100,6	120	264,6	0,444	0,341	0,103	22471	0,045
23	97	98	33	44,2	100	168,3	312,5	0,401	0,263	0,138	26539	0,043
24	95	95	41	43,8	98	206,7	348,5	0,423	0,256	0,167	29597	0,042
25	100	98	51	45	100	245	390	0,384	0,18	0,204	33121	0,041
26	95	98	61	43,8	100	291,7	435,5	0,327	0,08	0,247	36985	0,040
27	100	98	70	45	100	345	490	0,309	0,02	0,289	41613	0,037
28	0	0	100	0	0	525	525	0,316	0,04	0,276	44586	0,031

Примечание: в ходе эксперимента были задействованы три ротаметра для достижения максимального расхода в трубе, но с условием нахождения уровня воды в пьезометрах в пределах видимости. Недостаток гидравлического стенда – невозможность измерять вакуум.

Полученные зависимости на основе экспериментальных данных в графическом виде

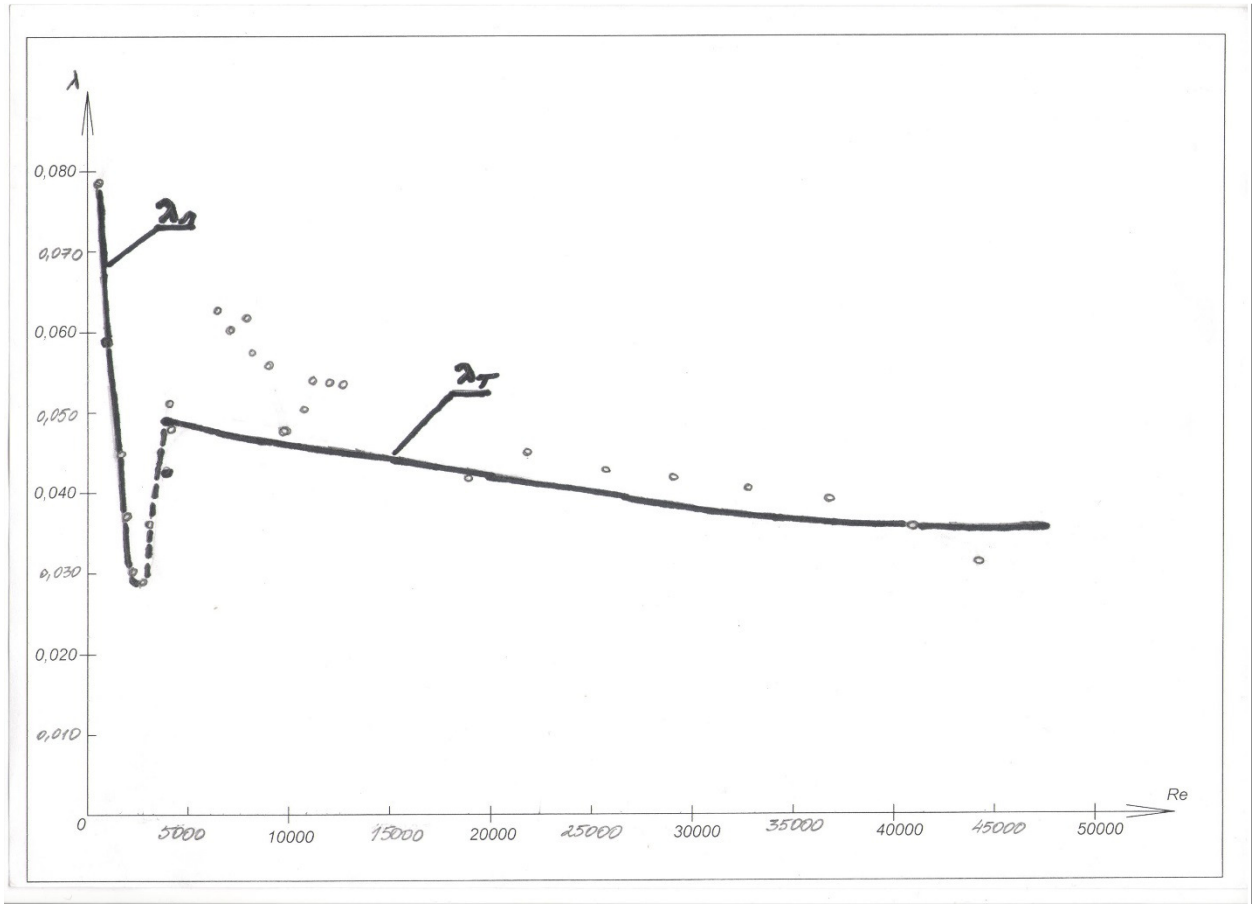
$h_{TP} = f(Q)$ для двух режимов течения жидкости в стальной трубе с $d = 15[мм]$



Примечание: на графике ламинарному и турбулентному режиму течения соответствуют разные оси координат. Это сделано для того, чтобы более укрупненно

показать изменение потерь напора с увеличениям расхода в ламинарном режиме течения жидкости.

$\lambda = f(\mathrm{Re})$ для воды в круглой трубе из нержавеющей стали



Вывод: На основе экспериментальных данных, полученных в ходе проведения эксперимента, были построены графики зависимостей $h_{TP} = f(Q)$ и $\lambda = f(\mathrm{Re})$. Вид и характер полученной графической зависимости $\lambda = f(\mathrm{Re})$ соответствует графику Никурадзе, что позволяет сделать вывод о возможности использования универсального гидравлического стенда ТМЖ-2 для проведения исследований различных типов труб по определению коэффициента гидравлического сопротивления. Однако, следует учитывать тот факт, что полученные значения, графические зависимости применимы только для данного сменного модуля с конкретными значениями длины и диаметра. А при исследовании других типов труб и обработке полученных экспериментальных данных следует вводить коэффициент коррекции, который может быть вычислен на основе метода конечных элементов.

Список литературы

1. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б. Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
2. Руднев С.С., Подвидз Л.Г. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач. 2-е изд., перераб. и доп. М..: Машиностроение, 1974. 416 с.
3. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Учебное пособие по лабораторному практикуму на универсальном гидравлическом тренажёре ТМЖ 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 65 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.