

Лабораторная работа №5

Определение потерь энергии при транспортировании жидкостей по трубопроводу

Цель работы: экспериментальное определение потерь энергии на транспортирование жидкостей по сложному трубопроводу

5.1 Общие сведения

Транспортирование жидкостей по трубопроводам осуществляется с помощью нагнетательных устройств (насосов). Для того, чтобы перемещать текучую среду, нагнетательное устройство должно затрачивать некоторую энергию. Эта энергия зависит от физических свойств жидкости и от характеристик трубопроводной системы.

Поток жидкости можно характеризовать объёмным расходом Q (м³/с) и средней по сечению трубы скоростью v (м/с). **Расходом** называется количество жидкости, которое перемещается через поперечное сечение трубопровода в единицу времени

$$Q = v \cdot S,$$

где S – площадь поперечного сечения трубы, м².

При движении реальных жидкостей часть механической энергии движения необратимо превращается в тепловую. Эта часть энергии называется потерей энергии ΔE . Потери энергии обусловлены существованием сил вязкого трения. С потерями энергии связаны потери давления

$$\Delta p_{\text{пот}} = \rho \cdot \Delta E, \text{ Па}$$

и потери напора

$$\Delta h_{\text{пот}} = \frac{\Delta p_{\text{пот}}}{\rho \cdot g} = \frac{\Delta E}{g}, \text{ м}$$

где ρ – плотность жидкости либо газа;
 g – ускорение свободного падения.

Часть мощности, затрачиваемая нагнетательным устройством на транспортирование по трубопроводу текучих сред с расходом Q , определяется выражением

$$N = \Delta p_{\text{пот}} \cdot Q, \text{ Вт}$$

Гидравлические потери давления (напора) обычно делят на два вида:

1) **потери давления на трение** $\Delta p_{\text{тр}}$ при стабилизированном движении жидкости в длинных трубах. Эти потери равномерно распределяются по всей длине трубы.

2) потери второго вида $\Delta p_{\text{м}}$ называются **местными** и сосредоточены на сравнительно коротких участках трубопроводов, вызываются местными изменениями формы канала. Характерной особенностью движения жидкости через местные сопротивления является образование вихрей в потоке.

Таким образом, полные потери давления или напора определяются выражениями

$$\Delta p_{\text{пот}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} \quad \text{или} \quad \Delta h_{\text{пот}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м}}.$$

Потери на трение по длине – это потери, которые возникают в прямых трубах постоянного сечения, и возрастают пропорционально длине трубы, определяются по формуле Дарси

$$h_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \text{ м}$$

где l – длина трубопровода, см;

d – внутренний диаметр трубопровода;

v – средняя скорость течения жидкости в трубопроводе;

λ – безразмерный коэффициент потерь на трение по длине, или коэффициент Дарси.

Коэффициент потерь на трение в общем случае зависит от режима движения жидкости и от относительной шероховатости стенок канала $\lambda = f(\text{Re}, \Delta/d)$. Эта зависимость называется **законом сопротивления**, проявляется в соотношении величины абсолютной шероховатости Δ и величины ламинарного подслоя δ в потоке жидкости (рис. 5.1).

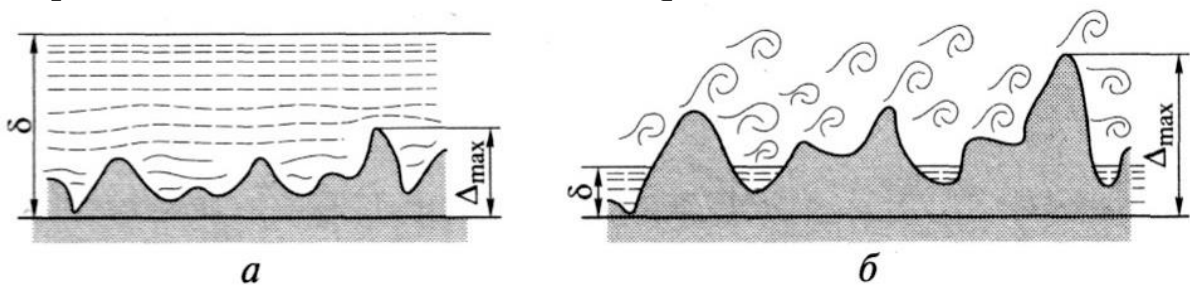


Рисунок 5.1 – Схемы течения жидкости

При $\text{Re} < 2320$ (область ламинарного течения), коэффициент гидравлического трения λ зависит только от числа Рейнольдса, т.к. величина ламинарного подслоя δ (рис. 5.1, а) значительно больше величины шероховатости стенки, поток жидкости плавно обтекает выступы, не давая образовываться вихревым зонам. Коэффициент гидравлического трения λ определяется по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}.$$

При $2320 < \text{Re} < \frac{10 \cdot d}{\Delta}$ (область гидравлически гладких труб) выступы шероховатости Δ меньше толщины ламинарного подслоя δ (рис. 5.1), коэффициент λ зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}.$$

При $\frac{10 \cdot d}{\Delta} < Re < \frac{500 \cdot d}{\Delta}$ (область доквадратичного течения) коэффициент λ зависит от числа Рейнольдса и от величины шероховатости, т.к. выступы шероховатости Δ соизмеримы с толщиной ламинарного подслоя δ и начинают оказывать влияние на коэффициент гидравлического трения λ . Коэффициент λ может быть определен по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}.$$

При $\frac{500 \cdot d}{\Delta} < Re$ (область квадратичного сопротивления) ламинарный подслоя почти полностью разрушается, обнажая выступы шероховатости (рис. 5.1, б). В этой области коэффициент сопротивления λ зависит только от относительной шероховатости Δ/d и определяется по формуле Никурадзе

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \cdot \lg \frac{d}{2\Delta} \right)^2}.$$

Местные сопротивления — относительно короткие участки русла, в которых происходит значительное изменение эпюры скоростей потока и ее последующее восстановление до формы, соответствующей равномерному движению. К ним относят: расширяющиеся и сужающиеся участки трубопровода — диффузоры и конфузоры, повороты в виде колен и отводов, диафрагмы, задвижки, краны, вентили, дроссельные заслонки, клапаны и т. п. (рис. 5.2.).

На этих участках русла образуются вихревые зоны, увеличивается интенсивность перемешивания жидкости. В результате возрастают вязкостные и инерционные силы сопротивления, препятствующие движению жидкости и, следовательно, увеличивают потери энергии жидкости, переходящие в тепло.

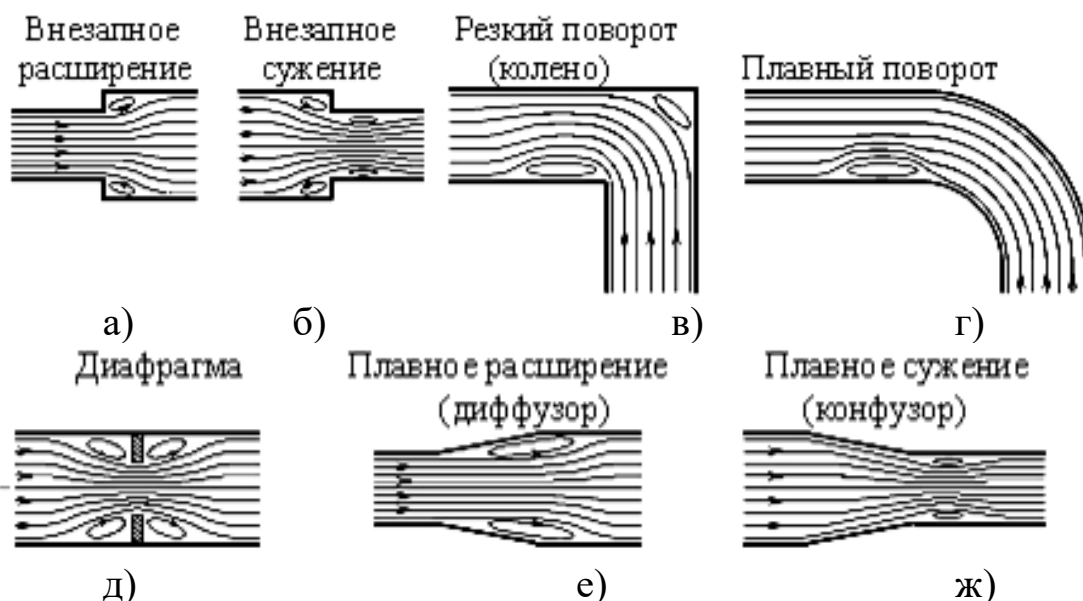


Рисунок. 5.2. - Схема типичных местных гидравлических сопротивлений

Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха

$$\Delta h_{\text{м.с}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g},$$

где v – средняя скорость по сечению в трубе, в которой установлено местное сопротивление. Если диаметр трубы и скорость в ней изменяются по длине, то для расчёта принимают большую из скоростей.

ζ – коэффициент местного сопротивления, значение которого постоянно для данной формы местного сопротивления.

Величина ζ зависит от формы местного сопротивления, распределения скоростей перед входом в него, условий входа жидкости, числа Рейнольдса и шероховатости стенок.

Внезапное расширение и сужение, при которых жидкость не течёт по всему контуру стенок, а движется по плавным линиям токов (рисунок 5.2, а, б). Вблизи стенок при изменении формы трубопровода происходит отрыв потока и образование водоворотных зон, в которых жидкость находится в интенсивном вращательном движении, происходит очень активное трение жидкости о твёрдые стенки трубы и трение внутри вращающихся потоков. Потери энергии определяются по формулам

$$\Delta h_{\text{в.р.}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \zeta_{\text{в.р.}} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g},$$
$$\Delta h_{\text{в.с}} = \zeta_{\text{в.с}} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}, \text{ м.}$$

Поворот потока может быть плавным и резким (рис. 5.2, в, г). Резкий поворот потока или колено очень сильно влияет на потери напора. В нём создаются две сложные вихревые зоны, в которых интенсивно теряется энергия. Степень интенсивности существенно зависит от угла поворота.

Потери энергии определяются по формуле

$$h_{\text{к}} = \zeta_{\text{к}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \text{ м.}$$

При плавном повороте на 90° для приблизительных расчетов можно принимать коэффициент сопротивления $\zeta_{\text{к}} = 0,15$.

Сравнительный анализ различных гидравлических сопротивлений показывает, что потери энергии значительно возрастают при резком изменении диаметра трубы, при резких поворотах и т.п.

Значения коэффициентов сопротивления, как правило, определяются опытным путём и в обобщённом виде содержатся в справочниках в виде эмпирических формул, таблиц, графиков.

Основные методы снижения потерь энергии при транспортировании жидкостей и газов по сложным трубопроводам: использование труб с гладкой внутренней поверхностью; обеспечение плавных поворотов потока;

устройство более плавного изменения поперечного сечения потока жидкости; устройство плавных входов и выходов из труб; разогрев при перекачивании высоковязких жидкостей; введение полимерных добавок в поток жидкости.

5.2 Описание опытной установки

Опытная установка (рис. 5.3) состоит из резервуара 12, заполненного водой, центробежного насоса 13 с электродвигателем, расходомера 11, всасывающего 3 и напорного трубопроводов 4.

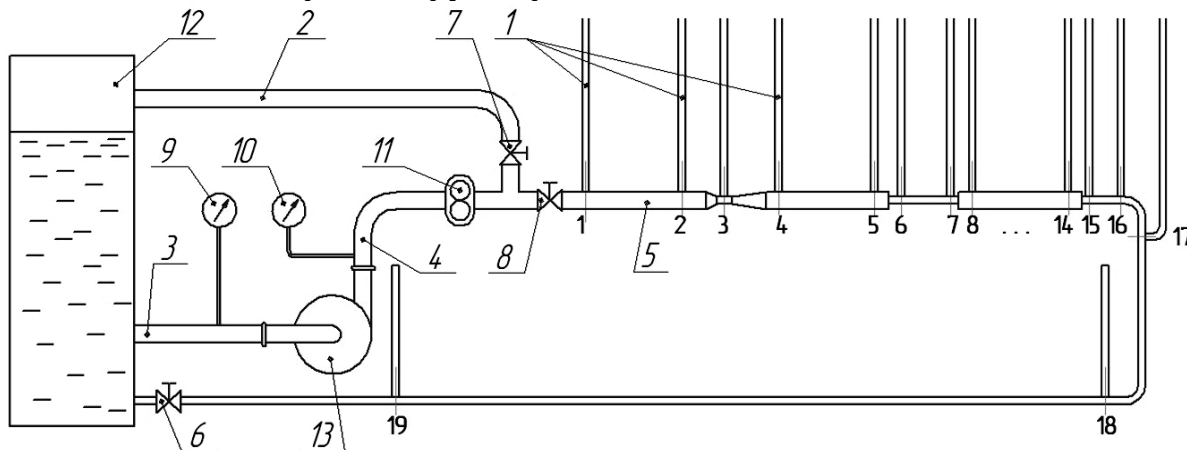


Рисунок 5.3 - Схема опытной установки

Напорная труба 4 после вентиля 8 переходит в трубопровод переменного сечения 5, на характерных участках которого установлены пьезометры 1. Вакуумметр 9 и манометр 10 служат для измерения давления соответственно на входе и на выходе из насоса. Расходомер 11 служит для измерения расхода.

5.3 Порядок проведения работы

- 1) Полностью открыть вентили 6 и 8, вентиль 7 закрыть.
- 2) Включить в работу насос 13, подающий воду из водосборного бака 12 в систему.
- 3) Установить уровень жидкости вентилем 8 в пьезометре, соответствующем сечению 1 на максимальном уровне (примерно 1м).
- 4) Произвести измерения давления в трубопроводах 4 и 5 по манометру 10 и пьезометрам в соответствующих сечениях.
- 5) При помощи расходомерного устройства 11 определить расход.

5.4 Обработка опытных данных

- 1) Вычислить расход жидкости по формуле

$$Q_1 = \frac{V_1}{t_1} = \text{---}, Q_2 = \frac{V_2}{t_2} = \text{---}, Q_3 = \frac{V_3}{t_3} = \text{---} \cdot \text{см}^3/\text{с}$$

где V – объем жидкости прошедший через расходомер ($1 \text{ л} = 1000 \text{ см}^3$);
 t – время за которое жидкость прошла через расходомер.

Определить среднее значение расхода

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \text{_____}, \text{ см}^3/\text{с}.$$

2) Вычислить для каждого поперечного сечения площадь

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \text{_____} \text{ см}^2,$$

где d – внутренний диаметр сечения.

3) Вычислить для каждого сечения значение средней скорости

$$v = \frac{Q_{\text{ср}}}{S} = \text{_____} \text{ см/с}.$$

4) Вычислить потери напора по формуле

$$\Delta h_{\text{пот}} = h_i - h_{i+1} = \text{_____} \text{ см}.$$

5) Вычислить коэффициент гидравлического трения

$$\lambda = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta h_{\text{пот}} \cdot d}{l \cdot v^2} = \text{_____}.$$

где g – ускорение свободного падения, $g=981 \text{ см/с}^2$;

l – длина трубопровода между сечениями, где определяется потери на трение, см.

6) Определить теоретическое значение коэффициента гидравлического трения по советующей формуле

$$\lambda_{\text{расч}} = \text{_____}.$$

7) Вычислить для каждого местного сопротивления значения коэффициента местных потерь по опыту

$$\zeta_{\text{оп}} = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta h_{\text{пот}}}{v^2} = \text{_____}.$$

Определить коэффициенты местных сопротивлений расчетным путем

$$\zeta_{\text{в.р.расч.}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 = \text{_____}, \quad \zeta_{\text{в.с.расч.}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^2 = \text{_____}.$$

8) Определить мощность, затрачиваемую на преодоление каждого из гидравлических сопротивлений по формуле (расчет производить в системе SI)

$$N = \Delta h_{\text{пот}} \cdot Q \cdot \rho \cdot g = \text{_____} \text{ Вт}.$$

Провести сравнительный анализ потерь энергии на каждом из участков сложного трубопровода. Обратит внимание на влияние скорости течения на потери энергии.

Таблица 5.2 - Результаты измерений и расчётов

№ п.п.	Диаметр трубо- провода <i>d</i>	Расстояние между се- чениями <i>l</i>	Площадь по- перечного сечения тру- бопровода <i>S</i>	Показа- ния пье- зометра	Потери напора $\Delta h_{\text{пот}}$	Средняя скорость <i>v</i>	Коэф. гидравличе- ского трения λ	Коэф. месного сопротив- ления ζ	Мощность <i>N</i>
	см	см	см ²	см	см	см/с	—	—	Вт
Потери по длине									
Пьезометр № 1		—						---	
Пьезометр № 2								---	
Потери на внезапном сужении									
Пьезометр № 5		--					---		
Пьезометр № 6		--					---		
Потери на внезапном расширении									
Пьезометр № 7		--					---		
Пьезометр № 8		--					---		
Потери на плавном повороте									
Пьезометр № 16		--					---		
Пьезометр № 17		--					---		
Потери по длине									
Пьезометр № 18		---						---	
Пьезометр № 19								---	

5.5 Контрольные вопросы

- 1) Какие устройства осуществляют транспортирование текучих сред по трубопроводам?
- 2) От каких факторов зависит энергия для транспортирования жидкостей?
- 3) Какими величинами можно охарактеризовать поток жидкости или газа?
- 4) Что такое расход жидкости?
- 5) Чем обусловлены потери энергии при движении жидкости?
- 6) Формула потерь давления при известных потерях энергии.
- 7) Формула потерь напора при известных потерях энергии.
- 8) Формула полных потерь напора.
- 9) Формула потерь мощности при транспортировании по трубопроводам жидкости.
- 10) На какие два вида делят потери давления (напора)?
- 11) Формула потерь напора по длине при установившемся движении жидкости.
- 12) От каких величин зависит коэффициент гидравлического трения?
- 13) Какая зависимость называется законом сопротивления?
- 14) Как определяется значение коэффициентов сопротивления для разных режимов движения жидкости?
- 15) На какие области делится турбулентный режим течения жидкости?
- 16) Формула Пуазейля.
- 17) Формула Блазиуса.
- 18) Формула Альтшуля.
- 19) Формула Никурадзе.
- 20) Какие сопротивления относятся к местным сопротивлениям?
- 21) Формула потерь напора на местных сопротивлениях.
- 22) От каких величин зависит коэффициент местного сопротивления?
- 23) Что является характерной особенностью движения жидкости через местные сопротивления?
- 24) Какие основные методы снижения потерь энергии при транспортировании жидкости и газов?