

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Г. Д. Слабожанин, Д. Г. Слабожанин

**ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ
НА ПОРТАТИВНОЙ ЛАБОРАТОРИИ
«КАПЕЛЬКА»**



Томск – 2009

Практикум по гидравлике на портативной лаборатории «Капелька». Методические указания к лабораторным работам / Г. Д. Слабожанин, Д. Г. Слабожанин, г. Томск, 2009. – 31 с.

В учебном пособии приводятся основные теоретические сведения, содержание и порядок выполнения демонстраций и лабораторных работ по механике жидкости (гидравлике) на разработанной авторами портативной лаборатории «КАПЕЛЬКА». Она заняла I место во Всесоюзном конкурсе учебной техники в 1990г и рекомендована Гособразованием к выпуску. И вот уже более трехсот учебных заведений имеют эту лабораторию и оценили мировой уровень технической новизны (патенты на изобретения 1721326, 1742655, а.с. 1728725) и ее преимущества по сравнению с аналогами: не имеет двигателей, насосов, вентилях; не требует подвода воды и электроэнергии; умещается в чемодане типа «дипломат»; удобна для лекционных демонстраций; экономит около 20м лабораторных площадей и имеет низкую стоимость.

Лаборатория и настоящее пособие предназначены преподавателю, студенту, а также школьнику для выполнения лабораторных работ и увлекательных демонстраций по гидравлике (механике жидкости) и физике.

Автор выражает благодарность *профессорам* Л.П. Иванову, А.А. Шейпаку (г.Москва), К.Г. Асатуру, А.Д. Гиргидову, А.М. Курганову, Н.Н. Лаптеву, С.С. Смородину (г.Санкт-Петербург), А.Д. Тяну (г.Усть-Каменогорск), *доцентам* В.И. Мелькову, Г.Г. Медведеву (г.Томск), И.Н. Троицкому (г.Новополоцк), В.В. Земляному (г.Владивосток), учителям *физики* Б.И. Вершинину, М.М. Сенчику, П.П. Ятченко (г.Томск), Л.А. Кропотовой (г.Новокузнецк), Н.И. Разиковой[^] (г.Екатеринбург), В.П. Турубанову (г.Стрежевой), Л.А. Щербаченко (г.Иркутск) за полезные советы и замечания, высказанные в процессе создания лаборатории и при написании практикума.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Работа 1. Изучение физических свойств жидкости.	4
2.	Работа 2. Изучение приборов для измерения давления	10
3.	Работа 3. Измерение гидростатического давления ..	14
4.	Работа 4. Изучение структуры потоков жидкости ...	17
5.	Работа 5. Определение режима течения	21
6.	Работа 6. Иллюстрация уравнения Бернулли	23
7.	Работа 7. Определение местных потерь напора	27
8.	Работа 8. Определение потерь напора по длине	29

РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Освоение техники измерения плотности, теплового расширения, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей.

1.1. Общие сведения

Жидкостью называют малосжимаемое тело, изменяющее свою форму под действием весьма малых сил. Основные характеристики жидкости - плотность, сжимаемость, тепловое расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

Плотность - отношение массы m жидкости к её объёму W : $\rho = m/W$.

Сжимаемость - свойство жидкости уменьшать объём под действием давления. Она оценивается *коэффициентом сжимаемости* b_p , показывающим относительное уменьшение объёма жидкости W при повышении давления p на единицу: $b_p = (DW/W) / Dp$.

Тепловое расширение - свойство жидкости изменять объём при нагревании - характеризуется *коэффициентом теплового расширения* b_T , равным относительному приращению объёма W с изменением температуры T на один градус при постоянном давлении: $b_T = (DW/W) / DT$. Как правило, при нагревании объём жидкости увеличивается.

Вязкость - свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев. Ее оценивают *динамическим коэффициентом вязкости* η который измеряется в паскаль-секундах (Па·с) и равен касательному напряжению между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения численно совпадает с толщиной слоя. *Кинематический коэффициент вязкости* ν определяют из формулы $\nu = \eta / \rho$ и

измеряют квадратными метрами на секунду ($\text{м}^2/\text{с}$) или стоксами ($1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$). Эти коэффициенты определяются видом жидкости, не зависят от скорости течения, существенно уменьшаются с возрастанием температуры.

Поверхностное натяжение – свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул - характеризуется *коэффициентом поверхностного натяжения* S , равным силе на единице длины контура свободной поверхности. Значения r , b_p , b_T , n и S при 20°C указаны в табл.1.1.

Таблица 1.1

Жидкость	r , $\text{кг}/\text{м}^3$	$b_p \cdot 10^3$, МПа^{-1}	$b_T \cdot 10^3$, $^\circ\text{C}^{-1}$	$n \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	$S \cdot 10^3$, $\text{Н}/\text{м}$
Вода пресная	998	0,49	0,15	1,01	73
Спирт этиловый	790	0,78	1,10	1,52	23
Масло:					
моторное М-10	900	0,60	0,64	800	25
индустриальное 20	900	0,72	0,73	110	25
трансформаторное	890	0,60	0,70	30	25
АМГ - 10	850	0,76	0,83	20	25

1.2. Описание устройства № 1

Устройство для изучения физических свойств жидкости содержит 5 приборов, выполненных в общем прозрачном корпусе (рис. 1.1), на котором указаны параметры для обработки опытных данных. Приборы 3-5 начинают действовать при перевертывании устройства № 1. Термометр 1 показывает температуру окружающей среды и, следовательно, температуру жидкостей во всех устройствах.

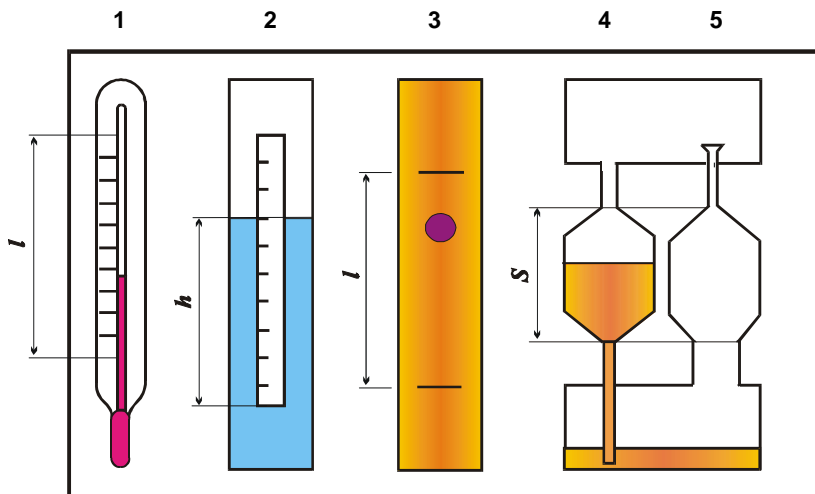


Рис. 1.1. Схема устройства №1:

1 - термометр; 2 - ареометр; 3 - вискозиметр Стокса;
4 - капиллярный вискозиметр; 5 - сталагмометр

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Определение коэффициента теплового расширения жидкости

Термометр 1 имеет стеклянный баллон с капилляром, заполненные термометрической жидкостью, и шкалу. Принцип его действия основан на тепловом расширении жидкостей. Варьирование температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре. Уровень указывает на шкале значение температуры.

Коэффициент теплового расширения термометрической жидкости определяется в следующем порядке на основе мыс-

ленного эксперимента, т.е. предполагается, что температура окружающей среды повысилась от нижнего (нулевого) до верхнего предельных значений термометра и уровень жидкости в капилляре возрос на величину l .

1. Подсчитать общее число градусных делений DT в шкале термометра и измерить расстояние l между крайними штрихами шкалы.

2. Вычислить приращение объема термометрической жидкости $DW = p r^2 l$, где r - радиус капилляра термометра.

3. С учетом начального (при 0°C) объема термометрической жидкости W найти значение коэффициента теплового расширения $b_T = (DW/W) / DT$ и сравнить его со справочным значением b_T^* (табл. 1.1). Значения используемых величин занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Вид жидкости	r , см	W , см ³	DT , °C	l , см	DW , см ³	b_T , °C ⁻¹	b_T^* , °C ⁻¹
Спирт							

1.3.2. Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он представляет собой пустотелый цилиндр с миллиметровой шкалой и грузом в нижней части. Благодаря грузу ареометр плавает в исследуемой жидкости в вертикальном положении. Глубина погружения ареометра является мерой плотности жидкости и считывается со шкалы по верхнему краю мениска жидкости вокруг ареометра. В обычных ареометрах шкала отградуирована сразу по плотности.

В ходе работы выполнить следующие операции.

1. Измерить глубину погружения h ареометра по миллиметровой шкале на нем.

2. Вычислить плотность жидкости по формуле $r = 4m/(pd^2h)$, где m и d – масса и диаметр ареометра. Эта формула получена путем приравнивания силы тяжести ареометра $G=mg$ и выталкивающей (архимедовой) силы $P_A=r g W$, где объем погруженной части ареометра $W=(pd^2/4)h$.

3. Сравнить опытное значение плотности r со справочным значением r^* (см. табл.1.1). Значения используемых величин свести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Вид жидкости	m , г	d , см	h , см	r , г/см ³	r^* , г/см ³
Вода					

1.3.3. Определение вязкости вискозиметром Стокса

Вискозиметр Стокса 3 достаточно прост, содержит цилиндрическую емкость, заполненную исследуемой жидкостью, и шарик. Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в ней следующим образом.

1. Повернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и зафиксировать секундомером время t прохождения шариком расстояния l между двумя метками в приборе 3. Шарик должен падать по оси емкости без соприкосновения со стенками. Опыт выполнить три раза, а затем определить среднеарифметическое значение времени t .

2. Вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости

$$n = g d^2 t (r_u/r - 1) / [18l + 43.2l(d/D)],$$

где g – ускорение свободного падения; d , D – диаметры шарика и цилиндрической емкости; r , r_u – плотности жидкости и материала шарика.

3. Сравнить опытное значение коэффициента вязкости n с табличным значением n^* (см. табл.1.1). Значения используемых величин свести в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Вид жидкости	r , кг/м ³	t , с	l , м	d , м	D , м	r_w , кг/м ³	n , м ² /с	n^* , м ² /с
М-8В					0,02			

Примечание. В устройстве № 1 вместо вискозиметра Стокса может быть встроен вискозиметр - плотномер конструкции ТГАСУ, в котором шарик падает с малым зазором в открытой с обоих концов трубке. В этом случае следует: зафиксировать время падения шарика t и перепад уровней жидкости h в цилиндрической емкости и трубке; вычислить значения плотности жидкости $r = r_w / (1 + A h)$ и кинематический коэффициент вязкости $n = B h t$, где A и B – постоянные прибора.

1.3.4. Измерение вязкости капиллярным вискозиметром

Капиллярный вискозиметр 4 включает емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения жидкости из емкости через капилляр.

1. Перевернуть устройство № 1 (см. рис. 1.1) в вертикальной плоскости и определить секундомером время t истечения через капилляр объема жидкости между метками (высотой S) из емкости вискозиметра 4 и температуру T по термометру 1.

2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости $n = M t$ (M - постоянная прибора) и сравнить его с табличным значением n^* (см. табл. 1.1). Данные свести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Вид жидкости	M , м ² /с ²	t , с	n , м ² /с	T , °С	n^* , м ² /с
М-8В					

Примечание. В табл. 1.1 приведены значения коэффициента вязкости жидкостей при температуре 20 °С. Поэтому опытные значения, полученные при другой температуре, могут существенно отличаться от табличных значений.

1.3.5. Измерение поверхностного натяжения сталагмометром

Сталагмометр 5 служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель и содержит емкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капли равна ее весу (силе тяжести) и поэтому определяется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости с заданным объемом.

1. Перевернуть устройство № 1 и подсчитать число капель, полученных в сталагмометре 5 из объема высотой S между двумя метками. Опыт повторить три раза и вычислить среднее арифметическое значение числа капель n .

2. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения $s = Kr/n$ (K - постоянная сталагмометра) и сравнить его с табличным значением s^* (см. табл.1.1). Данные свести в таблицу 1.6.

Таблица 1.6

Вид жидкости	$K, \text{ м}^3/\text{с}^2$	$r, \text{ кг}/\text{м}^3$	n	$s, \text{ Н}/\text{м}$	$s^*, \text{ Н}/\text{м}$
М-8В					

РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы. Изучение устройства и принципа действия жидкостных приборов для измерения давления.

2.1. Общие сведения

Гидростатическим давлением называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости, т. е. силу, действующую на единицу площади поверхности. За единицу измерения давления в международной системе принят паскаль ($\text{Па} = \text{Н/м}^2$).

Различают абсолютное, атмосферное, манометрическое и вакуумметрическое давления.

Абсолютное (полное) *давление* p отсчитывается от абсолютного вакуума. *Атмосферное давление* p_a создается силой тяжести воздуха атмосферы и принимается в обычных условиях равным 101325 Па или 760 мм рт. ст. Избыток давления над атмосферным называют *манометрическим* (избыточным) *давлением* ($p_m = p - p_a$), а недостаток до атмосферного давления - *вакуумметрическим давлением* ($p_v = p_a - p$).

Приборы для измерения атмосферного давления называли *барометрами*, манометрического - *манометрами*, вакуума - *вакуумметрами*. По принципу действия и типу рабочего элемента приборы подразделяются на жидкостные, механические и электрические.

Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми. Их действие основано на принципе уравнивания измеряемого давления p силой тяжести столба жидкости высотой h в приборе:

$$p = \rho g h,$$

где ρ - плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Поэтому величина давления может быть выражена высотой столба жидкости h (мм рт. ст., м вод. ст.). Преимуществами жидкостных приборов являются простота конструкции и высокая точность, однако они удобны только при измерении небольших давлений.

В *механических приборах* измеряемое давление вызывает деформацию чувствительного элемента (трубка, мембрана, сильфон), которая с помощью специальных механизмов передается на указатель. Такие приборы компактны и имеют большой диапазон измеряемых давлений.

В *электрических приборах* воспринимаемое чувствительным элементом давление преобразуется в электрический сигнал. Сигнал регистрируется показывающим (вольтметр, амперметр) или пишущим (самописец, осциллограф) приборами. В последнем случае можно фиксировать давление при быстропротекающих процессах.

2.2. Описание устройства № 2 и жидкостных приборов

Ртутный барометр состоит из вертикальной стеклянной трубки с миллиметровой шкалой и закрытым верхним концом, которая заполнена ртутью, и чаши с ртутью, в которую опущена трубка нижним концом. Таким прибором впервые было измерено атмосферное давление итальянским ученым Э. Торричелли в 1642 г.

Для демонстрации других приборов служит *устройство № 2*, которое выполнено прозрачным и имеет полость 1, в которой всегда сохраняется атмосферное давление, и резервуар 2, частично заполненный водой (рис. 2.1, а). Для измерения давления и уровня жидкости в резервуаре 2 служат жидкостные приборы 3, 4 и 5. Они представляют собой прозрачные вертикальные каналы со шкалами, размеченными в единицах длины.

Однотрубный манометр (пьезометр) 3 сообщается верхним концом с атмосферой, а нижним - с резервуаром 2. Им определяется манометрическое давление $p_m = \rho g h_{\text{п}}$ на дне резервуара.

Уровнемер 4 соединен обоими концами с резервуаром и служит для измерения уровня жидкости H в нем.

Мановакуумметр 5 представляет собой U - образный канал, частично заполненный жидкостью. Левым коленом он подключен к резервуару 2, а правым - к полости 1 и предназначен для определения манометрического $p_{\text{мо}} = rgh_{\text{м}}$ (рис. 2.1, а) или вакуумметрического $p_{\text{во}} = rgh_{\text{в}}$ (рис. 2.1,б) давлений над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2. Давление в резервуаре можно изменять путем наклона устройства.

При повороте устройства в его плоскости на 180° против часовой стрелки (рис. 2.1, в) канал 4 остается уровнемером, колено мановакуумметра 5 преобразуется в пьезометр 6, а пьезометр 3 - в вакуумметр (обратный пьезометр) 7, служащий для определения вакуума $p_{\text{во}} = r g h_{\text{в}}$ над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2.

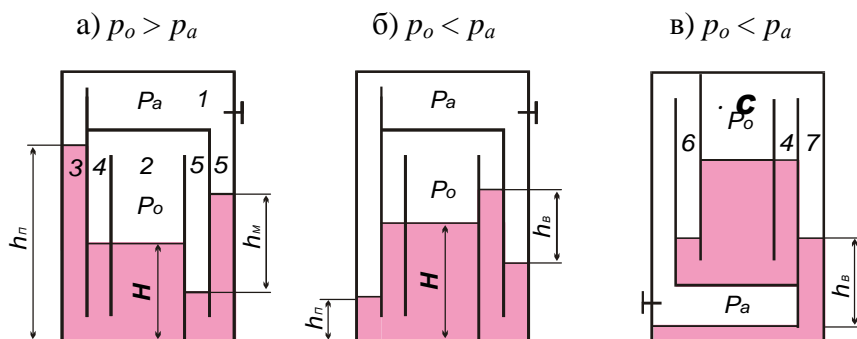


Рис. 2.1. Схема устройства № 2:

1 - полость с атмосферным давлением; 2 – опытный резервуар; 3 - пьезометр; 4 - уровнемер; 5 – мановакуумметр; 6 – пьезометр; 7 – вакуумметр

РАБОТА 3. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы. Приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами.

3.1. Общие сведения

Абсолютное давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по *основному уравнению гидростатики*

$$p = p_o + \rho g H,$$

где p_o - абсолютное давление на свободной поверхности жидкости;

ρ - плотность жидкости;

H - глубина погружения точки под свободной поверхностью.

В работе вычисляется давление в заданной точке (например, на дне резервуара) через показания различных приборов и затем сравниваются результаты, полученные двумя путями.

3.2. Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ($p_o > p_a$), о чем свидетельствуют превышение уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 5 (рис. 2.1, а). Для этого устройство поставить на правую сторону, а затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2.

2. Снять показания пьезометра h_n , уровнемера H и мановакуумметра h_m .

3. Вычислить абсолютное давление на дне резервуара через показания пьезометра, а затем - через величины, измеренные уровнемером и мановакуумметром. Для оценки сопо-

ставимости результатов определения давления на дне резервуара двумя путями найти относительную погрешность Δp .

4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ($p_o < p_a$), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад h_e (рис.2.1, б). Для этого поставить устройство на левую сторону, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. Далее выполнить операции по п.п. 2 и 3.

5. Перевернуть устройство против часовой стрелки (рис 2.1, в) и определить манометрическое или вакуумметрическое давление в заданной преподавателем точке С через показания пьезометра 6, а затем с целью проверки найти его через показания обратного пьезометра 7 и уровнемера 4.

В процессе проведения опытов и обработки экспериментальных данных заполнить таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Условия опыта	
			$P_o > P_a$	$P_o < P_a$
1.	Пьезометрическая высота, м	h_n		
2.	Уровень жидкости в резервуаре, м	H		
3.	Манометрическая высота, м	h_m		-----
4.	Вакуумметрическая высота, м	h_e	-----	
5.	Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па	$p = p_a + r g h_n$		
6.	Абсолютное давление в	$p_o = p_a + r g h_m$		-----

7.	резервуаре над жидкостью, Па Абсолютное давление на дне резервуара через показания мановакуумметра и уровнемера, Па	$p_o = p_a - r g h_s$ $p^* = p_o + r g H$	-----	
8.	Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %	$dp = 100(p - p^*) / p$		

Примечание. Принять атмосферное давление $p_a = 101325$ Па, плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³.

РАБОТА 4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Наблюдение потоков жидкости с различной структурой и выявление факторов, влияющих на структуру.

4.1. Общие сведения

Различают два основных режима течения жидкости: *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихревой). При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по параллельным траекториям без перемешивания, поэтому поток имеет слоистую структуру, т.е. жидкость движется отдельными слоями. Турбулентное движение характеризуется пульсацией давления и скоростей частиц, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости в потоке, т.е. вихревое движение.

При резком изменении поперечного сечения или направления канала от его стенки отрывается *транзитная струя*, а у стенки жидкость начинает двигаться в обратном

направлении, приводя к вращению жидкости между транзитной струей и стенкой. Эта область называется *циркуляционной* (вальцовой) *зоной*.

Для визуализации течений применяют меченые частицы (например, частицы алюминия) или окрашенные (например, чернилами или тушью) струйки, которые показывают *траектории* движения множества частиц жидкости. Они еще называются *линиями тока*, если течение установившееся. При *установившемся* (стационарном) *течении* осредненные значения скорости и давления в каждой точке потока постоянны во времени. В этом случае расход, т.е. количество жидкости, проходящее через заданное сечение в единицу времени, также не изменяется во времени.

4.2. Описание устройства № 3

Устройство № 3 имеет прозрачный корпус (рис. 4.1, а), баки 1 и 2 с успокоительной стенкой 3 для гашения возмущений в жидкости от падения струй и всплывания пузырей воздуха. Баки между собой соединены каналами 4 и 5 с одинаковыми сечениями. Конец канала 4 снабжен перегородкой с щелью 6, а противоположный конец канала 5 - решеткой (перегородкой со множеством отверстий) 7. Устройство заполнено водой, содержащей микроскопические частицы алюминия для визуализации течения. Уровень воды в баке 2 измеряется по шкале 8.

Устройство работает следующим образом. В положениях устройства (рис. 4.1, а, б) поступающая через левый канал в нижний бак вода вытесняет воздух в виде пузырей в верхний бак. Поэтому давления на входе в канал (на дне верхнего бака) и над жидкостью в нижнем баке уравниваются и истечение происходит под действием постоянного напора H , создаваемого столбом жидкости в левом канале. Так обеспечивается установившееся (с постоянным во времени расходом) движе-

ние жидкости. Причем в канале 4 устанавливается ламинарный режим благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели 6. В свою очередь малое гидравлическое сопротивление решетки 7 обеспечивает получение турбулентного течения в канале 5 за счет больших скоростей (рис. 4.1, б). Расход можно уменьшать наклоном устройства от себя.

В случаях, указанных на рис. 4.1, в, г, д в каналах 4 и 5 возникает неустановившееся (при переменном напоре и расходе) движение жидкости за счет непосредственного соединения воздушных полостей баков. Это позволяет проследить за изменением структуры потоков в процессе уменьшения их скорости до нуля.

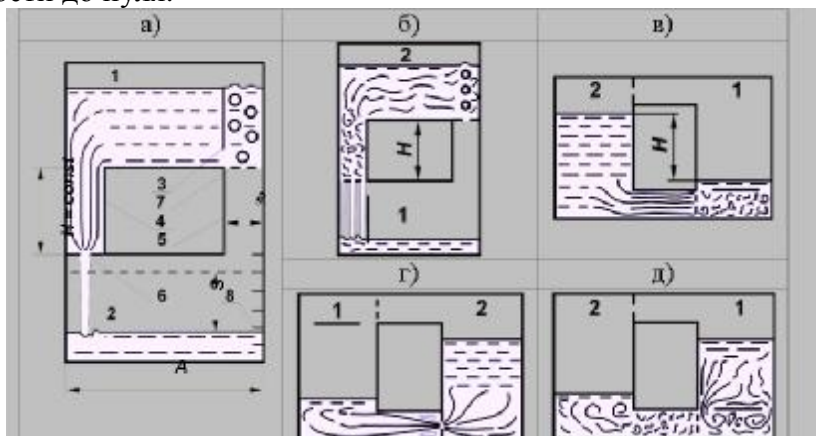


Рис. 4.1. Схема устройства № 3:

- 1, 2- баки; 3 - перегородка; 4, 5 - опытные каналы;
- 6 - щель; 7 - решетка; 8 - уровнемерная шкала

4.3. Порядок выполнения работы

1. Создать в канале 4 ламинарный режим движения жидкости. Для этого при заполненном водой баке 1 поставить

устройство баком 2 на стол (см. рис. 4.1,а). Наблюдать структуру потока.

2. Повернуть устройство в вертикальной плоскости по часовой стрелке на 180^0 (см. рис. 4.1, б). Наблюдать турбулентный режим течения в канале 5.

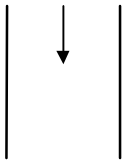
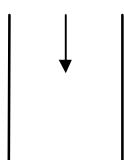
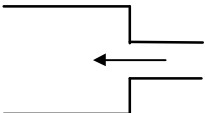
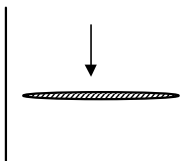
3. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 5 (с решеткой) занял нижнее горизонтальное положение (см. рис. 4.1, в). Наблюдать в канале процесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному. Обратит внимание, что решетка приводит к турбулизации потока за ней.

4. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 4 (с щелью) занял нижнее горизонтальное положение (рис. 4.1, г). Наблюдать за структурой потока в баке 2 при внезапном сужении, внезапном расширении в канале за щелью и при выходе потока из канала в бак 1. Обратит внимание на циркуляционные (вальцовые) зоны, транзитную струю и связь скоростей с площадями сечений каналов.

5. При заполненном баке 1 наблюдать структуру течения при обтекании перегородки 3 (рис. 4.1, д).

6. Сделать зарисовку структуры потоков для случаев, указанных в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Ламинарный режим	Турбулентный режим	Расширение потока	Обтекание стенки
			

РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ

Цель работы. Освоение расчетного метода определения режима течения.

5.1. Общие сведения

Критерием режима течения является *число Рейнольдса*

$$Re = Vd / \nu, \quad (4.1)$$

где V – средняя скорость потока;

d – внутренний диаметр трубы (канала);

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

В инженерной практике режим определяют путем сравнения числа Рейнольдса Re с его *критическим значением* Re_k , соответствующим смене режимов движения жидкости. Для равномерных потоков жидкости в трубах (каналах) круглого сечения принимают $Re_k = 2300$. Режим считается ламинарным, если $Re < Re_k$, и турбулентным при $Re \geq Re_k$.

Из выражения (4.1) следует, что числа Рейнольдса малы и, следовательно, режим ламинарный, при низких скоростях течения в каналах незначительного поперечного сечения (в порах грунта, капиллярах) или при движении жидкостей с большой вязкостью (нефть, масло, битумы).

Турбулентный режим в природе и технике встречается чаще. Его закономерностям подчиняется движение воды в реках, ручьях, каналах, системах водоснабжения и водоотведения, а также течение бензина, керосина и других маловязких жидкостей в трубах.

5.2. Порядок выполнения работы

1. Создать в канале 4 течение жидкости (рис. 4.1, а) при произвольном наклоне устройства № 3 от себя.

2. Измерить время t перемещения уровня воды в баке на некоторое расстояние S и снять показания термометра T , находящегося в устройстве № 1.

3. Подсчитать число Рейнольдса по порядку, указанному в табл. 5.1.

4. Повернуть устройство в его плоскости на 180° (рис. 4.1, б) и выполнить операции по п.п. 2, 3.

5. Сравнить полученные значения чисел Рейнольдса между собой и затем на основе сравнения с критическим значением сделать вывод о режиме течения.

Таблица 5.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	№ опыта	
			1	2
1.	Изменение уровня воды в баке, см	S		
2.	Время наблюдения за уровнем, с	t		
3.	Температура воды, $^\circ\text{C}$	T		
4.	Кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{см}^2/\text{с}$	$n = 17.9/(1000 + 34T + 0.22T^2)$		

5.	Объем воды, поступившей в бак за время t , см ³	$W = A B S$		
6.	Расход воды, см ³ /с	$Q = W/t$		
7.	Средняя скорость течения в канале, см/с	$V = Q/w$		
8.	Число Рейнольдса	$Re = Vd/n$		
9.	Название режима течения	$Re (<, >) Re_k = 2300$		

$A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $d = \dots$ см; $w = \dots$ см²

Примечание. Размеры поперечного сечения бака (А, В), гидравлический диаметр d и площадь поперечного сечения ω опытных каналов указаны на корпусе устройства № 3.

РАБОТА 6. ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы. Опытное подтверждение уравнения Д. Бернулли, т.е. понижения механической энергии по течению и перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно (связи давления со скоростью).

6.1. Общие сведения

Уравнение Д. Бернулли выражает закон сохранения энергии и для двух сечений потока реальной жидкости в упрощенном виде записывается так:

$$P_1/(rg) + V_1^2/(2g) = P_2/(rg) + V_2^2/(2g) + h_{TP},$$

где P – давление; V – средняя скорость потока в сечении; r – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h_{TP} – суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями 1-1 и 2-2; индексы «1» и «2» указывают номер сечения, к которому относится величина.

Слагаемые уравнения выражают *энергии*, приходящиеся на единицу веса (силы тяжести) жидкости, которые в гидравлике принято называть *напорами*: $P/(rg)=H_n$ - *пьезометрический* напор (потенциальная энергия), $V^2/(2g)=H_k$ - *скоростной* напор (кинетическая энергия), $P/(rg) + V^2/(2g) = H$ - *полный* напор (полная механическая энергия жидкости), $h_{тр}$ - *потери* напора (механической энергии за счет ее преобразования в тепловую энергию). Такие энергии измеряются в единицах длины, т.к. $Дж/Н = Нм/Н = м$.

Из уравнения следует, что в случае отсутствия теплообмена потока с внешней средой *полная удельная энергия* (включая тепловую) *неизменна вдоль потока*, и поэтому изменение одного вида энергии приводит к противоположному по знаку изменению другого. Таков *энергетический смысл* уравнения Бернулли. Например, при расширении потока скорость V и, следовательно, кинетическая энергия $V^2/(2g)$ уменьшаются, что в силу сохранения баланса вызывает увеличение потенциальной энергии $P/(rg)$. Другими словами, понижение скорости потока V по течению приводит к возрастанию давления P , и наоборот.

6.2. Описание устройства № 4

Устройство № 4 содержит баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы переменного 3 и постоянного 4 сечений (рис. 6.1). Каналы соединены между собой равномерно расположенными пьезометрами $I-V$, служащими для измерения пьезометрических напоров в характерных сечениях. Устройство заполнено подкрашенной водой. В одном из баков предусмотрена шкала 5 для измерения уровня воды.

При перевертывании устройства благодаря постоянству напора истечения H_0 во времени, обеспечивается установившееся движение воды в нижнем канале. Другой канал в это время

пропускает воздух, вытесняемый жидкостью из нижнего бака в верхний.

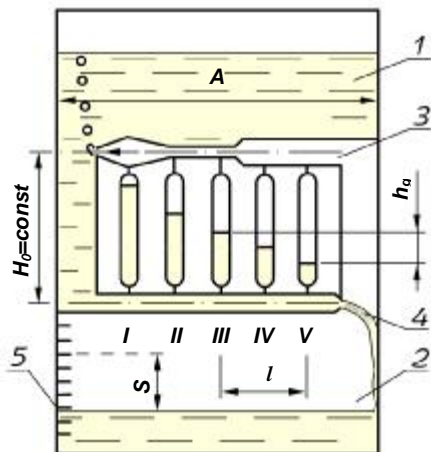


Рис. 6.1. Схема устройства № 4:

1,2 – баки; 3,4 – опытные каналы переменного и постоянно-го сечения; 5 – уровнемерная шкала; I-V – пьезометры

6.3. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 2 (рис. 6.1) перевернуть устройство для получения течения в канале переменного сечения 3.

2. Снять показания пьезометров $H_{II}=P/(rg)$ по нижним частям менисков воды в них.

3. Измерить время t перемещения уровня в баке на произвольно заданную величину S .

4. По размерам A и B поперечного сечения бака, перемещению уровня S и времени t определить расход Q воды в канале, а затем скоростные H_K и полные H напоры в сечениях канала по порядку, указанному в таблице 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Сечения канала					
			I	II	III	IV	V	VI
1.	Площадь сечения канала, см	w						
2.	Средняя скорость, см/с	$V = Q/w$						
3.	Пьезометрический напор, см	$H_{II}=P/(rg)$						
4.	Скоростной напор, см	$H_K=V^2/(2g)$						
5.	Полный напор, см	$H= P/(rg) + V^2/(2g)$						

$A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $S = \dots$ см; $t = \dots$ с; $Q = ABS / t = \dots$ см³/с

5. Вычертить в масштабе канал с пьезометрами (рис. 6.2). Соединив уровни жидкости в пьезометрах и центром выходного сечения VI, получить *пьезометрическую линию* 1, показывающую изменение потенциальной энергии (давления) вдоль потока. Для получения *напорной линии* 2 (линии полной механической энергии) отложить от оси канала полные напоры H и соединить полученные точки.

6. Проанализировать изменение полной механической H , потенциальной $P/(rg)$ и кинетической $V^2/(2g)$ энергий жидкости вдоль потока; выяснить соответствие этих изменений уравнению Бернулли.

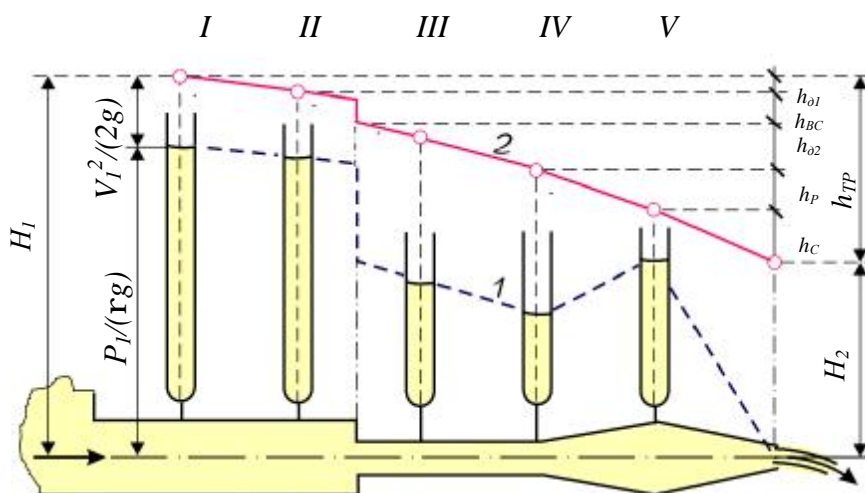


Рис. 6.2. Иллюстрация уравнения Бернулли:

1, 2 - пьезометрическая и напорная линии; H_1 , H_2 - полные напоры (механические энергии) на входе и выходе из канала; h_{TP} , h_{01} , h_{02} , h_{BC} , h_P , h_C - потери напора: суммарные, по длине на 1^{ом} и 2^{ом} участках, на внезапное сужение, на плавные расширения и сужения.

РАБОТА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА

Цель работы. Определение опытным путем потерь напора на преодоление местных сопротивлений и сравнение их с рассчитанными по инженерным формулам.

7.1. Общие сведения

Местные потери напора (энергии) жидкости возникают на коротких участках трубопровода с препятствиями для потока, называемыми местными сопротивлениями (внезапное

расширение и сужение труб, вентили, задвижки, клапаны, колена). В таких местах образуются циркуляционные зоны, на вращение жидкости в которых затрачивается часть механической энергии потока, называемая местными потерями напора. Величина местных потерь напора экспериментально определяется разностью полных напоров жидкости до и после местного сопротивления.

В инженерных расчетах для определения местных потерь напора используется формула $h_M = z V^2 / (2g)$, где z - коэффициент местного сопротивления (выбирается по справочнику); V – средняя скорость потока за местным сопротивлением.

7.2. Порядок выполнения работы

1. Перенести из табл.6.1 значения площадей сечений и скоростей в табл.7.1.
2. Определить опытные значения местных потерь h_M (h_{BC} , h_P) из графика (см. рис. 6.2).
3. Найти расчетные значения местных потерь, сравнить их с опытными и объяснить расхождения.

Таблица 7.1

№ п/п	Наименования величин	Обозначения, формулы	Вид сопротивления			
			сужение		расширение	
			1(II)	2(III)	1(IV)	2(V)
1	2	3	4	5	6	7
1.	Площади сечений, см^2	w				
2.	Средние скорости за сопротивлением, см/с	V_2				

3.	Опытные значения местных потерь, см	$h_M(h_{BC}, h_p)$		-----
4.	Коэффициенты местных сопротивлений	$z_{BC}=0.5(1-w_2/w_1)$ $z_{BP}=(w_2/w_1 - 1)^2$	-----	
5.	Расчетные значения местных потерь, см	$h_M = z V_2^2/(2g)$		

Примечание: ζ_{BC} , ζ_{BP} - коэффициенты для внезапных сужения и расширения.

РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Цель работы. Освоение экспериментального и расчетного способов определения потерь напора на трение по длине.

8.1. Общие сведения

Потери напора по длине вызваны тормозящим действием стенок, приводящим к вязкостному трению частиц и струек жидкости друг о друга вдоль трубопровода. Они определяются по формуле:

$$h_{\text{тр}} = l (l/d) V^2/(2g),$$

где l - коэффициент гидравлического трения; l , d - соответственно длина и внутренний диаметр трубы (канала); V - средняя скорость. В опытах потери напора по длине определяются разностью показаний пьезометров, установленных на концах опытного участка канала, т.к. скоростной напор не изменяется по пути.

8.2. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 поставить устройство № 4 на стол баком 2 (рис. 6.1).

2. Снять показания пьезометров $I-V$, измерить время t изменения уровня в баке на произвольно заданную величину S и температуру T в помещении.

3. Построить по показаниям пьезометров пьезометрическую линию. На этой линии выделить участок с постоянным уклоном (обычно участок $III-V$), соответствующий равномерному течению. Определить его длину l и *опытное* значение потерь h_f по показаниям крайних пьезометров на нем (рис. 6.1.).

4. Найти число Рейнольдса и *расчетное* значение потерь напора h_f^* по порядку, указанному в табл. 8.1, и относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь напора. Объяснить это расхождение.

Таблица 8.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Значения величин
1	2	3	4
1.	Показания пьезометров, см	$P_I/(rg), \dots, P_V/(rg)$	
2.	Длина участка с равномерным движением, см	l	
3.	Опытное значение потерь напора по длине, см	$h_f = P_I/(rg) - P_V/(rg)$	
4.	Кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{см}^2/\text{с}$	$n = 17.9/(1000 + 34T + 0.22T^2)$	
5.	Число Рейнольдса	$Re = Vd/n$	

6.	Коэффициент трения при $Re < 2300$ $2300 < Re < 10d/D$ $Re > 10d/D$	$I = 64/Re$ $I = 0.316/Re^{0.25}$ $I = 0.11(68/Re + D/d)^{0.25}$	
7.	Расчетное значение потерь напора по длине, см	$h_{\text{л}}^* = I(l/d) V^2/(2g)$	
8.	Относительное рас- хождение опытного и расчетного значений потерь	$d_h = (h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^*)/h_{\text{л}}$	

$d = \dots$ см; $w = \dots$ см²; $A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $T = \dots$ °C; $S = \dots$ см;
 $t = \dots$ с; $Q = ABS/t = \dots$ см³/с; $V = Q/w = \dots$ см/с.

Примечание. Абсолютную шероховатость стенок кана-
 ла принять равной $\Delta = 0.001$ мм.

ПРАКТИКУМ ПО МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТИ
На портативной лаборатории

«КАПЕЛЬКА»

Г. Д. Слабожанин, Д. Г. Слабожанин

Подписано в печать Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л.0,9. Уч.-изд. л.0,8
Тираж 50 экз. Заказ № 1923.