

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений"

**С.Е. Тверская**

# ГИДРОМЕХАНИКА

**Учебно-методическое пособие**  
по проведению лабораторного практикума



Севастополь  
СевГУ  
2022

**УДК 532.5 (076.5)**

**ББК 30.123я73**

**Т26**

**Р е ц е н з е н т :**

**В.И. Истомин** - доктор технических наук, профессор кафедры  
"Судовождение и безопасность судоходства"

**А.Ю. Гаршин** - кандидат технических наук, доцент кафедры  
"Энергоустановки морских судов и сооружений"

**Тверская, С.Е.**

**Т26    Гидромеханика:** учебно-методическое пособие по проведению лабораторного практикума / С.Е. Тверская; Министерство науки и высшего образования РФ, ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет", Морской институт, кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений" – 2-е изд., перераб. и доп.– Севастополь: СевГУ, 2022. – 70 с. ил. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является закрепление студентами теоретических знаний по дисциплине «Гидромеханика», ознакомление с измерительной аппаратурой и получение практических навыков проведения исследований и расчетов процессов в гидравлических системах и устройствах.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок.

УДК 532.5 (076.5)

ББК 30.123я73

Пособие рассмотрено на заседании Ученого совета Морского института ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет" и рекомендовано к внедрению в учебный процесс по дисциплине "Гидромеханика", протокол № 4 от 22 марта 2022 г.

© Тверская С.Е., 2022

© ФГАОУВО «Севастопольский  
государственный университет», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                         | 5  |
| 1. Лабораторная работа № 1. Приборы для измерения давления.                                                                                           |    |
| Определение погрешности показаний манометра.....                                                                                                      | 6  |
| 1.1. Цель работы.....                                                                                                                                 | 6  |
| 1.2. Теоретический раздел.....                                                                                                                        | 6  |
| 1.3. Описание лабораторной установки.....                                                                                                             | 14 |
| 1.4. Порядок выполнения опытов.....                                                                                                                   | 14 |
| 1.5. Обработка опытных данных.....                                                                                                                    | 15 |
| 1.6. Контрольные вопросы.....                                                                                                                         | 18 |
| 2. Лабораторная работа № 2. Исследование режимов движения жидкости. Определение числа Рейнольдса.....                                                 | 19 |
| 2.1. Цель работы.....                                                                                                                                 | 19 |
| 2.2. Теоретический раздел.....                                                                                                                        | 19 |
| 2.3. Описание лабораторной установки.....                                                                                                             | 23 |
| 2.4. Порядок выполнения опытов.....                                                                                                                   | 24 |
| 2.5. Обработка опытных данных.....                                                                                                                    | 25 |
| 2.6. Контрольные вопросы.....                                                                                                                         | 27 |
| 3. Лабораторная работа № 3. Проверка уравнения Бернулли.....                                                                                          | 28 |
| 3.1. Цель работы.....                                                                                                                                 | 28 |
| 3.2. Теоретический раздел.....                                                                                                                        | 28 |
| 3.3. Описание лабораторной установки.....                                                                                                             | 32 |
| 3.4. Порядок выполнения опытов.....                                                                                                                   | 33 |
| 3.5. Обработка опытных данных.....                                                                                                                    | 34 |
| 3.6. Контрольные вопросы.....                                                                                                                         | 35 |
| 4. Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента гидравлического трения $\lambda$ по длине трубопровода при установившемся движении жидкости..... | 36 |
| 4.1. Цель работы.....                                                                                                                                 | 36 |
| 4.2. Теоретический раздел.....                                                                                                                        | 36 |
| 4.3. Описание лабораторной установки.....                                                                                                             | 45 |
| 4.4. Порядок выполнения опытов.....                                                                                                                   | 46 |
| 4.5. Обработка опытных данных.....                                                                                                                    | 47 |
| 4.6. Контрольные вопросы.....                                                                                                                         | 48 |
| 5. Лабораторная работа № 5. Определение коэффициентов местных сопротивлений.....                                                                      | 49 |
| 5.1. Цель работы.....                                                                                                                                 | 49 |
| 5.2. Теоретический раздел.....                                                                                                                        | 49 |
| 5.3. Описание лабораторной установки.....                                                                                                             | 53 |
| 5.4. Порядок выполнения опытов.....                                                                                                                   | 54 |
| 5.5. Обработка опытных данных.....                                                                                                                    | 55 |
| 5.6. Контрольные вопросы.....                                                                                                                         | 56 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 6. Исследование истечения жидкости через отверстие и насадок..... | 57 |
| 6.1. Цель работы.....                                             | 57 |
| 6.2. Теоретический раздел.....                                    | 57 |
| 6.3. Описание лабораторной установки.....                         | 63 |
| 6.4. Порядок выполнения опытов.....                               | 63 |
| 6.5. Обработка опытных данных.....                                | 64 |
| 6.6. Контрольные вопросы.....                                     | 65 |
| 7. Содержание отчета о выполнении работы.....                     | 66 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....                                     | 67 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А                                                      |    |
| Соотношения между единицами давления.....                         | 68 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б                                                      |    |
| Коэффициенты кинематической вязкости $\nu$ воды.....              | 69 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В                                                      |    |
| Форма титульного листа отчета о выполнении лабораторной работы..  | 70 |

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Гидромеханика» имеют цель привить студентам практические навыки проведения экспериментальных исследований, научить их понимать физическую сущность процессов, происходящих в гидравлических системах и устройствах, грамотно использовать измерительную аппаратуру и уметь обрабатывать опытные данные.

Выполнение одной работы включает следующие этапы: ознакомление с лабораторной установкой, получение допуска к проведению эксперимента, снятие показаний приборов, обработка опытных данных, оформление отчета и защита полученных результатов.

При выполнении лабораторной работы следует строго придерживаться правил техники безопасности. Включение любой установки производится только с разрешения преподавателя.

Для получения допуска к проведению лабораторной работы необходимо:

- иметь подготовленный отчет к выполняемой работе, включающий ее название, цель, краткие теоретические сведения, схему лабораторной установки и измерительную таблицу;
- знать теоретические основы по теме выполняемой работы;
- знать порядок проведения опыта.

Во время защиты лабораторной работы преподаватель проверяет правильность полученных студентом результатов, его теоретические знания и умение применять их на практике.

Контрольные вопросы, приведенные в конце каждого раздела, должны являться основой при подготовке к защите лабораторных работ.

Оформление отчетов и подготовка к их защите студентами осуществляется в отведенное для самостоятельной работы время.

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОКАЗАНИЙ МАНОМЕТРА

## 1.1. Цель работы

Целью работы является изучение приборов для измерения давления и определение погрешности измерений механического манометра.

## 1.2. Теоретический раздел

Под *давлением* жидкости понимают отношение нормальной силы  $F$ , действующей на данную поверхность, к площади  $S$  этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Единицей давления в Международной системе единиц СИ является Паскаль (Па) – это давление, создаваемое силой в один Ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью, равной одному квадратному метру ( $\text{м}^2$ ).  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

Более удобными для практического использования являются кратные единицы – килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа):

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}.$$

В связи с тем, что большинство измерительных приборов градуировано еще в старых (внесистемных) единицах, а также то, что в справочной литературе, каталогах и технических характеристиках их пока используют, соотношения между различными единицами давления приведены в приложении А.

Различают атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление.

*Атмосферное давление*  $B$  создается весом столба воздуха, простирающегося от уровня земли до высоты более 300 километров. Нормальное атмосферное давление на уровне моря при температуре  $0^\circ\text{C}$  принимают равным 101325 Па (1 атм или 760 мм.рт.ст.).

*Абсолютное давление*  $p$  – это полное давление в жидкости от действия всех сил, как массовых, так и поверхностных [1].

Абсолютное давление в любой точке покоящейся жидкости определяется из основного закона гидростатики:

$$p = p_0 + \gamma h.$$

Абсолютное давление:

а) направленно по внутренней нормали к поверхности, на которую действует;

б) в данной точке жидкости по всем направлениям одинаково;

в) увеличивается в зависимости от глубины погружения точки в жидкость по линейному закону;

г) в случае абсолютного покоя однородной жидкости на любой горизонтальной поверхности одинаково.

Если абсолютное давление жидкости в резервуаре больше атмосферного, то говорят об *избыточном давлении*  $p_u$ , под которым понимают разность:

$$p_u = p - B.$$

Таким образом, избыточное давление – это превышение абсолютного давления над атмосферным.

Если абсолютное давление жидкости в резервуаре меньше атмосферного, то говорят об *вакуумметрическом давлении* (вакууме или разрежении)  $p_v$ :

$$p_v = B - p.$$

Таким образом, вакуумметрическое давление – это недостаток абсолютного давления до атмосферного. Часто его называют отрицательным избыточным давлением.

Приборы, служащие для измерения избыточного давления, называются манометрами, вакуумметрического – вакуумметрами, атмосферного – барометрами [2].

Наибольшее распространение получили *жидкостные* и *механические манометры*. В первых – измеряемое избыточное давление или разность давлений в различных точках уравнивается давлением столба жидкости, во вторых – избыточное давление определяется по деформации чувствительного элемента.

Простейший жидкостный манометр, называемый *пьезометром*, изображен на рисунке 1.1. Он состоит из вертикальной стеклянной трубки с внутренним диаметром не менее 5 мм (обычно 8 – 15 мм), что позволяет исключить ошибку от капиллярных явлений, и шкалы. Один конец трубки присоединен к месту, где измеряется давление, а другой – сообщается с атмосферой.

Избыточное давление на уровне нуля шкалы пьезометра определяется по формуле:

$$p_u = \gamma h_p, \quad (1.1)$$

где  $h_p$  – высота столба жидкости в трубке пьезометра (пьезометрическая высота), м.

Абсолютное давление в месте присоединения пьезометра определяется по формуле:

$$p = B + p_u.$$

Пьезометр удобен для измерения давлений до 0,03 МПа (0,3 ат). При больших давлениях габариты прибора (высота трубки) резко увеличиваются.

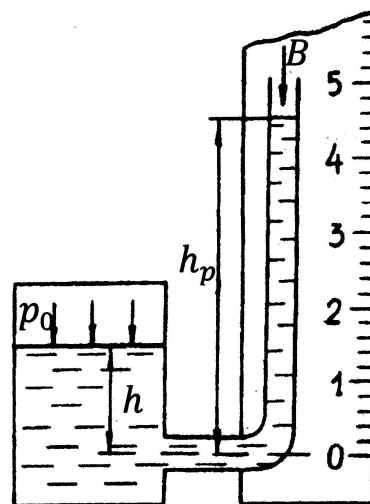


Рисунок 1.1 – Пьезометр

Как видно из формулы (1.1), одному и тому же избыточному давлению будут соответствовать в зависимости от удельного веса жидкости  $\gamma$  разные пьезометрические высоты  $h_p$ . Поэтому для измерения давлений больших 0,03 МПа в качестве рабочей жидкости применяют ртуть.

На рисунке 1.2 изображена схема *U* – образного манометра, с помощью которого измеряется разность уровней ртути  $\Delta h$  в левом и правом коленях.

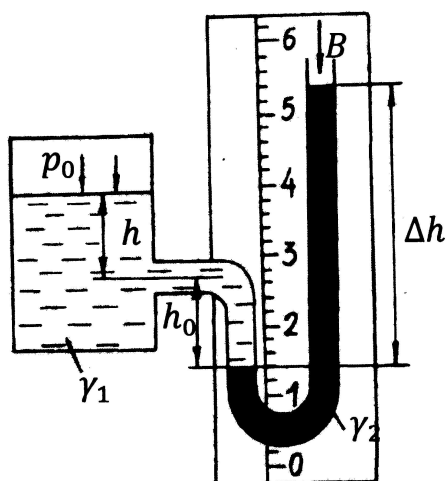


Рисунок 1.2 – U – образный манометр

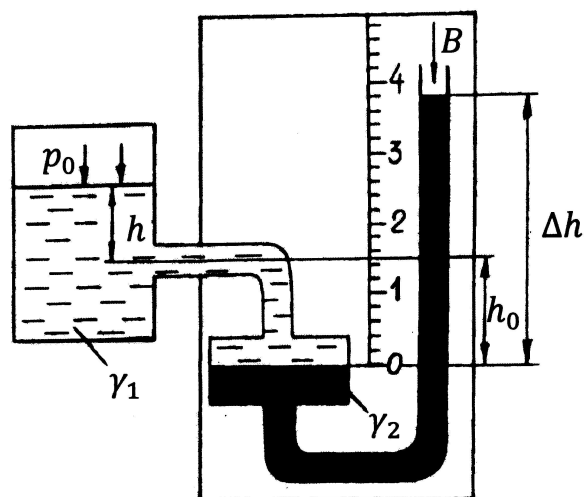


Рисунок 1.3 – Чашечный манометр

Избыточное давление в месте присоединения манометра (на глубине  $h$ ) определяется по формуле:

$$p_u = \gamma_2 \Delta h - \gamma_1 h_0, \quad (1.2)$$

где величину  $\gamma_1 h_0$  рассматривают как поправку к показанию прибора, обусловленную его расположением по отношению к точке, в которой определяется давление. Если  $\gamma_1$  значительно меньше  $\gamma_2$  этой величиной можно пренебречь, тогда формула (1.2) примет вид:

$$p_u = \gamma_2 \Delta h.$$

Недостаток U – образного манометра – изменяющееся положение уровней жидкостей в коленях, что не позволяет зафиксировать начальную точку отсчета на шкале и, соответственно, вносит сложности в процесс измерения.

На рисунке 1.3 изображена схема *чашечного манометра*. Этот прибор, позволяющий ограничиться одним отсчетом уровня жидкости, является усовершенствованным U – образным манометром, в котором левое колено трубки соединено с широкой чашкой, заполненной ртутью. Нуль отсчета на шкале совпадает с уровнем ртути в чашке. Размеры чашки должны быть таковы, чтобы понижением уровня ртути в ней можно было пренебречь. Давление рассчитывается по формуле (1.2).

Для измерения очень малых давлений применяются *микроманометры* (рисунок 1.4), в которых для большей чувствительности вертикальная

трубка заменяется наклонной. В результате вместо малой высоты  $h$  можно определять большую величину  $l$ , используя после этого зависимость:

$$p_u = \gamma l \sin \alpha.$$

При уменьшении угла наклона трубки  $\alpha$  чувствительность микроманометра возрастает.

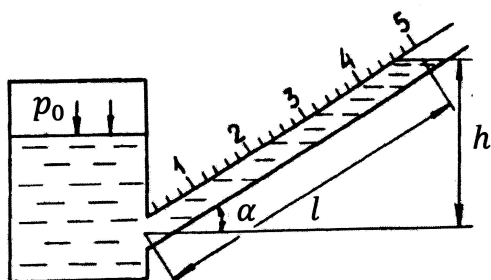


Рисунок 1.4 – Микроманометр

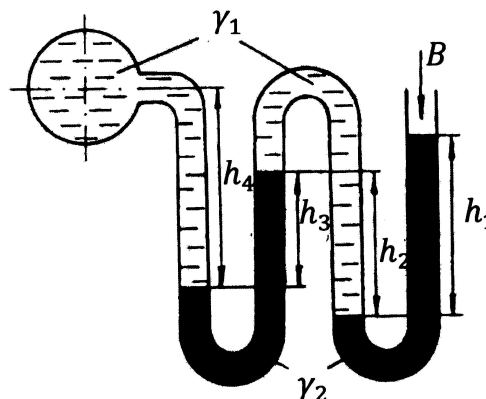


Рисунок 1.5 – Батарейный манометр

Для повышения предела измеряемых давлений используется *батарейный манометр* (рисунок 1.5), состоящий из последовательно соединенных двух или нескольких U – образных трубок. Избыточное давление в месте присоединения манометра определяется как

$$p_u = \gamma_2 h_1 - \gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_3 - \gamma_1 h_4.$$

Если  $\gamma_1$  значительно меньше  $\gamma_2$  избыточное давление в резервуаре определяется как сумма давлений, показанных U – образными трубками:

$$p_u = \gamma_2 h_1 + \gamma_2 h_3.$$

Разность давлений в двух резервуарах или в двух точках трубопровода измеряется *дифференциальным пьезометром* или *дифференциальным ртутным манометром*.

Дифференциальный пьезометр (рисунок 1.6) представляет собой два обыкновенных пьезометра, соединенных вверху между собой. При любом давлении воздуха в пьезометре (которым пренебрегают) разность давлений в двух точках 1 и 2 одинаковой жидкости, расположенных на одной и той же высоте, определяется по формуле:  $\Delta p = \gamma h$ .

Дифференциальный манометр (рисунок 1.7) представляет собой U – образную стеклянную трубку, заполненную жидкостью большей плотности  $\rho_2$ , чем жидкость с плотностью  $\rho_1$ , в которой производят измерения.

Давления в точках 1 и 2 различно ( $p_1 > p_2$ ), равенство же давлений будет иметь место в точках 3 и 4, то есть  $p_3 = p_4$ .

Разность давлений в точках 1 и 2 определяется по формуле:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\gamma_2 - \gamma_1) \Delta h. \quad (1.3)$$

Если  $\gamma_1$  значительно меньше  $\gamma_2$  (например, когда первой жидкостью является воздух, а второй – вода), то величиной  $\gamma_1$  можно пренебречь, тогда формула (1.3) примет вид  $\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma_2 \Delta h$ .

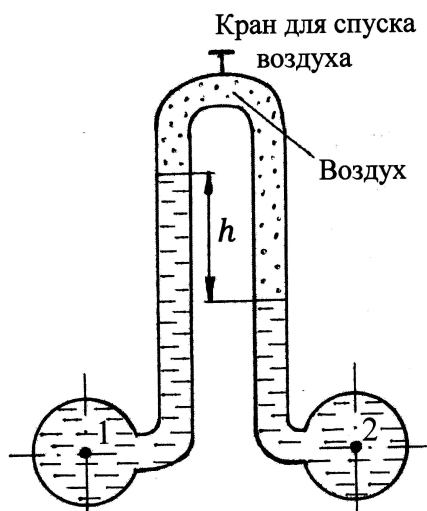


Рисунок 1.6 – Дифференциальный пьезометр

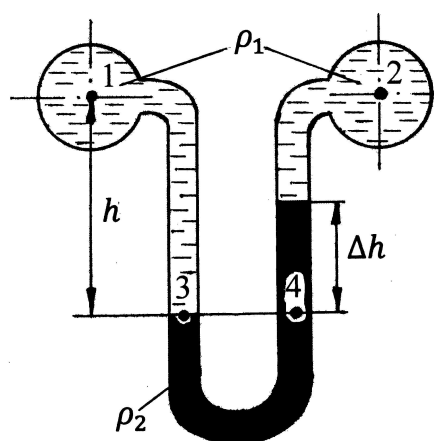


Рисунок 1.7 – Дифференциальный манометр

Жидкостные манометры отличаются высокой точностью измерений, простотой конструкции и тарировки, но из-за их громоздкости при измерении больших давлений применяются в основном только в лабораторной практике.

В отличие от жидкостных манометров механические манометры способны измерять значительные давления (более 0,3 – 0,4 МПа), имея при этом небольшие габариты. В качестве чувствительного элемента в таких манометрах используются трубчатые пружины, мембраны и сильфоны.

Наибольшее распространение в технике получил манометр с трубчатой пружиной (трубкой Бурдона), изображенный на рисунке 1.8.

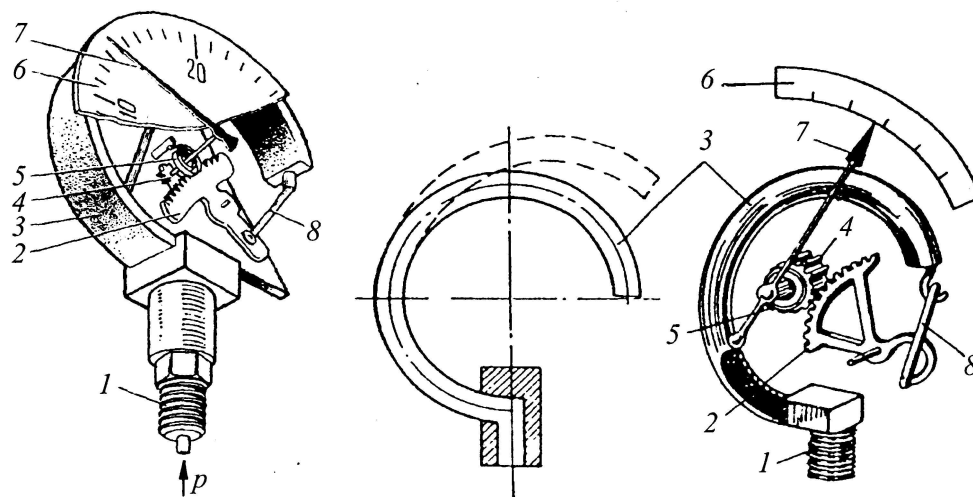


Рисунок 1.8 – Механический манометр с трубчатой пружиной (трубкой Бурдона):

- 1 – соединительный ниппель; 2 – зубчатый сектор; 3 – трубчатая пружина;  
4 – шестерня; 5 – спиральная часовая пружина (исключает влияние зазоров (люфтов) передаточного механизма на показания манометра); 6 – шкала прибора;  
7 – стрелка; 8 – тяга

Основная деталь такого манометра представляет собой согнутую полую латунную или стальную трубку овального или эллиптического сечения, запаянную с одного конца и сообщающуюся другим концом с объемом, в котором измеряется давление. Площадь наружной закругленной поверхности больше внутренней. Если давление в исследуемом объеме, а значит и внутри трубки,  $p$  больше атмосферного  $B$ , то возникает равнодействующая сил давления, направленная наружу. Под действием этой силы трубка стремится распрямиться, перемещая стрелку, движущуюся вдоль шкалы.

*Мембранный манометр* (рисунок 1.9) в качестве основной детали имеет мембрану волнообразного сечения. Под действием давления  $p$  мембрана деформируется. Эта деформация при помощи легкого механизма передается стрелке, перемещающейся вдоль проградуированной шкалы.

*Сильфоны* (рисунок 1.10) представляют собой гофрированные металлические трубки с одним закрытым концом, способные деформироваться под действием измеряемого давления.

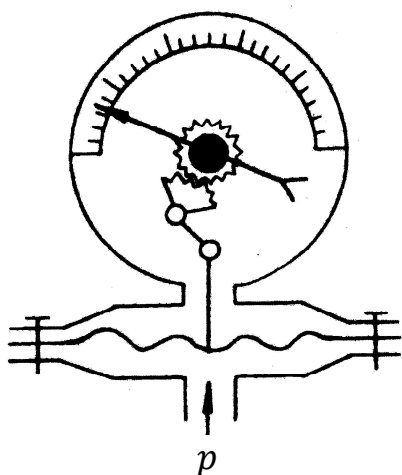


Рисунок 1.9 – Механический манометр с мембраной

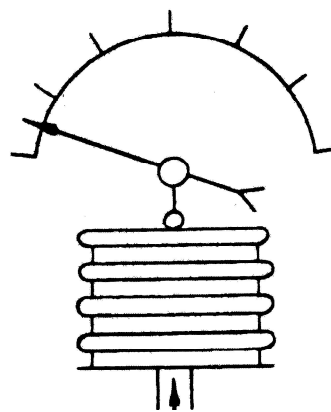


Рисунок 1.10 – Механический манометр с сильфоном

При измерениях необходимо учитывать положение механического манометра относительно точки его подключения (см. рисунок 1.11).

Действительное избыточное давление в точке подключения манометра:

$$p_u = p_m \pm \gamma h.$$

где  $p_m$  – показание манометра;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, заполняющий соединительную линию;

$h$  – расстояние по вертикали от точки подключения до центра манометра.

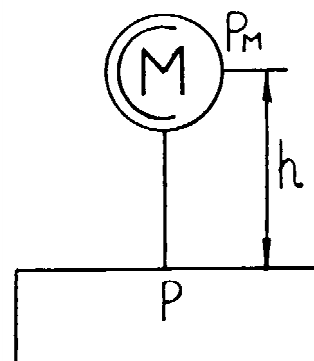


Рисунок 1.11 – Учет положения манометра относительно точки его подключения

При расположении манометра выше точки подключения берется знак «плюс», ниже – знак «минус».

К недостаткам механических манометров следует отнести сложность тарировки и изменение показаний с течением времени.

Для измерения вакуумметрического давления применяются *жидкостные и механические вакуумметры*.

Простейшие жидкостные вакуумметры, измеряющие разрежение (вакуум) в резервуаре с капельной жидкостью (в точке А) и с газом изображены соответственно на рис. 1.12 и 1.13.

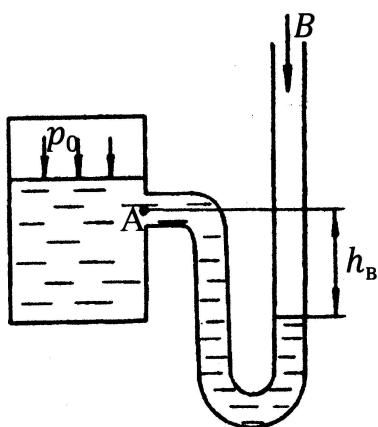


Рисунок 1.12 – U – образный жидкостный вакуумметр

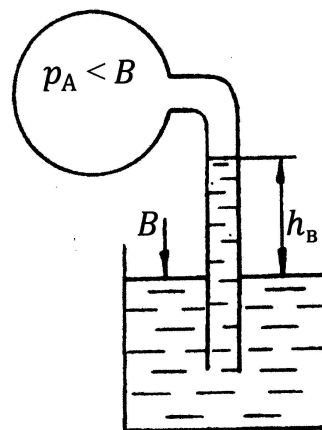


Рисунок 1.13 – Жидкостный вакуумметр для измерения разрежения газа

Если в месте присоединения прибора абсолютное давление  $p_A$  меньше атмосферного  $B$ , то жидкость в трубке либо опускается (в правом колене вакуумметра на рисунке 2.12), либо поднимается (рисунке 2.13) на вакуумметрическую высоту  $h_B$ . Вакуумметрическое давление определяется по формуле:

$$p_{\text{в}} = \gamma h_{\text{в}}.$$

Абсолютное давление в месте присоединения вакуумметра определяется по формуле:

$$p = B - p_{\text{в}}.$$

Принцип действия и конструкция механических вакуумметров аналогичны механическим манометрам с трубчатой пружиной. Однако их пружина более эластична, так как предназначена для измерения малых давлений и поэтому должна обладать большей чувствительностью. Особенностью работы пружины вакуумметра заключается в том, что атмосферное давление, которое больше измеряемого, стремится ее сжать, а поэтому она при работе не раскручивается, как у манометра, а наоборот, закручивается. Диапазон измерения вакуумметра от 0 до 1 ат (от 0 до 100 кПа (рисунки 1.14)).

Приборы для измерения как избыточного, так и вакуумметрического давления называются *мановакуумметрами* (рисунок 1.15).



Рисунок 1.14 – Механический вакуумметр

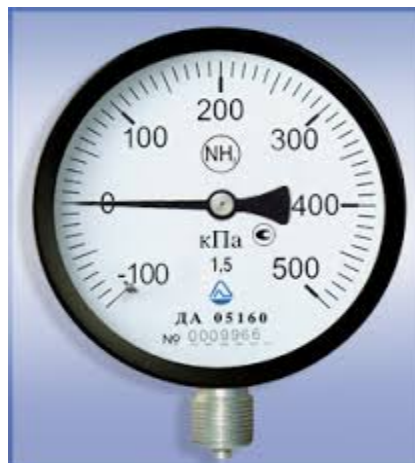


Рисунок 1.15 – Мановакуумметр

Для измерения атмосферного давления применяются *жидкостные и механические барометры*. *Жидкостный барометр* представляет собой запаянную с одного конца стеклянную трубку, заполненную ртутью (рисунок 1.16). Открытым концом трубка погружена в чашку с ртутью. Пространство над ртутью в трубке безвоздушное (воздух откачен),  $p_0 = 0$ . Поэтому давление столба ртути в трубке на уровне ее свободной поверхности в чашке, с одной стороны, равно  $\gamma_{рт} h_{рт}$ , а с другой – атмосферному давлению, то есть

$$B = \gamma_{рт} h_{рт}.$$

*Механический барометр – aneroid* изображен на рисунке 1.17. Он представляет собой круглую металлическую коробку со шкалой и стрелкой. На шкалу нанесены величины давления, обычно в сантиметрах ртутного столба. Из коробки, к крышке которой присоединена пружина, выкачан воздух. Под действием атмосферного давления крышка прогибается, пружина при этом деформируется, перемещая вдоль шкалы стрелку.

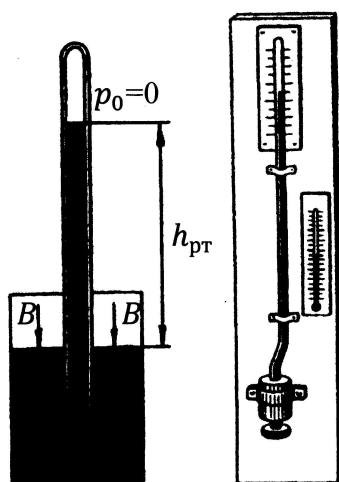


Рисунок 1.16 – Жидкостный барометр

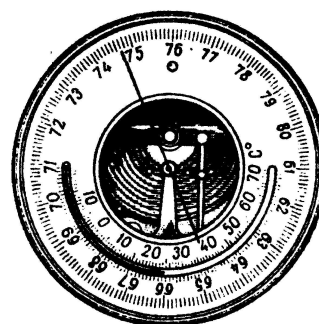


Рисунок 1.17 – Механический барометр – aneroid

### 1.3. Описание лабораторной установки

Определение погрешности показаний механического манометра производится на установке, схема которой представлена на рисунке 1.18 [8].

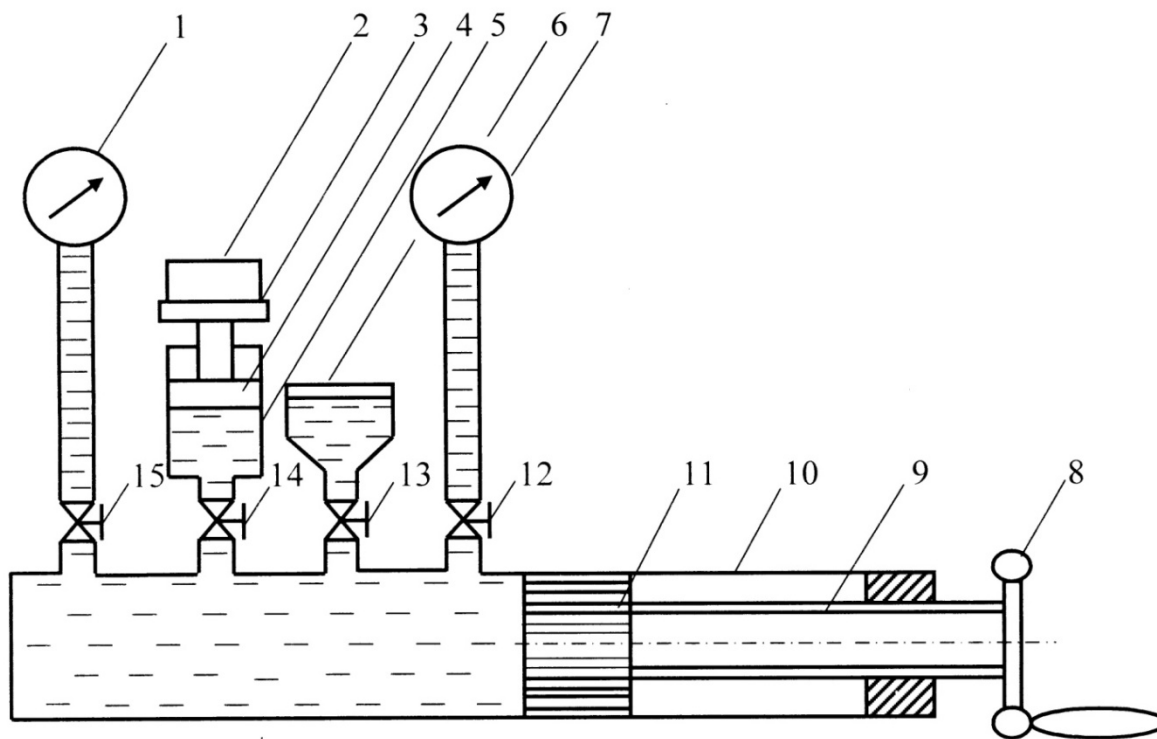


Рисунок 1.18 – Схема лабораторной установки:

- 1 – проверяемый манометр; 2 – контрольные грузы; 3 – тарелка;  
 4 – плунжер; 5, 10 – прессы; 6 – масленка; 7 – контрольный манометр;  
 8 – маховик; 9 – винтовой шток; 11 – поршень; 12, 13, 14, 15 – вентили

Масло в систему поступает из масленки 6. Давление в установке создается двумя прессами 5 и 10. В первом – плунжером 4 за счет установки на тарелке 3 контрольных грузов 2, во втором – поршнем 11, который с помощью винтового штока 9 перемещается при вращении маховика 8. К установке подключаются проверяемый 1 и контрольный 7 манометры. Установка оборудована вентилями 12, 13, 14 и 15.

### 1.4. Порядок выполнения опытов

Исходное состояние установки: поршень 11 находится в крайнем левом положении, вентили 12, 13, 14 и 15 закрыты.

Определение погрешности показаний манометра можно производить двумя способами:

- с использованием контрольных грузов;*
- по показаниям контрольного манометра.*

Преподаватель указывает, каким из двух перечисленных способов выполняется проверка манометра.

Последовательность операций при проверке манометра с использованием контрольных грузов:

- открыть вентиль 14;
- вращая маховик 8 и, тем самым, перемещая поршень 11 вправо, заполнить установку маслом из масленки 6;
- закрыть вентиль 14;
- открыть вентили 12 и 13;
- последовательно установить на тарелку 3 контрольные грузы 2;
- разгрузить тарелку 3, последовательно снимая контрольные грузы;
- закрыть вентили 12 и 13;
- открыть вентиль 14 и, вращая маховик 8, перекачать масло в масленку 6 (поршень 11 переходит в крайнее левое положение).

Под действием веса контрольных грузов и тарелки под плунжером создается строго определенное давление  $p_d$ , которое можно считать одинаковым во всей системе (следствие из закона Паскаля). Показание стрелки проверяемого манометра 1 должно соответствовать величине данного давления. Во избежание влияния трения плунжера 4 о стенки цилиндра прессы 5 тарелке 3 с грузами 2 во время опыта необходимо придавать вращательное движение.

Последовательность операций при проверке манометра по показаниям контрольного манометра:

- открыть вентиль 14;
- вращая маховик 8 и, тем самым, перемещая поршень 11 вправо, заполнить установку маслом из масленки 6;
- закрыть вентиль 14;
- открыть вентили 12 и 15;
- вращением маховика 8 поршнем 11 в полости установки создается определенное давление, измеряемое контрольным 7 и проверяемым 1 манометрами;
- последовательно повысить давление, задавая по контрольному манометру 11 соответствующие значения  $p_d$ , указанные преподавателем;
- последовательно снизить давление до нуля;
- закрыть вентили 12 и 15;
- открыть вентиль 14 и, вращая маховик 8, перекачать масло в масленку 1 (поршень 11 переходит в крайнее левое положение).

### 1.5. Обработка опытных данных

При определении погрешности показаний манометра с использованием контрольных грузов действительное значение давления  $p_d$ , в системе определяется как отношение веса контрольных грузов и тарелки  $G$  к площади плунжера  $S$ :

$$p_d = \frac{G}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{(m_{\text{гр}} + m_{\text{т}})g}{S}, \text{Па}$$

где  $m_{\text{гр}}$  – масса контрольных грузов (в опытах используются семь контрольных грузов по 5 кг и три – по 1 кг);

$m_{\text{т}} = 1$  кг – масса тарелки.

Площадь плунжера  $S$  равна  $10^{-4} \text{ м}^2$ .

Действительное значение давления  $p_d$  в системе и показание проверяемого манометра  $p_m$  для каждого замера свести в таблицу 1.1.

Погрешность показаний манометра определяется по формуле:

$$\Delta p = p_d - p_m.$$

Величина погрешности также заносится в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Опытные данные и их обработка

| № за-ме-ра | Масса контрольных грузов и тарелки | Действительные значения давления | Показания проверяемого манометра и величина погрешности |            |                 |               |            |                 |
|------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|------------|-----------------|
|            |                                    |                                  | при нагрузке                                            |            |                 | при разгрузке |            |                 |
|            | $m$ , кг                           | $p_d$ , Па                       | $p_m$ , ат                                              | $p_m$ , Па | $\Delta p$ , Па | $p_m$ , ат    | $p_m$ , Па | $\Delta p$ , Па |
| 1.         | 6                                  |                                  |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 2.         | 11                                 |                                  |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 3.         | 16                                 |                                  |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 4.         | 21                                 |                                  |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 5.         | 26                                 |                                  |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 6.         | 31                                 |                                  |                                                         |            |                 |               |            |                 |

При определении погрешности показаний манометра по показаниям контрольного манометра показания свести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2– Опытные данные и их обработка

| № за-ме-ра | Показание контрольного манометра |               | Показания проверяемого манометра и величина погрешности |            |                 |               |            |                 |
|------------|----------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|------------|-----------------|
|            | при нагрузке                     | при разгрузке | при нагрузке                                            |            |                 | при разгрузке |            |                 |
|            | $p_d$ , ат                       | $p_d$ , Па    | $p_m$ , ат                                              | $p_m$ , Па | $\Delta p$ , Па | $p_m$ , ат    | $p_m$ , Па | $\Delta p$ , Па |
| 1.         |                                  |               |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 2.         |                                  |               |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 3.         |                                  |               |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 4.         |                                  |               |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 5.         |                                  |               |                                                         |            |                 |               |            |                 |
| 6.         |                                  |               |                                                         |            |                 |               |            |                 |

По данным таблиц 1.1 или 1.2 следует построить график зависимости  $\Delta p = f(\Delta p)$  для нагрузки и разгрузки. Один из возможных вариантов графической зависимости представлен на рисунке 1.19. Опытные точки соединяются при этом прямыми линиями.

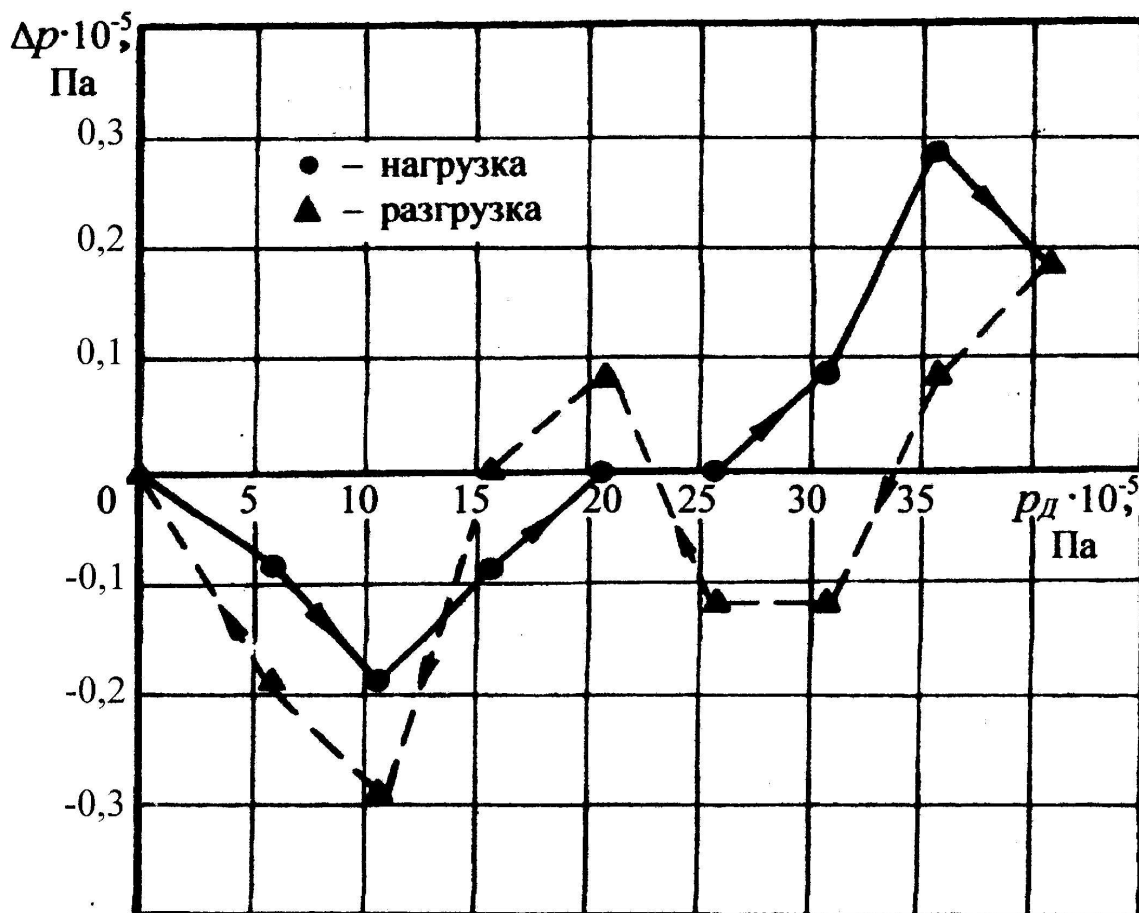


Рисунок 1.19 – Один из возможных вариантов графической зависимости  $\Delta p = f(\Delta p)$

Допустимая абсолютная погрешность проверяемого манометра определяется по формуле:

$$\Delta p_{\text{доп}} = \frac{p_{\text{max}} \cdot k}{100},$$

где  $p_{\text{max}}$  – максимальное значение шкалы манометра, Па;

$k$  – класс точности манометра, % (указано на приборе).

Сравнивается максимальное полученное значение погрешности  $\Delta p$  с допустимым значением  $\Delta p_{\text{доп}}$ . Манометр считается пригодным к эксплуатации, если  $\Delta p_{\text{доп}}$  больше  $\Delta p$ .

## 1.6. Контрольные вопросы

1. Название, цель и содержание работы.
2. Понятие давления жидкости, его свойства и единицы измерения.
3. В чем различие между абсолютным, атмосферным, избыточным и вакуумметрическим давлением? Может ли избыточное и вакуумметрическое давление быть больше (меньше) атмосферного?
4. Что выражает основной закон гидростатики?
5. Типы манометров, их устройство и принцип действия. Преимущества и недостатки жидкостных и механических манометров?
6. Понятие пьезометрической высоты. Как она меняется при увеличении удельного веса рабочей жидкости?
7. Влияет ли положение манометра относительно точки его подключения на точность измерения давления?
8. Принцип действия вакуумметров. Понятие вакуумметрической высоты и максимального вакуума. Чем он ограничивается?
9. Принцип действия барометров.
10. Сформулировать закон Паскаля и привести примеры его практического применения.
11. Каково устройство установки для проверки манометра?
12. Каковы два способа проверки манометра и соответствующая им последовательность операций в работе?
13. Каковы критерии оценки пригодности проверяемого прибора к дальнейшей эксплуатации?



за достаточно длительный промежуток времени. Осредненная местная скорость остается с течением времени постоянной по модулю и параллельной оси потока. В результате реальный беспорядочный поток заменяют фиктивно – слоистым установившимся движением частиц жидкости с осредненными местными скоростями.

При ламинарном режиме движения жидкости в трубопроводах местная скорость распределяется по диаметру сечения согласно закону квадратичной параболы (см. рисунок 2.2,а) от нуля на стенках, где силы вязкого трения наибольшие, до максимального значения  $v_{max}$  на оси [3]:

$$v = v_{max} \left( 1 - \frac{r^2}{r_{max}^2} \right), \quad (2.1)$$

где  $r$  – расстояние от оси трубы до рассматриваемой точки в сечении;  
 $r_{max}$  – радиус трубы.

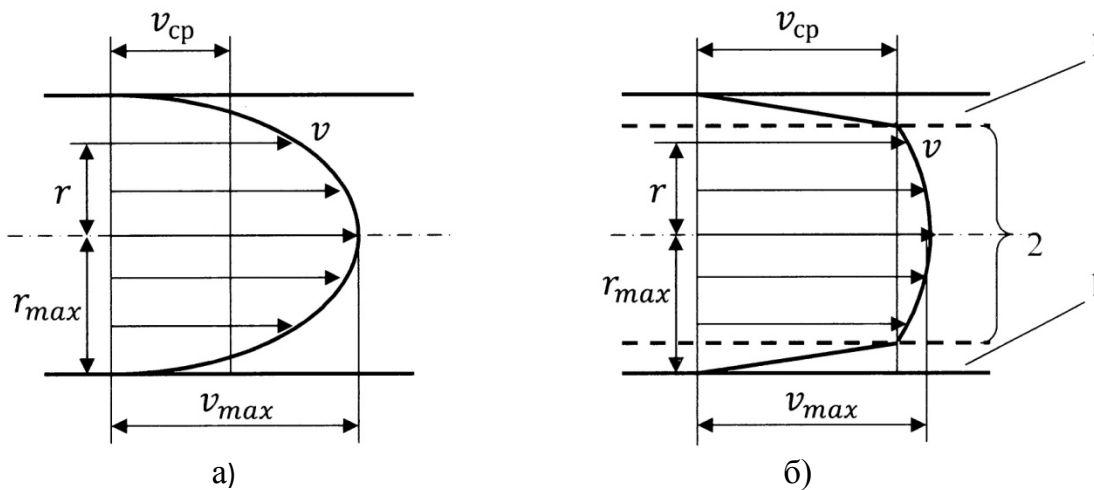


Рисунок 2.2 – Распределение местных скоростей по сечению трубы:

а) ламинарный режим б) турбулентный режим;

1 – вязкий подслой; 2 – турбулентное ядро

Обычно движение потока характеризуется средней скоростью  $v_{cp}$ , под которой понимают условную, одинаковую для всех точек сечения, скорость, при которой расход равен действительному:

$$v_{cp} = \frac{Q}{S}, \text{ м/с.} \quad (2.2)$$

где  $Q$  – объемный расход потока,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$S$  – площадь живого сечения потока,  $\text{м}^2$ .

Под расходом потока понимают количество жидкости, протекающей через поперечное сечение трубы в единицу времени. При установившемся движении жидкости расход по длине потока остается постоянным. Т. е. для различных сечений:

$$Q_1 = Q_2 = \text{const.}$$

Или, учитывая уравнение (2.2),

$$\frac{v_{cp1}}{v_{cp2}} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Из этого уравнения, которое называется уравнением неразрывности или сплошности потока, видно, что при увеличении площади проходного сечения скорость потока уменьшается, и наоборот. При постоянном же проходном сечении скорость по длине потока не меняется.

При ламинарном режиме средняя в сечении скорость равна половине максимальной:

$$v_{cp} = v_{max}/2. \quad (2.3)$$

При турбулентном режиме движения жидкости в трубопроводе поток разделяется на две, резко отличные по структуре области (рисунок 2.2,б): в непосредственной близости от стенок трубы – вязкий подслой 1 (доли миллиметра) и турбулентное ядро 2. В пределах вязкого подслоя пульсации частиц в поперечном направлении практически отсутствуют, поэтому течение сохраняет почти ламинарный характер. Осредненные местные скорости по толщине вязкого подслоя изменяются по линейному закону. В области развитого турбулентного течения (турбулентном ядре), благодаря интенсивному перемешиванию частиц, скорости по сечению трубы выравниваются. Поэтому их изменение, в отличие от ламинарного режима, происходит более равномерно по логарифмическому закону.

Приблизленно осредненную местную скорость в любой точке поперечного сечения трубы при турбулентном режиме можно рассчитать по формуле [3]:

$$v = v_{max} \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^{1/7}. \quad (2.4)$$

Отношение максимальной скорости к средней в сечении:

$$v_{max}/v_{cp} = 1,15 \div 1,3. \quad (2.5)$$

При ламинарном режиме движения между слоями жидкости, а также между жидкостью и стенками трубы возникают касательные напряжения, обусловленные действием сил вязкого трения. Они называются вязкостными напряжениями  $\tau_{\theta}$ .

Вязкостные напряжения прямо пропорциональны коэффициенту динамической вязкости  $\mu$ , который характеризует способность жидкости оказывать сопротивление относительному перемещению (сдвигу) ее слоев (измеряется в Па·с).

При выполнении технических расчетов обычно пользуются коэффициентом кинематической вязкости  $\nu$  (м<sup>2</sup>/с), представляющим собой отношение коэффициента динамической вязкости жидкости к ее плотности:

$$\nu = \mu/\rho.$$

Касательные напряжения при ламинарном режиме распределяются по радиусу сечения трубы по линейному закону (см. рисунок 2.3,а) от максимального значения  $\tau_{max}$  на стенках до нуля на оси:

$$\tau = \tau_B = \tau_{max} \frac{r}{r_{max}}.$$

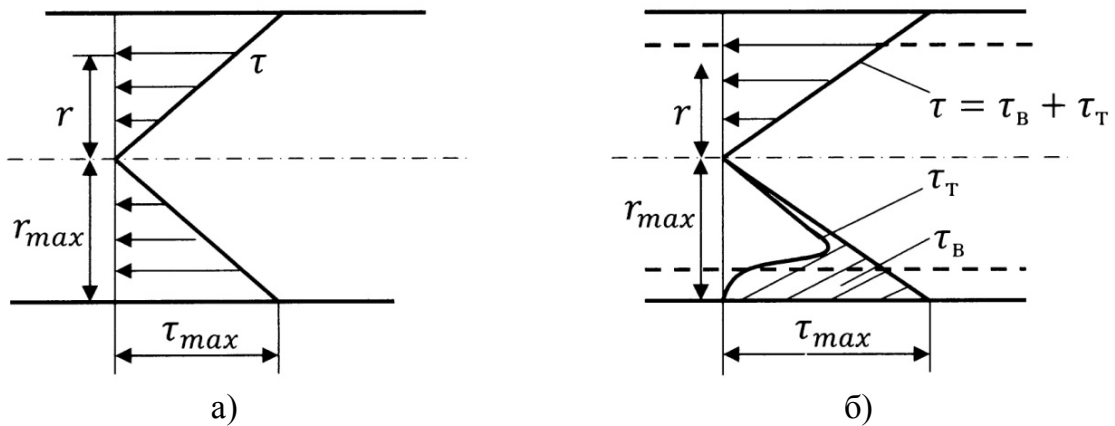


Рисунок 2.3 – Распределение касательных напряжений по сечению трубы:  
а) ламинарный режим; б) турбулентный режим

При турбулентном режиме к вязкостным напряжениям  $\tau_B$  добавляются турбулентные напряжения  $\tau_m$ , возникающие в результате переноса количества движения перемешивающимися в поперечном направлении частицами жидкости. Первые доминируют в пределах вязкого подслоя, вторые – в турбулентном ядре. Однако закон распределения суммарных касательных напряжений  $\tau$  такой же, как и при ламинарном режиме (см. рисунок 2.3,б). Отличие заключается в том, что при движении жидкости в трубе одного диаметра величина этих напряжений на стенках  $\tau_{max}$  при турбулентном режиме имеет большее значение.

Ламинарный режим наблюдается в тонких капиллярных трубках, при грунтовой фильтрации, при движении крови в кровеносных сосудах, а также при транспортировке по трубопроводам очень вязких жидкостей (нефти, мазута, смазочного масла). При движении среды в системах отопления, водоснабжения, вентиляции обычно имеет место турбулентный режим.

Режим движения определяется численным значением безразмерного комплекса, который называется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{cp} l}{\nu}, \quad (2.6)$$

где  $l$  – характерный линейный размер, за который принимают тот размер, который в наибольшей мере влияет на процесс и удобен в расчетной практике.

В качестве характерного линейного размера  $l$  для труб круглого сечения принимают диаметр  $d$ . В результате формула (2.6) принимает вид:

$$Re = \frac{v_{cp} d}{\nu}. \quad (2.7)$$

Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход из ламинарного режима движения в турбулентный, называется верхним критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр.в.}$ , из турбулентного режима в ламинарный – нижним критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр.н.}$  (см. рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Переход из ламинарного режима в турбулентный и обратно

По данным Рейнольдса для труб круглого сечения  $Re_{кр.н.} = 2000$ .

Верхнее критическое число Рейнольдса не имеет строго установленного значения. Так например, в лабораторных условиях ламинарный режим иногда удается сохранить до  $Re_{кр.в.} = 10^4 - 2 \cdot 10^4$  и даже более. Для технических устройств это число принимают равным 4000. Снижение предела верхнего критического значения числа Рейнольдса обусловлено наличием в технических устройствах различных возмущающих течение жидкости фактов (вибрации, резких поворотов потока, острых входных кромок, неровностей внутренней поверхности стенок и пр.). Область чисел  $Re_{кр.н.} < Re < Re_{кр.в.}$  часто называют переходным режимом, при котором в зависимости от условий возможно как ламинарное, так и турбулентное движение. Однако ввиду неустойчивости ламинарного режима в этой области для практических расчетов обычно принимают, что при  $Re < 2000$  – существует устойчивый ламинарный режим, при  $Re > 2000$  – турбулентный с различной степенью турбулизации. Поэтому часто нижнее критическое число Рейнольдса называют просто критическим числом Рейнольдса и обозначают  $Re_{кр.}$ .

Число Рейнольдса – это один из критериев гидродинамического подобия потоков жидкости, характеризующее соотношение сил инерции и сил вязкого трения.

### 2.3. Описание лабораторной установки

Схема установки для визуального наблюдения режимов движения жидкости представлена на рисунке 2.5 [8]. Она состоит из напорного бака 6, наполненного водой, и присоединенной к нему стеклянной трубы 10 с вентилем 9 для регулирования скорости движения потока. Внутри трубы

введена тонкая металлическая трубка 7, по которой в поток воды подводится подкрашенная жидкость той же плотности из небольшого бачка 4 с пробковым краном 5. Подводящий трубопровод 1 с вентилем 2 и отводящая трубка 11 служат для поддержания постоянного уровня в напорном баке. Тем самым обеспечивается постоянный расход потока по трубе (установившееся движение). Переборка 3 является успокоителем. Вода из бака по стеклянной трубе попадает в мерную емкость 8.

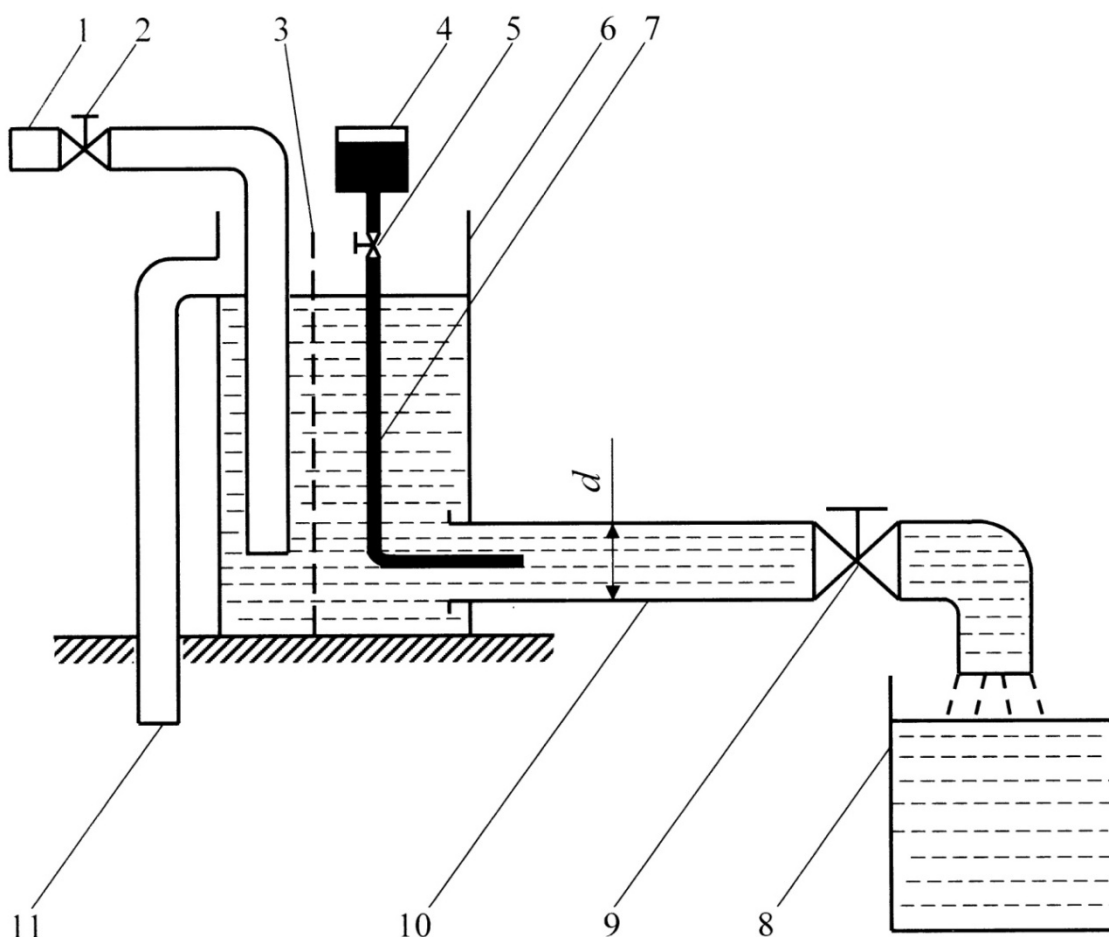


Рисунок 2.5 – Схема лабораторной установки:

1 – подводящий трубопровод; 2,9 вентили; 3 – переборка; 4 – бачок с подкрашенной жидкостью; 5 – пробковый кран; 6 – напорный бак; 7 – металлическая трубка; 8 – мерная емкость; 10 – стеклянная труба; 11 – отводящая труба;  $d = 36$  мм

## 2.4. Порядок выполнения опытов

1. Заполнить напорный бак 6 водой.
2. Открыть регулировочный вентиль 9.
3. Открыть пробковый кран 5 у бачка 4 с подкрашенной жидкостью.
4. Постепенно изменять степень открытия вентилей 9.
5. Выяснить характер движения потока.

При небольшом открытии вентилей (сначала 9, а затем 5) вода движется по стеклянной трубе 10 со сравнительно малой скоростью. При этом попавшая в поток подкрашенная жидкость движется на протяжении всего потока в виде тонкой прямолинейной струйки и не смешивается с водой (рисунок 2.6,а). Это свидетельствовало о том, что и частицы воды движутся также струйчато (слоисто). В противном случае, то есть при поперечном перемещении частиц в потоке, струйка подкрашенной жидкости была бы разрушена. Режим движения в трубе – ламинарный.

При дальнейшем постепенном открытии вентиля 9, то есть при увеличении скорости потока, струйка приобретает вначале волнистые очертания (рисунок 2.6,б), а затем полностью размывается, окрашивая воду (рисунок 2.6,в). Это свидетельствует о существовании в потоке не только движения вдоль оси, но также и поперечного перемещения частиц, то есть их беспорядочного движения. Режим движения в трубе становится турбулентным.

6. Для каждого режима движения определить с помощью секундомера время заполнения мерной емкости 8.

7. Посредством термометра измерить температуру вытекающей воды.

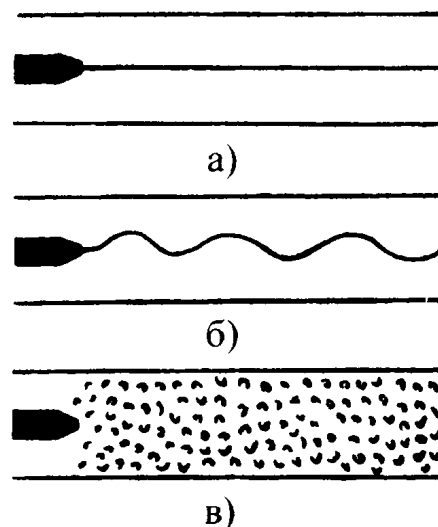


Рисунок 2.6 – Характер движения жидкости в трубе:  
а) ламинарный; б) переходный;  
в) турбулентный

## 2.5. Обработка опытных данных

1. Определить объемный расход жидкости  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau},$$

где  $V$  – заполняемый объем мерной емкости, м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  – время заполнения мерной емкости, с.

2. Определить среднюю в сечении трубы скорость  $v_{\text{ср}}$ , м/с, по формуле (2.2).

3. Определить коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, в зависимости от температуры жидкости (см. приложение Б).

4. Определить число Рейнольдса по формуле (2.7).

5. По величине числа Рейнольдса установить режим движения жидкости в трубе.

6. Результаты наблюдений и обработки опытных данных свести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1– Опытные данные и их обработка

| № за-мера | Наблю-даемый режим | Объем мерной емкости $V$ , м <sup>3</sup> | Время заполнения $\tau$ , с | Темпе-ратура воды, °С | Коэффициент кинематической вязкости $\nu$ , м <sup>2</sup> /с | $Q$ , м <sup>3</sup> /с | $v_{cp}$ , м/с | Re |
|-----------|--------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|----|
| 1         |                    |                                           |                             |                       |                                                               |                         |                |    |
| 2         |                    |                                           |                             |                       |                                                               |                         |                |    |
| 3         |                    |                                           |                             |                       |                                                               |                         |                |    |
| 4         |                    |                                           |                             |                       |                                                               |                         |                |    |

7. Построить эпюры распределения местных скоростей по радиусу трубы при ламинарном и турбулентном режимах движения. Для этого необходимо:

- выбрать из таблицы 2.1 два замера: один для ламинарного режима, другой – для турбулентного режима;
- используя формулы (2.3) и (2.5), определить максимальные скорости в сечении трубы  $v_{max1}$  и  $v_{max2}$  для обоих режимов;
- задать ряд расчетных радиусов  $r$  (не менее пяти значений) в диапазоне  $0 < r < r_{max}$ ;
- по формулам (2.1) и (2.4) для каждого расчетного радиуса  $r$  определить местные скорости в сечении трубы  $v$  для обоих режимов;
- результаты расчета свести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2– Данные для построения эпюры распределения местных скоростей по радиусу трубы

| Номер точки | Расчетные радиусы $r$ , м | Ламинарный режим |                  |           | Турбулентный режим |                  |           |
|-------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------|--------------------|------------------|-----------|
|             |                           | $v_{cp1}$ , м/с  | $v_{max1}$ , м/с | $v$ , м/с | $v_{cp2}$ , м/с    | $v_{max2}$ , м/с | $v$ , м/с |
| 1           | 0                         |                  |                  |           |                    |                  |           |
| 2           |                           |                  |                  |           |                    |                  |           |
| 3           |                           |                  |                  |           |                    |                  |           |
| 4           |                           |                  |                  |           |                    |                  |           |
| 5           |                           |                  |                  |           |                    |                  |           |
| 6           | $r_{max}$                 |                  |                  |           |                    |                  |           |

- на графике в масштабе отложить по оси ординат расчетные радиусы  $r$ , по оси абсцисс – соответствующие им местные скорости  $v$ ;
- полученные точки соединить плавными кривыми;
- на графике отложить значения средних скоростей для ламинарного и турбулентного режимов  $v_{cp1}$  и  $v_{cp2}$ .

Пример построения эпюр распределения местных скоростей представлен на рисунке 2.7.

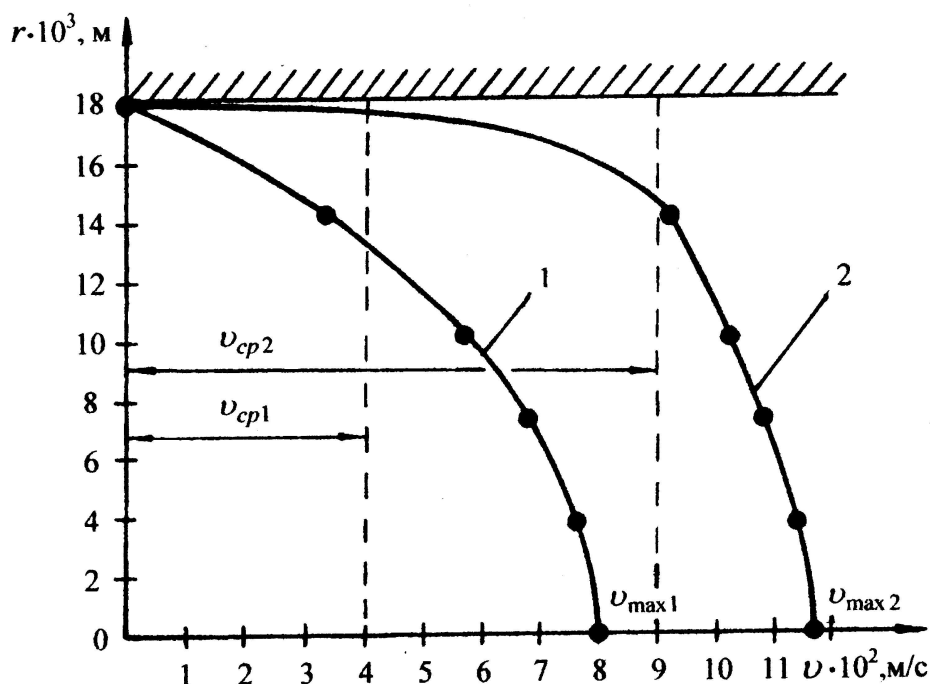


Рисунок 2.7 – Эмпоры распределения местных скоростей по радиусу трубы при ламинарном и турбулентном режимах движения:  
1 – ламинарный режим; 2 – турбулентный режим

В конце работы необходимо сделать вывод о характере потока в трубе при различных числах Рейнольдса и дать сравнительную характеристику режимам движения жидкости.

## 2.6. Контрольные вопросы

1. Дать характеристику ламинарному и турбулентному режимам движения жидкости. Какова структура турбулентного потока в трубе?
2. По каким законам распределяются местные скорости и касательные напряжения по сечению трубы при различных режимах?
3. Что понимают под средней в сечении скоростью? Чему она равна при ламинарном и турбулентном режимах?
4. Что такое число Рейнольдса? Какие параметры в него входят? В чем отличие верхнего и нижнего критических чисел Рейнольдса?
5. Дать понятие вязкости жидкости. Привести связь между коэффициентами динамической и кинематической вязкости.
6. Дать понятие расхода потока. Связь между объемным и массовым расходом. Как по известному расходу потока определить среднюю скорость в сечении?
7. Что выражает уравнение неразрывности (сплошности) потока?
8. Как изменяется скорость по длине трубы: а) постоянного проходного сечения; б) переменного проходного сечения?
9. Каково устройство установки для визуального наблюдения режимов движения жидкости?

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

#### 3.1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение слагаемых уравнения Бернулли (пьезометрического и скоростного напора) в двух сечениях потока, прокачиваемого по горизонтальному трубопроводу переменного профиля, а также определение потерь напора между этими сечениями.

#### 3.2. Теоретический раздел

Одним из важнейших уравнений гидромеханики, с помощью которого решается большинство инженерных задач, является *уравнение Даниэля Бернулли*.

Это уравнение устанавливает связь между скоростью движения жидкости  $v$ , давлением  $p$  в данной точке и ее геометрическим положением  $z$  для различных сечений потока.

Для установившегося потока идеальной (абсолютно невязкой и несжимаемой) жидкости уравнение Бернулли имеет вид [4]:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const} \quad (3.1)$$

или для двух различных сечений потока:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}, \quad (3.2)$$

где  $\gamma = \rho g$  – удельный вес жидкости, Н/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В форме записей (3.1) и (3.2) каждое слагаемое уравнения Бернулли имеет линейную размерность (метр) и выражает определенную высоту – напор.

При умножении каждого слагаемого уравнения (3.1) на вес жидкости  $G = mg$ , Н, получим

$$mgz + pV + \frac{mv^2}{2} = mgH = \text{const}.$$

В данной форме записи каждое слагаемое измеряется в единицах энергии – Дж.

$mgz = E_{nz}$  – потенциальная энергия положения;

$pV = E_{np}$  – потенциальная энергия давления;

$mv^2/2 = E_k$  – кинетическая энергия;

$mgH = E$  – полная энергия.

Поэтому помимо геометрической интерпретации уравнение Бернулли имеет *энергетический смысл*, так как каждое его слагаемое представляет собой определенную удельную энергию, то есть энергию  $E$ , Дж, отнесенную к единице веса жидкости  $G$ , Н (Дж/Н = м):

$z = E_{nz}/G$  – *геометрическая высота положения (геометрический напор)* или расстояние по вертикали от произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения до центра тяжести рассматриваемого сечения или *удельная потенциальная энергия положения*;

$p/\gamma = h_p = E_{np}/G$  – *пьезометрическая высота (пьезометрический напор)* или *удельная потенциальная энергия давления*;

$v^2/2g = E_k/G$  – *скоростная высота (скоростной напор)* или *удельная кинетическая энергия*.

Пьезометрическая высота измеряется пьезометром (см. лабораторную работу № 1) – открытой трубкой 1 (рисунок 3.1), начальное сечение которой расположено по касательной к направлению скорости  $\vec{v}$ . В результате того, что абсолютное давление  $p$  в данной точке (в частности в центре тяжести сечения) потока больше атмосферного  $B$ , жидкость в пьезометре поднимается на высоту  $h_p$ :

$$h_p = \frac{p - B}{\gamma} = \frac{p_u}{\gamma},$$

где  $p_u$  – избыточное давление.

Для измерения скоростного напора используют трубку Пито 2 (рисунок 3.1), входное сечение которой нормально направлению скорости  $\vec{v}$ .

Уровень жидкости в этой трубке выше, чем в пьезометре, так как кинетическая энергия у конца трубки преобразуется в потенциальную энергию давления дополнительного столбика высотой  $v^2/2g$  (скорость  $\vec{v}$  частиц

жидкости, попадающих в отверстие трубки, уменьшается до нуля). Следовательно, высота столба жидкости в трубке Пито равна

$$h = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}.$$

Таким образом, *скоростной напор* – это высота столба жидкости, компенсирующего давление, которое возрастает за счет преобразования кинетической энергии в потенциальную при торможении жидкости от начальной скорости  $\vec{v}$  до нуля.

Сумма геометрического и пьезометрического напоров представляет собой *потенциальный (гидростатический) напор* или *полную удельную потенциальную энергию*:

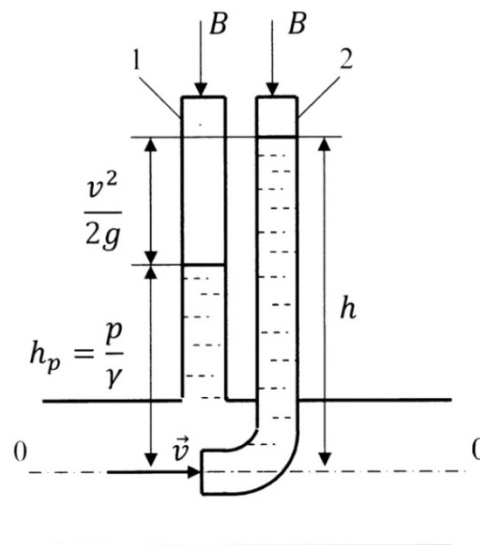


Рисунок 3.1 – Определение скоростного напора трубкой Пито

$$z + \frac{p}{\gamma} = H_n = E_n/G = \text{const.}$$

Для различных точек данного сечения потока величины  $z$  и  $p/\gamma$  имеют разное значение, однако потенциальный напор является величиной постоянной.

Сумма потенциального и скоростного напоров представляет собой *полный гидродинамический напор* или *полную удельную энергию*, то есть энергию, которой обладает единица веса жидкости, проходящей через данное сечение потока

$$H = H_n + \frac{v^2}{2g}.$$

Следовательно, уравнение Бернулли может быть записано в виде:

$$H_1 = H_2 = \text{const.}$$

Из этого уравнения следует, что при установившемся движении идеальной жидкости полный напор  $H$  или полная удельная энергия остается постоянной вдоль потока.

Таким образом, уравнение Бернулли представляет собой математическое выражение частного случая *закона сохранения энергии* применительно к потоку жидкости.

Уравнение Бернулли для любых двух сечений потока идеальной жидкости (1-1 и 2-2) можно представить графически (рисунок 3.2).

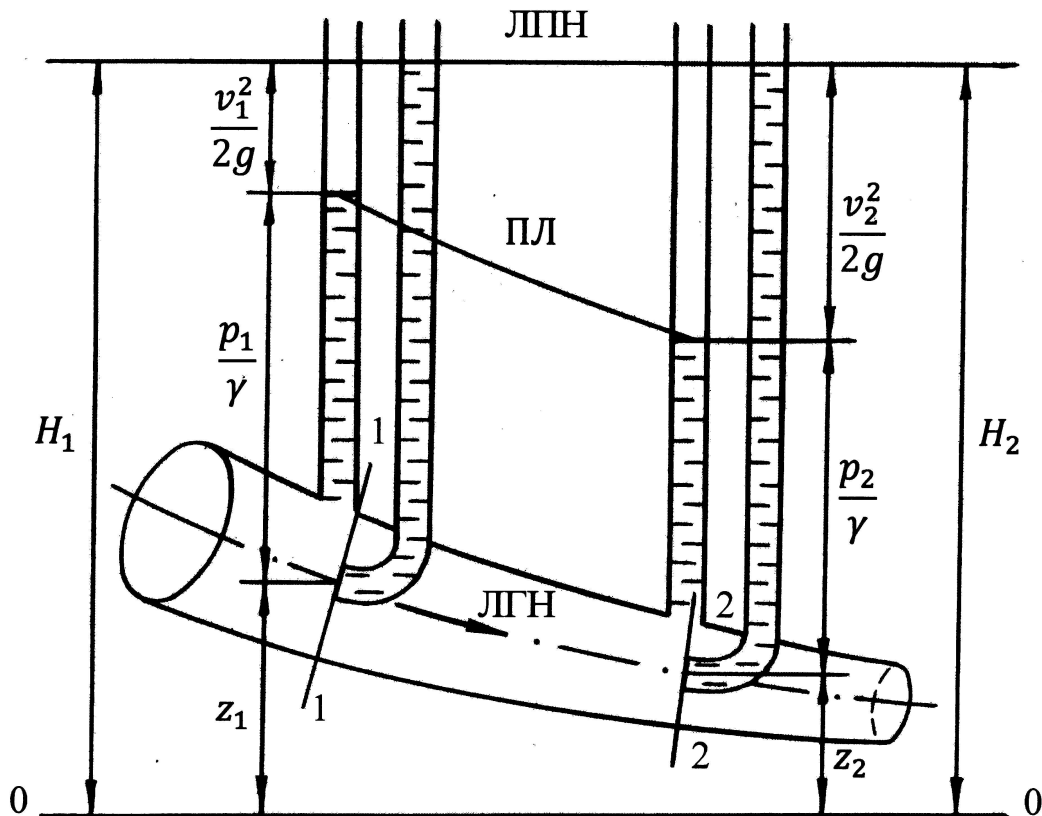


Рисунок 3.2 – Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для потока идеальной жидкости

На рисунке 3.2: 0-0 – плоскость сравнения (выбирается произвольно, но всегда должна быть горизонтальной); ЛГН – линия геометрического напора, соединяющая центры тяжести рассматриваемых сечений; ПЛ – пьезометрическая линия, соединяющая уровни жидкости в пьезометрах; ЛПН – линия полного гидродинамического напора, соединяющая уровни жидкости в трубках Пито, которая для идеальной жидкости представляет собой прямую, параллельную горизонтальной плоскости сравнения.

Для потока постоянного сечения пьезометрическая линия и линия полного напора параллельны, так как скорость, а значит и скоростной напор, в этом случае одинаковы по длине. такой поток называется *равномерным*.

Для горизонтального участка потока жидкости, когда  $z_1 = z_2$ , уравнение Бернулли принимает вид:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{const.}$$

Из этого уравнения следует, что *при уменьшении давления в сечении потока скоростной напор увеличивается, и наоборот*.

При движении реальной вязкой жидкости ее энергия не остается постоянной вдоль потока. Это связано с тем, что жидкость на своем пути встречает различные гидравлические сопротивления (трение об обтекаемую твердую поверхность, изменение конфигурации потока и пр.), на преодоление которых затрачивает часть ее энергии. Эта энергия преобразуется из механической в тепловую, которая затем рассеивается в пространстве (диссипация энергии), поэтому для потока жидкости является потерянной. В результате полная удельная энергия (полный напор) в предыдущем сечении 1-1 будет больше, чем в последующем сечении 2-2 на величину  $h_{w1-2}$ :

$$H_1 - H_2 = h_{w1-2}.$$

$h_{w1-2}$  представляет собой *удельную потерянную энергию*, то есть потерянную энергию  $E_w$ , Дж, отнесенную к единице веса жидкости  $G$ , Н, (энергетический смысл) или *потерю напора* (геометрический смысл).

Помимо этого, в отличие от идеальной жидкости скорости частиц реальной жидкости в различных точках сечения потока (местные скорости) неодинаковы. Поэтому в качестве расчетной принимают среднюю в сечении скорость потока  $v_{cp}$  (см. лабораторную работу № 2).

При определении кинетической энергии в сечении реального потока по средней скорости допускается неточность, которую учитывают, вводя поправочный коэффициент  $\alpha$  (*коэффициент Кориолиса*). Этот коэффициент представляет собой отношение действительной кинетической энергии к кинетической энергии, подсчитанной по средней скорости в сечении потока:

$$\frac{\int_S v^3 dS}{v_{cp}^3 S}.$$

Для равномерного ламинарного потока в трубопроводе  $\alpha = 2$ , для равномерного турбулентного потока  $\alpha = 1,05 \div 1,1$ . На участках неравномерного движения, когда скорость потока изменяется по величине или направлению, вследствие искажения поля скоростей коэффициент  $\alpha$  может иметь различные значения, достигающие 5 и даже более.

Таким образом уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_{cp1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_{cp2}^2}{2g} + h_{w1-2}. \quad (3.3)$$

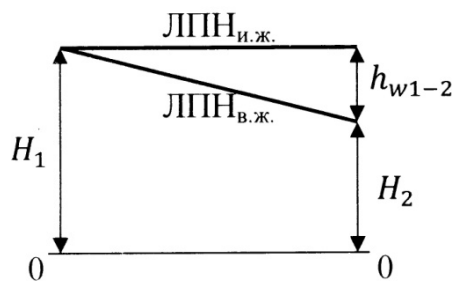


Рисунок 3.3 – Расположение линий полного напора для идеальной и вязкой жидкости

Реальный полный напор убывает вдоль потока, а между линиями полного напора для идеальной (ЛПН<sub>и.ж.</sub>) и вязкой жидкости (ЛПН<sub>в.ж.</sub>) появляется отрезок потерь напора  $h_{w1-2}$  (рисунок 3.3)

Таким образом, уравнение Бернулли для потока реальной жидкости является уравнением баланса энергии с учетом потерь.

### 3.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.4 [8].

Для проверки уравнения Бернулли используется горизонтальный трубопровод 1, состоящий из прямолинейных участков разного диаметра  $d_1$  и  $d_2$ , постепенно сужающегося (конфузора) и постепенно расширяющегося (диффузора) участков. В сечениях 1-1 и 2-2 установлены пьезометры 3. Установка оборудована вентилями 2 и 4 (для регулирования расхода протекающей по трубопроводу воды) и мерной емкостью 7 с открывающимся при помощи рычага 5 дном 6.

Уравнение Бернулли (3.3), записанное для участка трубопровода между сечениями 1-1 и 2-2, примет вид:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_{cp1}^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_{cp2}^2}{2g} + h_{w1-2}$$

или

$$h_{p1} + \frac{\alpha_1 v_{cp1}^2}{2g} = h_{p1} + \frac{\alpha_2 v_{cp2}^2}{2g} + h_{w1-2}.$$

Таким образом, задачей настоящей лабораторной работы является экспериментальное определение пьезометрического и скоростного напоров в рассматриваемых сечениях.

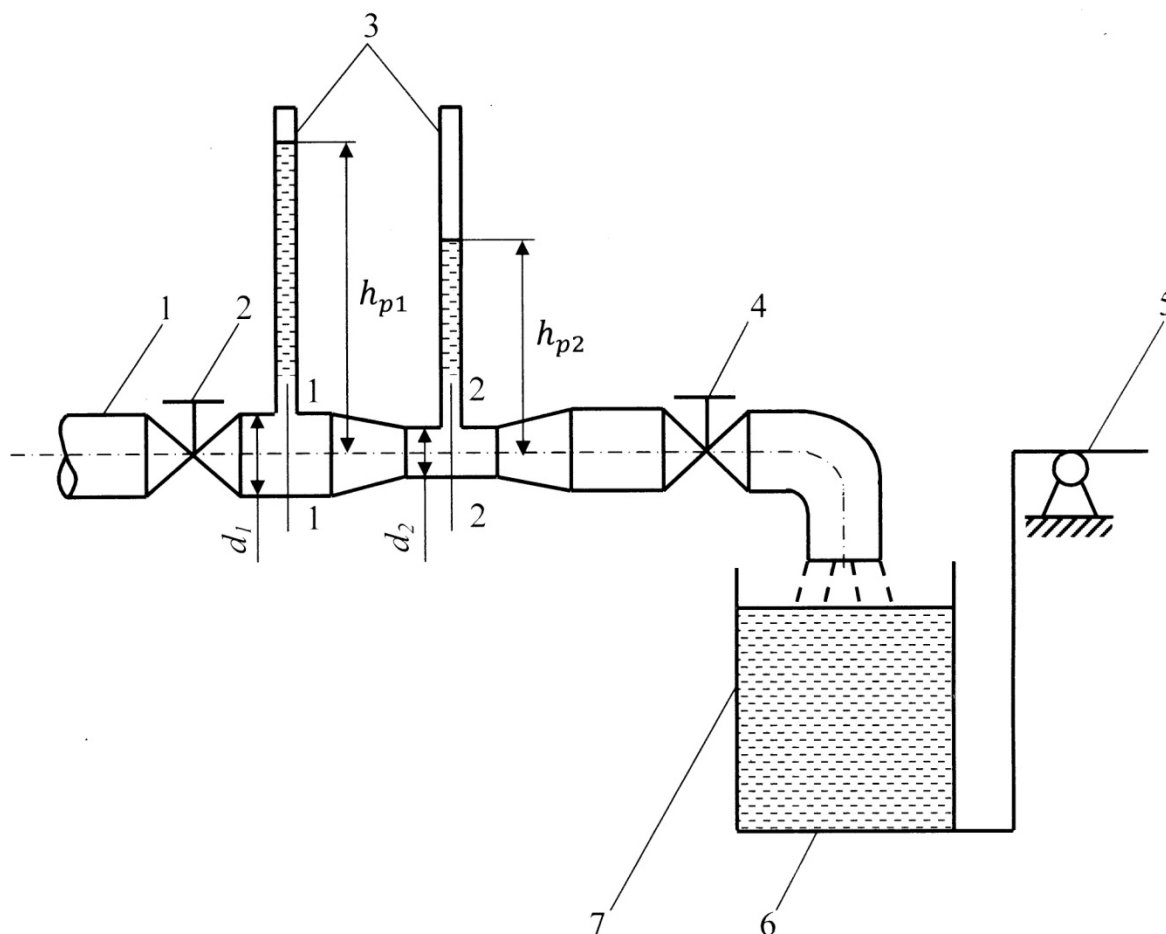


Рисунок 3.4 – Схема лабораторной установки:

1 – трубопровод; 2,4 – вентили; 3 – пьезометры; 5 – рычаг; 6 – дно мерной емкости;  
7 – мерная емкость;  $d_1 = 2,75$  см;  $d_2 = 1$  см

### 3.4. Порядок выполнения опытов

1. При помощи рычага 5 открыть дно 6 мерной емкости 7.
2. С помощью вентилей 2 и 4 добиться установившегося движения воды в трубопроводе.
3. Снять показания  $h_{p1}$  и  $h_{p2}$  пьезометров.
4. Закрыть дно 6 мерной емкости 7.
5. Измерить по секундомеру время  $\tau$  наполнения мерной емкости 7.
6. Опыты повторить несколько раз при различных расходах воды.
7. Определить коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , в зависимости от температуры жидкости (см. приложение Б).
8. Результаты замеров занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Опытные данные и их обработка

| № за-<br>ме-<br>ра | $h_{p1},$<br>м | $h_{p2},$<br>м | $\tau,$<br>с | $Q,$<br>м <sup>3</sup> /с | $v_{cp1},$<br>м/с | $v_{cp2},$<br>м/с | $\frac{\alpha_1 v_{cp1}^2}{2g},$<br>м | $\frac{\alpha_2 v_{cp2}^2}{2g},$<br>м | $H_1,$<br>м | $H_2,$<br>м | $h_{w1-2},$<br>м |
|--------------------|----------------|----------------|--------------|---------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|------------------|
| 1                  |                |                |              |                           |                   |                   |                                       |                                       |             |             |                  |
| 2                  |                |                |              |                           |                   |                   |                                       |                                       |             |             |                  |
| 3                  |                |                |              |                           |                   |                   |                                       |                                       |             |             |                  |

### 3.5. Обработка опытных данных

1. Определить объемный расход жидкости  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau},$$

где  $V$  – заполняемый объем мерной емкости, м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время заполнения мерной емкости, с.

2. Определить средние скорости движения жидкости в сечениях 1-1 и 2-2 трубопровода по формулам:

$$v_{cp1} = \frac{Q}{S_1} \quad \text{и} \quad v_{cp2} = \frac{Q}{S_2},$$

где  $S_1 = \pi d_1^2/4$  и  $S_2 = \pi d_2^2/4$  – площади сечений 1-1 и 2-2, м<sup>2</sup>.

3. Определить числа Рейнольдса в сечениях 1-1 и 2-2 по формулам:

$$Re_1 = \frac{v_{cp1} d_1}{\nu} \quad \text{и} \quad Re_2 = \frac{v_{cp2} d_2}{\nu}.$$

4. По величине чисел Рейнольдса установить режим движения жидкости в сечениях 1-1 и 2-2.

5. В зависимости от режима движения жидкости выбрать численные значения коэффициентов Кориолиса  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

6. Определить скоростные напоры  $\alpha_1 v_{cp1}^2/2g$  и  $\alpha_2 v_{cp2}^2/2g$ , м, в сечениях 1-1 и 2-2.

7. Определить полные напоры  $H_1$  и  $H_2$ , м, в сечениях 1-1 и 2-2 по формулам:

$$H_1 = h_{p1} + \frac{\alpha_1 v_{cp1}^2}{2g} \quad \text{и} \quad H_2 = h_{p2} + \frac{\alpha_2 v_{cp2}^2}{2g}.$$

8. Определить потери напора  $h_{w1-2}$ , м, между сечениями 1-1 и 2-2 по формуле:

$$h_{w1-2} = H_1 - H_2.$$

9. Результаты обработки опытных данных свести в таблицу 3.1.

### 3.6. Контрольные вопросы

1. Какой закон выражает уравнение Бернулли? Между какими параметрами оно устанавливает связь?
2. Какова геометрическая интерпретация слагаемых уравнения Бернулли?
3. Что понимают под геометрическим и скоростным напорами? Какими приборами они измеряются?
4. Что понимают под гидростатическим и гидродинамическим напорами?
5. Дать понятие линии геометрического, пьезометрического и гидростатического напоров.
6. Что называют линией полного напора? Как она проходит для потока идеальной и реальной жидкости?
7. Когда линии гидростатического и полного напора параллельны между собой?
8. Что понимают под удельной энергией жидкости?
9. Какова энергетическая интерпретация слагаемых уравнения Бернулли?
10. Чем отличается уравнение Бернулли для потоков идеальной и реальной жидкости?
11. Дайте понятие коэффициента Кориолиса? Каковы его численные значения для ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости?
12. Чем обуславливаются потери напора, возникающие при движении реальной жидкости?
13. К каким выражениям приводится уравнение Бернулли в случаях:
  - а) покоящейся жидкости;
  - б) горизонтального потока;
  - в) равномерного движения.
14. Каково устройство установки для проверки уравнения Бернулли?
15. Каким образом определяется средняя в сечениях скорость в данной работе?

## 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ $\lambda$ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

### 4.1. Цель работы

Целью работы является опытное определение коэффициента гидравлического трения при установившемся движении жидкости в трубопроводе постоянного сечения и сравнение его с расчетным значением.

### 4.2. Теоретический раздел

Движение реальной вязкой жидкости сопровождается потерей части ее механической энергии (см. лабораторную работу № 3).

Удельная потерянная энергия, то есть потерянная энергия  $E_w$ , Дж, отнесенная к единице веса жидкости  $G$ , Н, называется *потерей напора*  $h_{w1-2}$  и измеряется в метрах.

Различают два вида потерь напора  $h_w$ : потеря по длине потока  $h_d$  и местные потери  $h_m$ .

В данной лабораторной работе рассматривается первый вид потерь напора.

*Потеря напора по длине потока*  $h_d$  обуславливается действием сил трения между жидкостью и обтекаемой ею твердой поверхностью (внешнее трение), а также между отдельными слоями жидкости (внутреннее трение), и проявляется на всей длине рассматриваемого участка потока. В общем случае эта потеря зависит от длины потока, размеров и формы его сечения, скорости течения (а значит, от режима движения или числа Рейнольдса), шероховатости поверхности и вязкости жидкости.

Потеря напора по длине трубопровода круглого сечения определяется по универсальной (справедливой как для ламинарного, так и для турбулентного режима движения) формуле Дарси – Вейсбаха [6]:

$$h_d = \lambda \frac{l}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g}, \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (безразмерный);

$l$  – длина рассматриваемого участка трубопровода, м;

$d$  – внутренний диаметр трубопровода, м;

$v_{cp}$  – средняя скорость в сечении потока, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В общем случае коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода:

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{d}\right).$$

Внутренняя поверхность трубопровода всегда в той или иной мере шероховата, т. е. покрыта неровностями в виде мелких выступов (бугорков), которые могут распределяться по поверхности как равномерно, так и неравномерно, иметь различную форму и высоту в зависимости от причин их образования (технологии изготовления трубопровода, коррозии, отложений и т.д.) Средняя высота выступов  $\Delta$  называется *абсолютной шероховатостью*. Отношение абсолютной шероховатости к диаметру трубы  $\Delta/d$  называется *относительной шероховатостью*.

Влияние вышеперечисленных факторов на коэффициент гидравлического трения зависит от режима движения жидкости в трубопроводе и может быть объяснено, исходя из понятия пограничного слоя [6].

*Гидродинамическим пограничным слоем* называется слой жидкости малой толщины, который образуется в непосредственной близости от твердой поверхности из-за действия сил вязкого трения и характеризуется изменением скорости по его толщине практически от нуля на стенке до скорости внешнего потока. Во внешнем потоке силы инерции значительно превышают силы вязкого трения, поэтому его можно считать идеальным (не обладающим вязкостью).

Течение жидкости в пограничном слое может быть как ламинарным, так и турбулентным. Однако, даже в случае турбулентного пограничного слоя в непосредственной близости от стенки сохраняется область практически слоистого (ламинарного) движения. Эта область называется *вязким подслоем*. Толщина вязкого подслоя незначительна (доли миллиметра) и уменьшается при увеличении числа Re.

На передних кромках трубопровода, где толщина пограничного слоя равна нулю, частицы жидкости имеют примерно одинаковые скорости по сечению. По мере удаления от входа у стенок частицы жидкости начинают тормозиться под влиянием вязкого трения, поэтому скорость по толщине пограничного слоя распределяется неравномерно (см. рисунок 4.1). Центральная часть потока (ядро), где сохраняется равномерное распределение скоростей в отдельно взятых сечениях, движется ускоренно. Это обуславливается необходимостью прохода через неизменную площадь постоянного расхода жидкости. Когда пограничные слои сомкнутся, установится характерный для ламинарного или турбулентного течения профиль скоростей, который остается постоянным по длине прямолинейного участка трубопровода. Такое течение называется *стабилизированным*.

При турбулентном стабилизированном движении поток разделяется на две, резко отличные по структуре области (рисунок 4.1,б): в непосредственной близости от стенок трубы – вязкий подслой 1 (доли миллиметра) и турбулентное ядро 2.

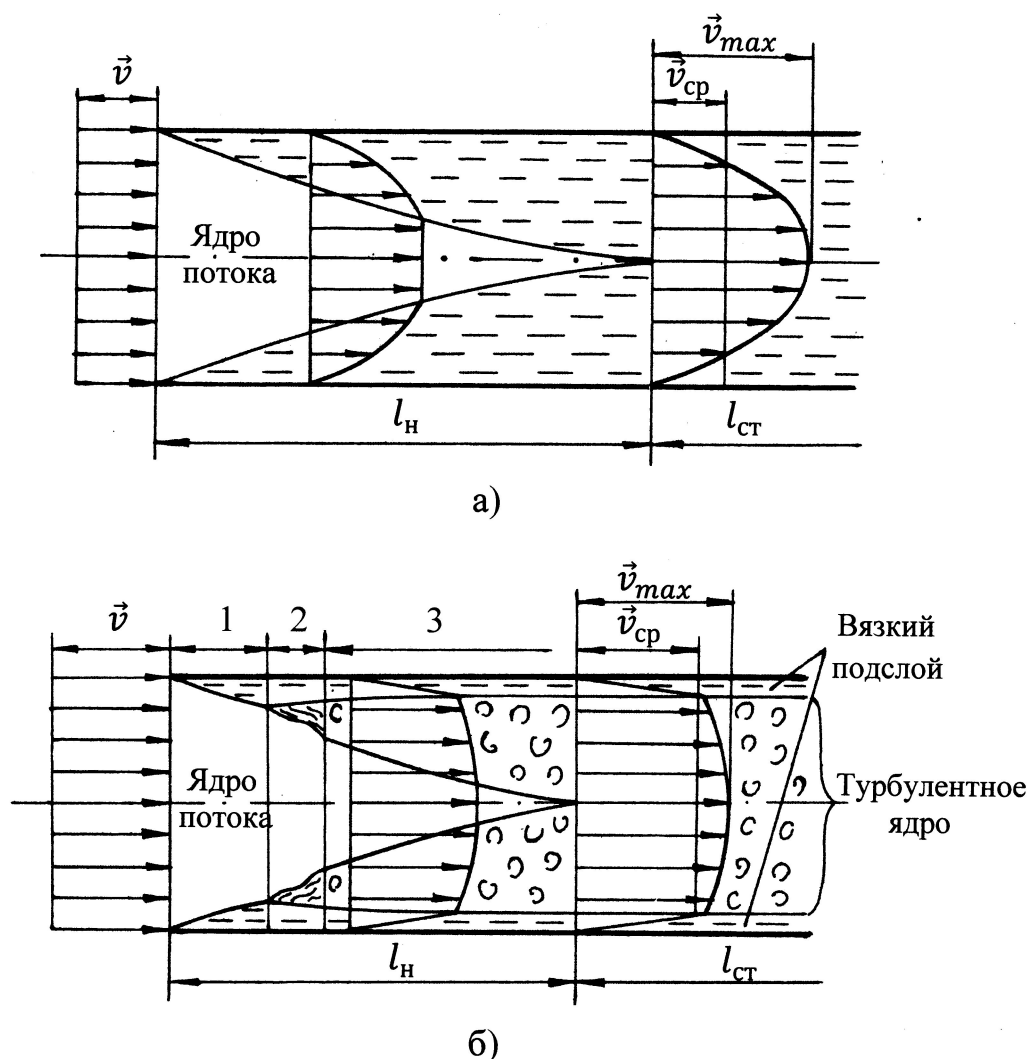


Рисунок 4.1 – Образование пограничного слоя и распределение скоростей на начальном участке ( $l_H$ ) и в области стабилизированного течения ( $l_{ст}$ ) при ламинарном (а) и турбулентном (б) режиме движения жидкости внутри трубы:  
 1 – ламинарный пограничный слой; 2 – переходный пограничный слой;  
 3 – турбулентный пограничный слой

Ниже рассматривается лишь стабилизированное течение жидкости.

При ламинарном режиме поток движется слоями без перемешивания частиц жидкости. Выступы шероховатости обтекаются без образования и отрыва микровихрей вследствие значительного влияния вязкости жидкости. Поэтому при ламинарном режиме шероховатость внутренней поверхности трубопровода не влияет на коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ , а следовательно, и на потери напора по длине  $h_0$ . При этом  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса:

$$\lambda = f(\text{Re}).$$

При турбулентном режиме в зависимости от соотношения толщины вязкого подслоя  $\delta_{в.п.}$  и абсолютной шероховатости  $\Delta$  различают гидравлически гладкие, переходные и шероховатые поверхности (рисунок 4.2).

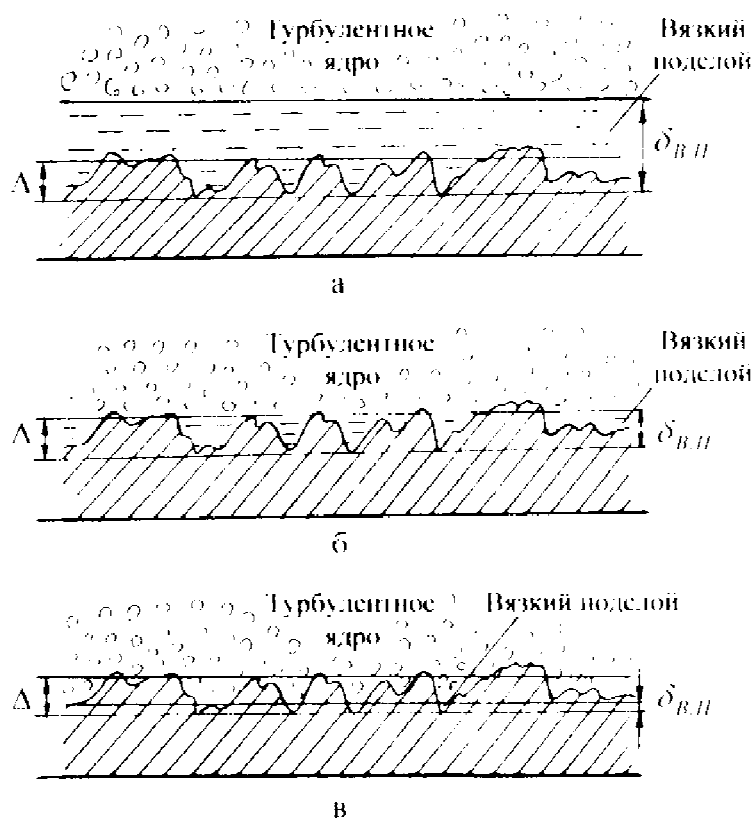


Рисунок 4.2 – Гидравлически гладкие (а), переходные (б) и шероховатые поверхности (в)

Если выступы шероховатости полностью покрыты вязким подслоем, то есть  $\Delta < \delta_{в.п.}$  (рисунок 4.12,а), то они обтекаются так же, как и при ламинарном режиме движения. В этом случае коэффициент  $\lambda$  не зависит от шероховатости, и поверхность трубопровода считается *гидравлически гладкой*.

$$\lambda = f(Re).$$

Если высота выступов шероховатости того же порядка, что и толщина вязкого подслоя ( $\Delta \approx \delta_{в.п.}$ ) (рисунок 4.12,б), то на коэффициент  $\lambda$  начинает сказываться влияние шероховатости. Такая поверхность считается *переходной*.

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right).$$

Если  $\Delta > \delta_{в.п.}$  (рис. 3.9, рисунок 4.12,в), то выступы шероховатости находятся в области турбулентного ядра. В результате происходит непрерывное образование микровихрей непосредственно на самой поверхности в связи со срывом потока с неровностей стенки. В этом случае шероховатость становится дополнительным сопротивлением на пути движения потока. Коэффициент  $\lambda$  является функцией только относительной шероховатости и не зависит от числа Рейнольдса:

$$\lambda = f\left(\frac{\Delta}{d}\right).$$

Такая поверхность считается *гидравлически шероховатой*.

В связи с тем, что толщина вязкого подслоя уменьшается при увеличении числа Рейнольдса, одна и та же поверхность при разных числах  $Re$  может быть гидравлически гладкой, переходной или шероховатой.

Первые систематические исследования по выявлению зависимости коэффициента  $\lambda$  от числа  $Re$  и  $\Delta/d$  были проведены в 1933 году И. Никурадзе в гладких латунных трубах и в трубах с искусственной равномерно-зернистой шероховатостью. Шероховатость была получена путем нанесения на внутренние поверхности труб разного диаметра просеянных через сито песчинок, одинаковых по размерам (зернистости) и форме. При этом были получены различные значения относительной шероховатости (от  $\Delta/d = 0,001$  до  $\Delta/d = 0,033$ ). В изготовленных таким образом трубах при разных расходах, а значит и числах  $Re$  (диапазон чисел  $Re = 5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^6$ ), определялась потеря напора по длине прямолинейного участка.

Коэффициент  $\lambda$  вычислялся по формуле Дарси-Вейсбаха (4.1). По опытным данным был построен график зависимости  $\lambda = f(Re, \Delta/d)$  в логарифмических координатах (рисунок 4.3,а).

График разбит на три зоны:

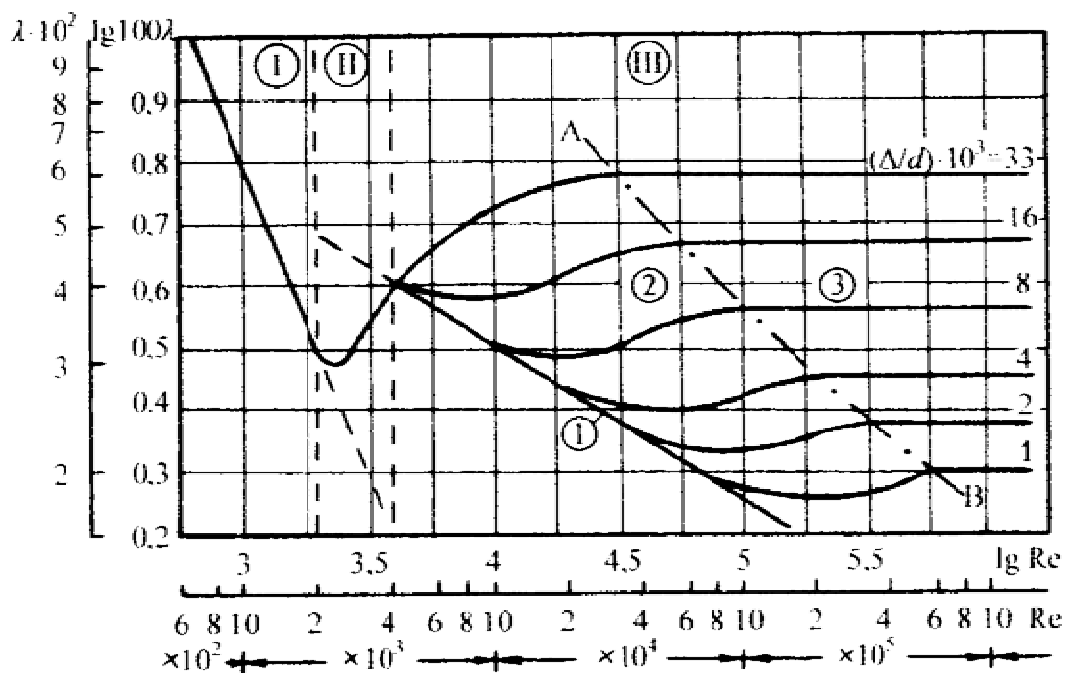
I – зона ламинарного режима ( $Re \leq 2000$ ). Все опытные точки, независимо от шероховатости стенок труб, лежат на одной прямой. Это значит, что при ламинарном режиме коэффициент  $\lambda$  зависит только от числа  $Re$ , убывая при его увеличении.

II – зона переходного режима ( $2000 < Re < 4000$ ), в которой осуществляется переход от ламинарного режима к турбулентному. В потоке наблюдается неустойчивость, порождаемая периодическим возникновением очагов турбулентности и их исчезновением. Коэффициент  $\lambda$  возрастает с увеличением числа  $Re$ , оставаясь постоянным для различных значений относительной шероховатости. На переходную зону распространяются зависимости для  $\lambda$ , экстраполируемые из зоны турбулентного режима движения (см. верхнюю пунктирную линию в области II).

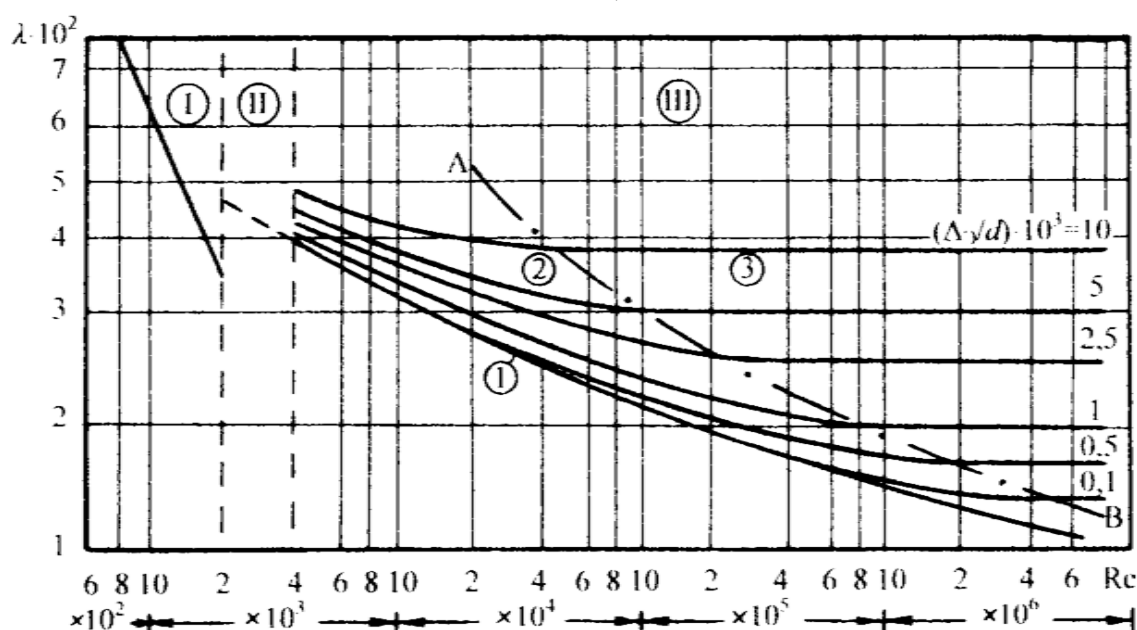
III – зона турбулентного режима ( $Re \geq 4000$ ), в которой различают три области:

1 – область гидравлически гладких поверхностей. Все опытные точки до некоторых чисел  $Re$  совпадают с прямой линией 1, полученной при испытании гладких латунных труб без искусственной шероховатости, а затем отклоняются от нее. Причем чем меньше относительная шероховатость, тем при больших числах  $Re$  начинается это отклонение. Таким образом, в области гидравлически гладких поверхностей (на линии 1) при турбулентном режиме шероховатость также не оказывает влияние на  $\lambda$ .

2 – переходная область, ограниченная линиями 1 и АВ. Опытные точки располагаются на кривых, отвечающих различным значениям относительной шероховатости. Это значит, что коэффициент  $\lambda$  зависит как от числа  $Re$ , так и от  $\Delta/d$ . В этой области  $\lambda$  в общем возрастает при увеличении  $Re$ , но для малых относительных шероховатостей на начальном участке имеет место провал кривых.



а)



б)

Рисунок 4.3 – График зависимости коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости  $\Delta/d$ :

а)  $\lambda = f(Re, \Delta/d)$  – для труб с искусственной равномерно-зернистой шероховатостью (по данным исследований И.Никурадзе);

б)  $\lambda = f(Re, \Delta_e/d)$  – для труб с естественной шероховатостью (по данным исследований Г.А. Мурина);

I – зона ламинарного режима; II – зона переходного режима; III – зона турбулентного режима; 1 – область гидравлически гладких поверхностей;

2 – переходная область; 3 – область гидравлически шероховатых поверхностей

3 – область гидравлически шероховатых поверхностей, находится правее линии АВ. Опытные точки располагаются на прямых линиях, параллельных оси абсцисс и соответствующих определенным значениям относительной шероховатости. Это свидетельствует о том, что коэффициент  $\lambda$  является функцией только  $\Delta/d$  и не зависит от числа Re. Поэтому данную область называют еще и автомоделльной.

При использовании кривых, полученных И. Никурадзе, для практических расчетов встретились трудности в связи с тем, что применяемые в технике материалы (металлы, дерево, стекло и пр.) имеют неравномерную шероховатость (различную высоту, форму и густоту выступов).

Опыты показывают, что даже при одной и той же абсолютной шероховатости  $\Delta$  (средней высоте выступов) трубы из разного материала могут иметь различный коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ . Поэтому в практику гидравлических расчетов было введено представление об эквивалентной шероховатости.

Под *эквивалентной шероховатостью*  $\Delta_{\text{э}}$  понимают такую равномерно-зернистую шероховатость, при которой коэффициент  $\lambda$  получается таким же, как и при естественной неравномерной шероховатости. Численные значения эквивалентной шероховатости для различных типов труб приведены в справочной литературе [7].

Многочисленные исследования ряда авторов (И.А. Исаева, Г.А. Мурина, Ф.А. Шевелева и др.) в трубах с естественной неравномерной шероховатостью, изготовленных из различных материалов (сталь, чугун и др.), обнаружили некоторые отличия в ходе экспериментальных кривых, полученных И. Никурадзе.

В частности, на рисунке 4.3,б представлен график зависимости  $\lambda = f(\text{Re}, \Delta_{\text{э}}/d)$ , построенный по результатам опытов Г.А. Мурина со стальными промышленными трубами [5].

Из графика видно, что форма кривых в переходной области 2 отличается от той, которая была получена Никурадзе. Коэффициент  $\lambda$  в этой области оказывается всегда больше, чем в области гидравлически шероховатых поверхностей (а не меньше, как у Никурадзе), и при увеличении числа Re непрерывно уменьшается (кривые не имеют впадины). Плавное снижение ординат кривых с ростом числа Re объясняется тем, что при естественной шероховатости труб с уменьшением толщины вязкого подслоя бугорки шероховатости, имеющие разную высоту, вступают в соприкосновение с турбулентным ядром не одновременно, а при разных значениях числа Re.

В таблице 4.1 представлены удобные для практического использования расчетные формулы для определения коэффициента  $\lambda$  во всех зонах и областях гидравлических сопротивлений [7].

Следует иметь в виду, что при решении конкретных задач данными расчетными зависимостями можно пользоваться только для приближен-

ных расчетов. Для более точного определения коэффициента  $\lambda$  необходимо проводить гидравлические испытания конкретной схемы, установки или системы.

Таблица 4.1 – Расчетные формулы для определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda$

| Зона или область сопротивления (см. рисунок 4.3) | Режим движения                                               | Границы зоны или области                        | Расчетные формулы                                                                                                       |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                                                | Ламинарный                                                   | $Re \leq 2000$                                  | $\lambda = \frac{64}{Re}$                                                                                               |
| II                                               | Переходный                                                   | $2000 < Re < 4000$                              | $\lambda$ определяется по формуле для зоны III, 1                                                                       |
| III, 1                                           | Турбулентный, область гидравлически гладких поверхностей     | $4000 \leq Re \leq 10 d/\Delta_\Sigma$          | $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$<br>(формула Блазиуса)                                                              |
| III, 2                                           | Турбулентный, переходная область                             | $10 d/\Delta_\Sigma < Re < 500 d/\Delta_\Sigma$ | Для новых труб:<br>$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_\Sigma}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$<br>(формула Альтшуля) |
| III, 3                                           | Турбулентный, область гидравлически шероховатых поверхностей | $Re \geq 500 d/\Delta_\Sigma$                   | Для новых труб:<br>$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_\Sigma}{d} \right)^{0,25}$<br>(формула Шифринсона)               |

Потерю напора по длине трубопровода  $h_\partial$  можно выразить в функции средней скорости в сечении трубы  $v_{cp}$ , если подставить в уравнение Дарси-Вейсбаха (4.1) формулы для коэффициента  $\lambda$  (см. таблицу 4.1) и числа Рейнольдса (2.7).

Так, для ламинарного режима движения:

$$h_\partial = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g} = \frac{32\nu l v_{cp}}{gd^2} = k_\lambda v_{cp},$$

где  $k_\lambda$  – коэффициент пропорциональности.

Данная зависимость носит название формулы Пуазейля. Из этой формулы видно, что при ламинарном режиме движения потеря напора по длине прямо пропорциональна средней скорости в первой степени, вязкости жидкости, обратно пропорциональна квадрату диаметра трубы и не зависит от состояния стенок (шероховатости).

При турбулентном режиме движения зависимость потери напора от средней скорости будет иной, причем различной для трех областей сопротивления.

В области гидравлически гладких поверхностей потеря напора по длине пропорциональна скорости в степени 1,75:

$$h_d = k_{el} v_{cp}^{1,75}.$$

В области гидравлически шероховатых поверхностей – квадрату скорости:

$$h_d = k_{ш} v_{cp}^2,$$

в связи с чем данную область часто называют областью квадратичного сопротивления.

В переходной области

$$h_d = k_n v_{cp}^{1,75 \div 2}.$$

Данную область часто называют областью доквадратичного сопротивления.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что при тех же размерах трубы в турбулентном потоке потеря напора по длине значительно больше, чем в ламинарном.

Снижение потерь напора в гидравлических системах является составной частью более общей задачи о нахождении оптимальных конструктивных параметров с учетом стоимости постройки и эксплуатации.

Исходя из общего выражения потерь напора по длине трубопровода (формула 4.1) основные пути их снижения:

- 1) Уменьшение средней скорости перекачки жидкости  $v_{cp}$ .
- 2) Уменьшение относительной длины трубопровода  $l/d$ .
- 3) Уменьшение коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ .

Первые два пути связаны между собой, так как уменьшение средней скорости при заданном расходе требует увеличения диаметра. Однако увеличение диаметра трубопроводов, особенно в судовых условиях, ограничено весогабаритными характеристиками.

Меры по снижению коэффициента  $\lambda$  зависят от режима движения жидкости и области гидравлического сопротивления, в которой работает трубопровод.

Так, при ламинарном режиме движения, а также при турбулентном режиме в случае гидравлически гладкой поверхности трубопровода,  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса, убывая при его увеличении. При заданных  $v_{cp}$  и  $d$  увеличение числа Re можно осуществить снижением коэффициента кинематической вязкости  $\nu$  путем подогрева капельных жидкостей (топлива, нефтепродуктов и пр.) или стенок трубопровода либо за счет охлаждения воздуха и других газов или стенок воздухопровода.

В случае гидравлически шероховатой поверхности коэффициент  $\lambda$  зависит только от шероховатости и не зависит от числа Re. Так как в процес-

се эксплуатации шероховатость может увеличиваться за счет коррозии, отложений и пр., то необходимо периодически очищать трубопроводы.

Эффективным способом снижения коэффициента  $\lambda$  гидравлически шероховатых трубопроводов является введение в поток жидкости малых ( $0,001 \div 0,1\%$ ) добавок растворимых полимеров (полиизобутилена, полиакриламида, раствора сырого каучука и пр.) или поверхностно-активных веществ (ПАВ) ( $0,1 \div 1\%$ ). Вблизи стенок длинные молекулы полимеров или ПАВ, вытягиваясь в нити, ориентируются преимущественно по направлению движения потока. Это способствует значительному уменьшению (в 4-5 раз) турбулентных пульсаций скорости в поперечном направлении, что увеличивает толщину вязкого подслоя, а следовательно, приводит к снижению коэффициента  $\lambda$  и потерь напора (на 60-80%).

Еще одним способом снижения гидравлических сопротивлений является применение податливых, ограничивающих поток, поверхностей. Для этого используют трубопроводы из полимерных материалов, стенкам которых сообщаются колебания с определенными частотой и амплитудой в соответствии с характером пульсации, возникающей в жидкости. По данным опытов, снижение гидравлического сопротивления таких трубопроводов составляет  $25 \div 30\%$ , а в перспективе может быть доведено до 50%.

### 4.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 4.4 [8].

Для определения коэффициента гидравлического трения используется горизонтальный трубопровод 1 постоянного диаметра  $d = 0,0147$  м, в который посредством насоса подается вода из напорного бака. Установка оборудована вентилями 2 и 6 (для регулирования расхода протекающей по трубопроводу воды) и мерной емкостью 9 с открывающимся при помощи рычага 7 дном 8. Для измерения разности давлений в сечениях I и II, расположенных друг от друга на расстоянии  $l = 1,37$  м, установлен дифференциальный пьезометр 4, представляющий собой два пьезометра, соединенных вверху между собой. Продувочные краны 3 и 5 предназначены для вывода воздуха из системы.

Исходным уравнением для определения потери напора по длине  $h_d$  является уравнение Бернулли (3.3), записанное для участка трубопровода между сечениями I и II:

$$z_I + \frac{p_I}{\gamma} + \frac{\alpha_I v_{срI}^2}{2g} = z_{II} + \frac{p_{II}}{\gamma} + \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g} + h_d.$$

Для горизонтального участка трубопровода постоянного проходного сечения ( $z_I = z_{II}$  и  $v_{срI} = v_{срII} = v_{ср}$ ) уравнение Бернулли примет вид:

$$\frac{p_I}{\gamma} = \frac{p_{II}}{\gamma} + h_d \quad \text{или} \quad h_d = \frac{p_I}{\gamma} - \frac{p_{II}}{\gamma} = h_{p1} - h_{p2} = \Delta h_p.$$

где  $h_{p1}$  и  $h_{p2}$  – пьезометрические высоты (уровни жидкости в левом и правом коленях дифференциального пьезометра).

Подставляя в последнее уравнение формулу Дарси – Вейсбаха (4.1), получим:

$$\lambda \frac{l}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g} = h_{p1} - h_{p2} = \Delta h_p.$$

Отсюда

$$\lambda = 2g \frac{\Delta h_p d}{v_{cp}^2 l}. \quad (4.2)$$

Таким образом, для опытного определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  в данном случае достаточно измерить показание дифференциального пьезометра  $\Delta h_p$  и найти среднюю скорость движения воды в трубопроводе  $v_{cp}$ .

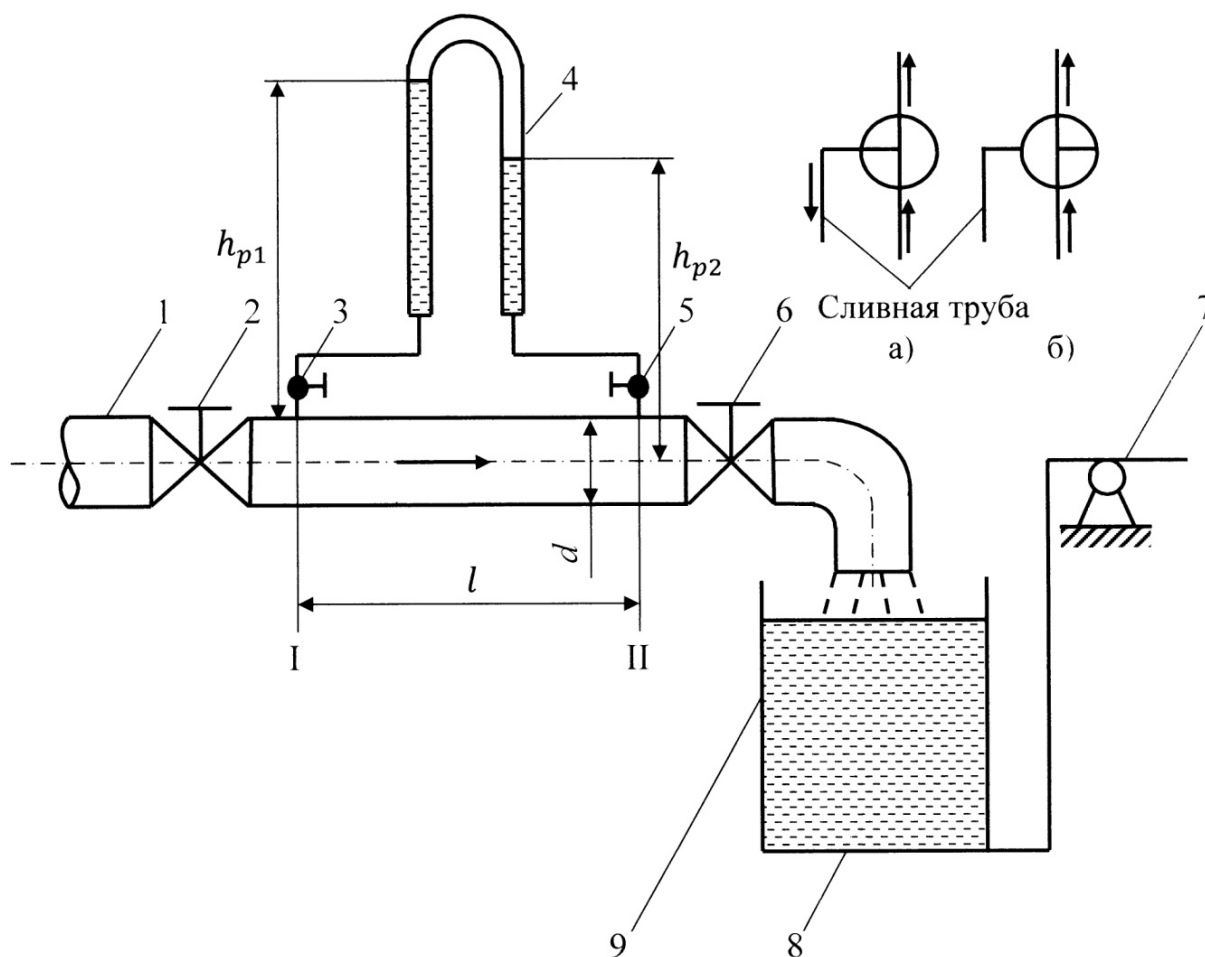


Рисунок 4.3 – Схема лабораторной установки:

а) положение продувочных кранов при продувке; б) рабочее положение кранов; 1 – трубопровод; 2, 6 – вентили; 4 – дифференциальный пьезометр; 3, 5 – продувочные краны; 7 – рычаг; 8 – дно мерной емкости; 9 – мерная емкость

#### 4.4. Порядок выполнения опытов

1. Проверить закрытие всех вентилях на лабораторной установке.
2. При помощи рычага 7 открыть дно 8 мерной емкости 9.
3. Включить насос установки, открыть вентили 2 и 6 и подать воду в трубопровод.
4. Продувочные краны 3 и 5 поставить в положение "продувка".
5. Убедившись в отсутствии пузырьков воздуха в трубках дифференциального манометра и на выходе из сливной трубы продувки, поставить краны 3 и 5 в рабочее положение.
6. С помощью вентилях 2 и 6 установить определенный расход воды, ориентируясь по показанию дифференциального манометра 4.
7. Добиться установившегося движения воды в трубопроводе и снять показания  $h_{PI}$  и  $h_{PII}$  дифференциального манометра.
10. Закрыть дно 8 мерной емкости 9 и по секундомеру определить время  $t$  ее наполнения.
11. Открыть дно мерной емкости.
12. Опыты повторить несколько раз при различных расходах воды.
13. Определить коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$  в зависимости от температуры жидкости (см. приложение Б).
14. Результаты замеров занести в таблицу 4.2.

#### 4.5. Обработка опытных данных

1. Определить объемный расход жидкости  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , по формуле:
 
$$Q = \frac{V}{\tau},$$
 где  $V$  – заполняемый объем мерной емкости,  $\text{м}^3$ ;  
 $\tau$  – время заполнения мерной емкости, с.
2. Определить среднюю в сечении трубы скорость  $v_{\text{ср}}$ ,  $\text{м}/\text{с}$ , по формуле:
 
$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{S},$$
 где  $S = \pi d^2/4$  – площадь сечения трубопровода,  $\text{м}^2$ .
3. По формуле (4.2) определить опытное значение коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{\text{оп}}$ .
4. Определить число Рейнольдса по формуле:
 
$$\text{Re} = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}.$$
5. По величине числа Рейнольдса установить режим движения жидкости в трубопроводе и область гидравлического сопротивления (см. таблицу 4.1).

6. Определить расчетное значение коэффициента гидравлического трения  $\lambda_p$  по соответствующей формуле (см. таблицу 4.1) (абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубопровода  $\Delta = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м).

7. Сопоставить опытное и расчетное значение  $\lambda$  и определить относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_{\text{оп}} - \lambda_p}{\lambda_p}.$$

8. Результаты обработки опытных данных свести в таблицу 4.2.

Таблица 3.1 – Опытные данные и их обработка

| № за-<br>мера | $h_{p1},$<br>м | $h_{p2},$<br>м | $\Delta h_p$<br>м | $\tau,$<br>с | $Q,$<br>м <sup>3</sup> /с | $v_{\text{ср}},$<br>м/с | Re | $\lambda_{\text{оп}}$ | $\lambda_p$ | $\varepsilon,$<br>% |
|---------------|----------------|----------------|-------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|----|-----------------------|-------------|---------------------|
| 1             |                |                |                   |              |                           |                         |    |                       |             |                     |
| 2             |                |                |                   |              |                           |                         |    |                       |             |                     |
| 3             |                |                |                   |              |                           |                         |    |                       |             |                     |

#### 4.6. Контрольные вопросы

1. Что называется потерей напора? Чем она обуславливается?
2. Назовите виды потерь напора. От чего они зависят?
3. Приведите формулу Дарси-Вейсбаха. От каких параметров, в общем случае, зависит коэффициент гидравлического трения?
4. Что понимают под абсолютной, относительной и эквивалентной шероховатостью?
5. Дайте понятие гидродинамического пограничного слоя, вязкого подслоя и турбулентного ядра. Что понимают под начальным участком трубопровода и участком стабилизированного течения?
6. Какая поверхность называется гидравлически гладкой, переходной и гидравлически шероховатой?
7. Назовите и охарактеризуйте зоны и области графика Никурадзе.
8. В чем основное отличие графиков Никурадзе и Мурина?
9. Приведите основные расчетные зависимости для определения  $\lambda$ .
10. Почему область гидравлически шероховатых поверхностей называют еще и автомодельной? квадратичной?
11. В каком потоке (ламинарном или турбулентном) в одном и то же трубопроводе потери напора по длине будут больше? Почему?
12. Назовите основные способы снижения потерь напора по длине.
13. Каково устройство установки для определения коэффициента  $\lambda$ ?
14. Можно ли определить потерю напора по длине трубопровода при помощи пьезометров? дифференциального пьезометра?
15. По длине трубопровода постоянного сечения произошла потеря энергии. Какой – потенциальной, кинетической или обеих?

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

### 5.1. Цель работы

Целью работы является опытное определение коэффициентов местных сопротивлений при установившемся движении жидкости в трубопроводе и сравнение их с расчетными значениями.

### 5.2. Теоретический раздел

*Местные потери  $h_m$*  вызываются изменением конфигурации потока, величины или направления его скорости в местных сопротивлениях, к которым относят: расширение или сужение трубопровода (внезапное или постепенное); колена; арматуру различного типа (краны, вентили, клапаны, дроссельные диафрагмы, задвижки, затворы и пр.); тройники.

В зонах местных сопротивлений происходит отрыв потока от твердой поверхности и образование водоворотов (рисунок 5.1), движение которых вследствие трения затухает с тем, чтобы в последующие моменты времени возникнуть вновь. Таким образом, часть полного напора затрачивается на образование и поддержание водоворотного движения между основным потоком и твердой стенкой.

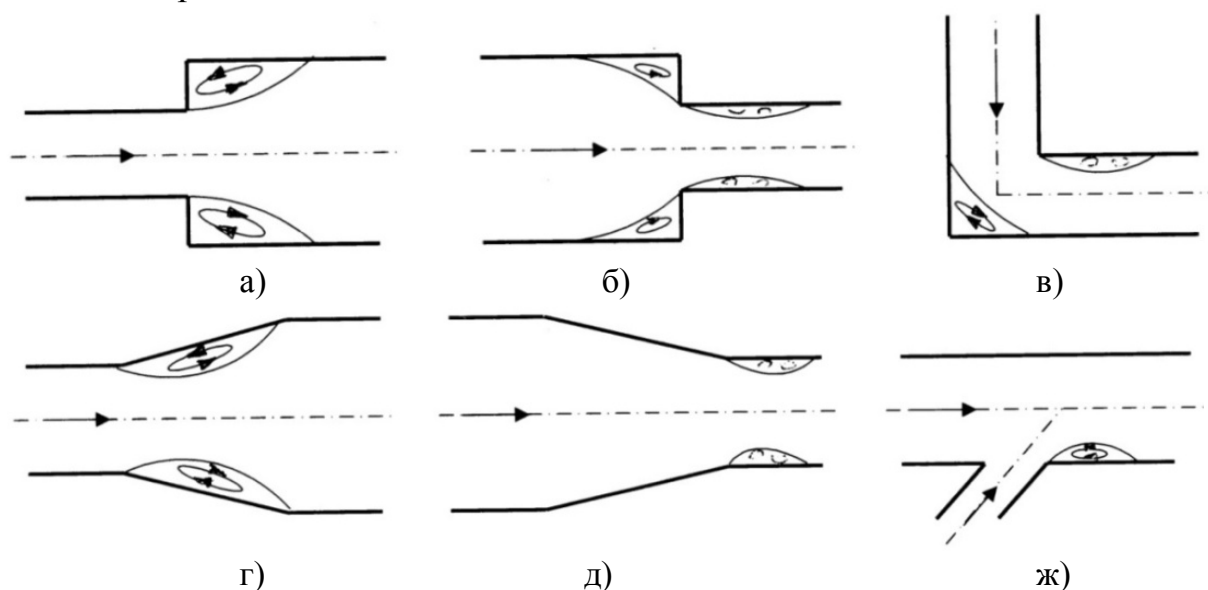


Рисунок 5.1 – Водоворотные зоны в местных сопротивлениях;  
а) внезапное расширение; б) внезапное сужение; в) колено;  
г) постепенное расширение; д) постепенное сужение; ж) тройник

Местные потери определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v_{cp}^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления, зависящий, в основном, от вида местного сопротивления, а также от числа Рейнольдса, если его значение достаточно мало;

$v_{cp2}$  – средняя скорость в сечении обычно за местным сопротивлением.

В большинстве случаев коэффициент  $\zeta$  определяют по справочным данным [7], полученным для различных местных сопротивлений опытным путем.

При внезапном расширении трубопровода местные потери напора могут быть найдены по формуле Борда:

$$h_{м.р.} = \frac{(v_{cp1} - v_{cp2})^2}{2g} = \zeta \frac{v_{cp2}^2}{2g}, \quad (5.2)$$

где  $v_{cp1}$  и  $v_{cp2}$  – средние скорости до и после внезапного расширения.

Коэффициент местного сопротивления в данном случае равен:

$$\zeta = \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2, \quad (5.3)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечений трубы до и после внезапного расширения.

В частном случае при выходе жидкости из трубы в резервуар можно принять  $v_{cp2} = 0$ . С учетом формулы (5.2) получим:

$$h_{м.вых} = \zeta_{вых} \frac{v_{cp1}^2}{2g},$$

где  $\zeta_{вых} = 1$ .

При внезапном сужении трубопровода  $\zeta$  можно определить по формуле Идельчика:

$$\zeta = 0,5 \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right), \quad (5.4)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечений трубы до и после внезапного сужения.

В частном случае при входе из резервуара в трубу в формуле (5.4) площадью  $S_2$  можно пренебречь. Тогда  $\zeta_{вх} = 0,5$ .

В трубопроводы часто включают устройства для искусственного создания сопротивления (запорные устройства различного вида: клапаны, вентили, задвижки, краны, затворы, диафрагмы). Примеры таких устройств представлены на рисунке 5.2.

Во всех этих устройствах местные потери напора обуславливаются поджатием потока с его последующим постепенным расширением и определяются по формуле Вейсбаха (5.1), в которой коэффициент местных потерь  $\zeta$  зависит от вида запорного устройства и степени его открытия.

Для снижения потерь напора местные сопротивления необходимо выполнять без острых, выступающих в поток, частей. Переходы от одного сечения к другому должны быть плавными, без уступов, а повороты потока должны иметь закругления.

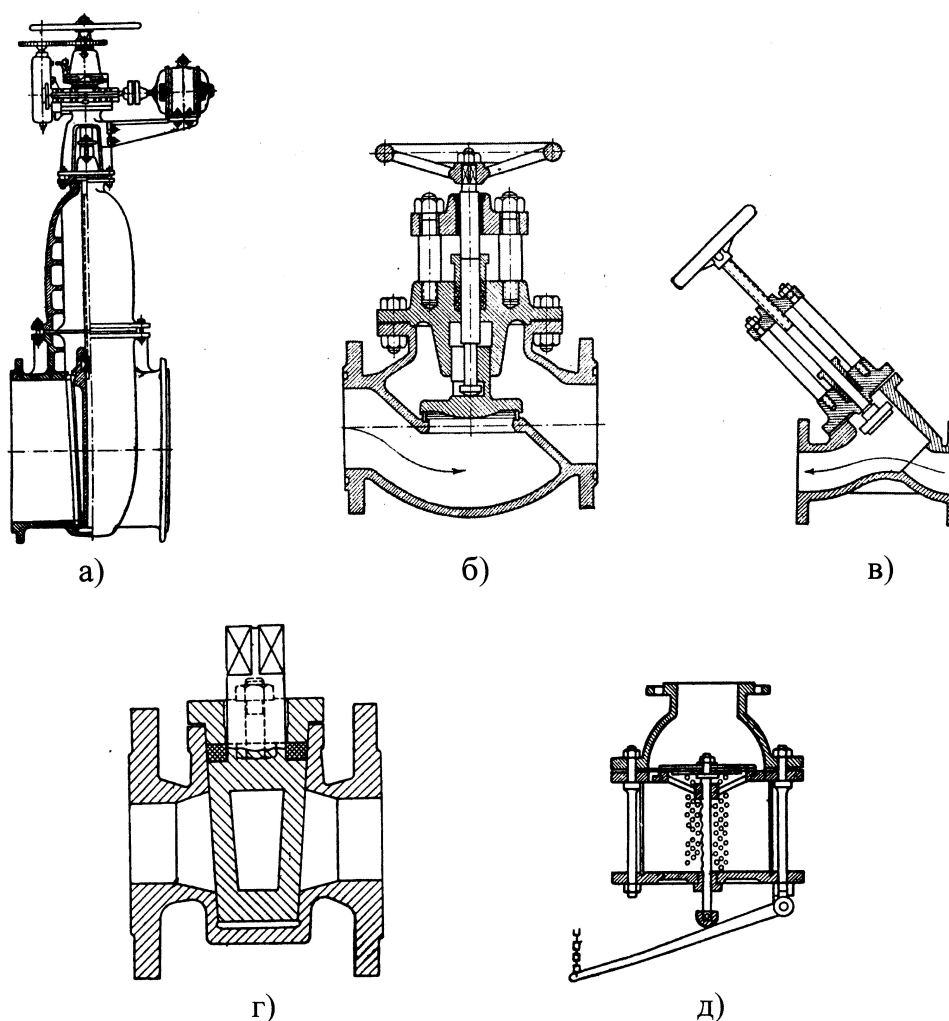


Рисунок 5.2 – Запорные устройства трубопроводов:

а) задвижка; б) вентиль обыкновенный; в) вентиль с косым затвором;  
г) пробочный кран; д) всасывающая сетка с обратным клапаном

Если поток на своем пути встречает несколько местных сопротивлений, то общие местные потери напора обычно определяют арифметическим суммированием местных потерь в отдельно взятых местных сопротивлениях:

$$h_m = h_{m1} + h_{m2} + \dots + h_{mn} = \sum_{i=1}^n h_{mi}.$$

Однако при относительно близком расстоянии между местными сопротивлениями, смонтированным на одном трубопроводе, сказывается интерференция – взаимное влияние одного местного сопротивления на другое. При этом нарушается режим течения потока с установившемся полем скоростей и изменяются условия подхода жидкости к каждому последующему местному сопротивлению. При этом общие местные потери напора могут существенно отличаться от арифметической суммы значений коэффициентов отдельных сопротивлений и могут быть как больше, так и меньше этой суммы.

Расстояние, на котором сказывается это влияние приближенно составляет  $(40 \div 60)$  диаметра трубопровода.

В связи с этим, наиболее точным способом исследования местных потерь напора является определение их опытным путем.

Общие потери напора, возникающие при движении жидкости, определяются арифметическим суммированием потерь напора на прямолинейных участках и в местных сопротивлениях (принцип наложения потерь):

$$h_w = \sum h_{\partial} + \sum h_m.$$

где  $\sum h_{\partial}$  – сумма потерь напора по длине на прямолинейных участках потока;

$\sum h_m$  – сумма потерь напора в местных сопротивлениях.

Иногда при расчетах местные сопротивления условно заменяют прямолинейным трубопроводом эквивалентной длины (рисунок 5.3).

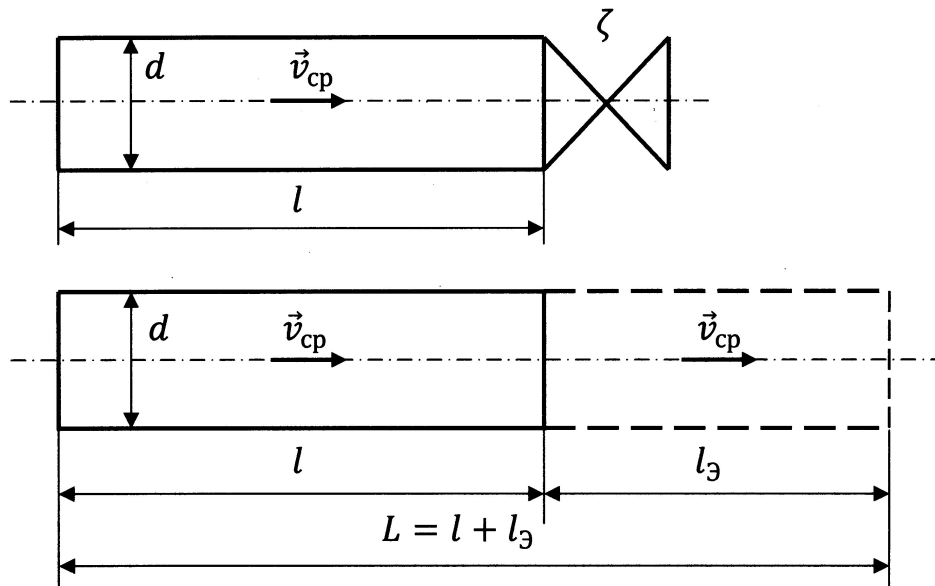


Рисунок 5.3 – Расчетная схема к определению эквивалентной длины трубопровода

Эквивалентная длина  $l_3$  – это длина прямолинейного участка трубопровода, потери напора на котором равны местным потерям в отдельно взятом местном сопротивлении при одинаковых расходах жидкости, то есть

$$h_m = h_{\partial} \quad \text{или} \quad \zeta \frac{v_{cp}^2}{2g} = \lambda \frac{l_3}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g}.$$

Откуда

$$l_3 = \zeta d / \lambda.$$

Тогда общие потери напора в трубопроводе:

$$h_w = h_{\partial} + h_m = \lambda \frac{l}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g} + \lambda \frac{l_3}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g} = \lambda \frac{L}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g},$$

где  $L = l + l_3$  – расчетная длина трубопровода.

### 5.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 5.4 [8].

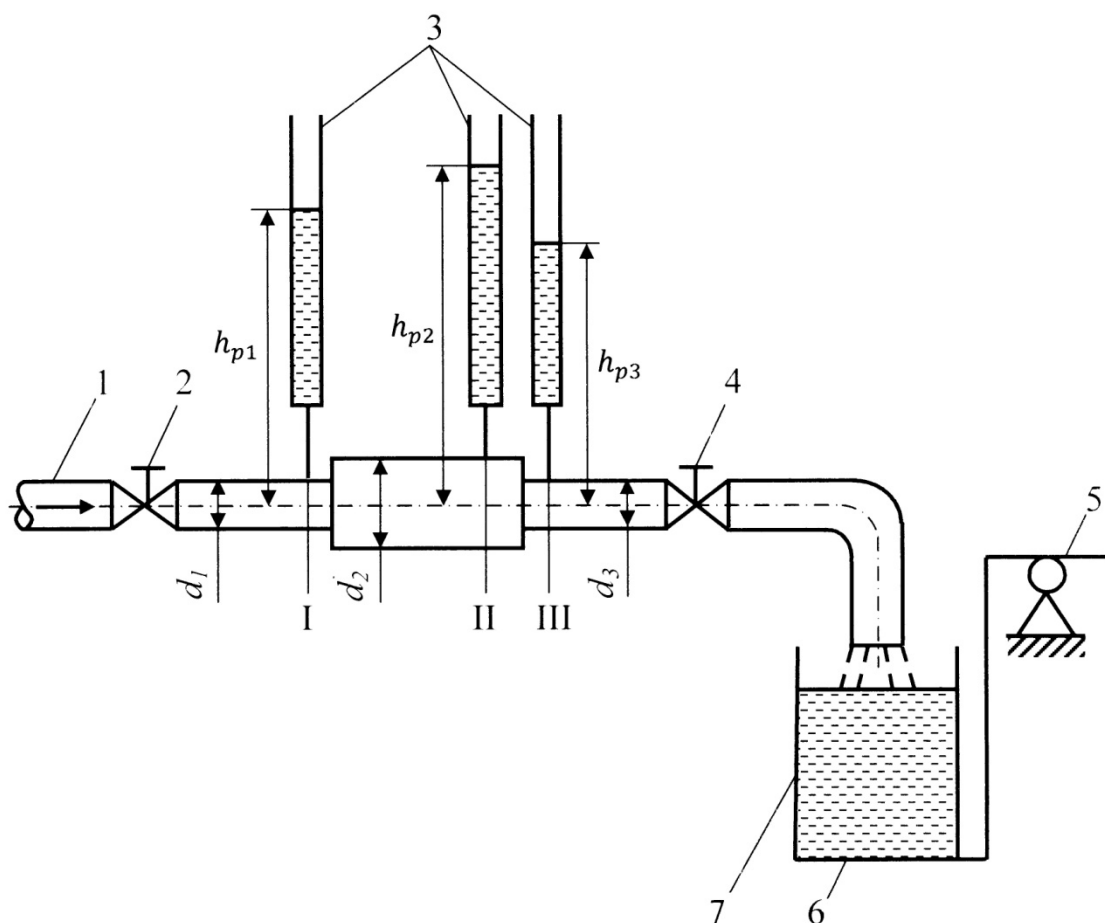


Рисунок 5.4 – Схема лабораторной установки:

1 – трубопровод; 2,4 – вентили; 3 – пьезометры; 5 – рычаг; 6 – дно мерной емкости;  
7 – мерная емкость;  $d_1 = d_3 = 0,03$  м;  $d_2 = 0,086$  м

Для опытного определения коэффициентов местных сопротивлений используется горизонтальный трубопровод 1, состоящий из прямолинейных участков разного диаметра  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$ . В трубопровод посредством насоса подается вода из напорного бака. Установка оборудована вентилями 2 и 4 (для регулирования расхода протекающей по трубопроводу воды) и мерной емкостью 7 с открывающимся при помощи рычага 5 дном 6. Для измерения разности давлений в сечениях I, II и III установлены пьезометры 3.

Таким образом, вода на своем пути встречает два местных сопротивления: внезапное расширение и внезапное сужение трубопровода.

Исходным уравнением для определения местных потерь напора  $h_m$  является уравнение Бернулли (3.3).

При внезапном расширении уравнение Бернулли, записанное для горизонтального участка трубопровода между сечениями I и II, принимает вид:

$$\frac{p_I}{\gamma} + \frac{\alpha_I v_{срI}^2}{2g} = \frac{p_{II}}{\gamma} + \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g} + h_{м.в.р.}$$

или

$$h_{p1} + \frac{\alpha_I v_{срI}^2}{2g} = h_{p2} + \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g} + h_{м.в.р.},$$

где  $h_{p1}$  и  $h_{p2}$  – пьезометрические высоты (уровни жидкости в первом и втором пьезометрах).

Отсюда

$$h_{м.в.р.} = h_{p1} - h_{p2} + \frac{\alpha_I v_{срI}^2}{2g} - \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g}. \quad (5.5)$$

Из формулы Вейсбаха (5.1) коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении  $\zeta$  определяется как

$$\zeta = \frac{2gh_{м.в.р.}}{v_{срII}^2}. \quad (5.6)$$

Аналогично при внезапном сужении уравнение Бернулли, записанное для горизонтального участка трубопровода между сечениями II и III, принимает вид:

$$\frac{p_{II}}{\gamma} + \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g} = \frac{p_{III}}{\gamma} + \frac{\alpha_{III} v_{срIII}^2}{2g} + h_{м.в.с.}$$

или

$$h_{p2} + \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g} = h_{p3} + \frac{\alpha_{III} v_{срIII}^2}{2g} + h_{м.в.с.},$$

где  $h_{p2}$  и  $h_{p3}$  – пьезометрические высоты (уровни жидкости во втором и третьем пьезометрах).

Отсюда

$$h_{м.в.с.} = h_{p2} - h_{p3} + \frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g} - \frac{\alpha_{III} v_{срIII}^2}{2g}. \quad (5.7)$$

Из формулы Вейсбаха (5.1) коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении  $\zeta$  определяется как

$$\zeta = \frac{2gh_{м.в.с.}}{v_{срIII}^2}. \quad (5.8)$$

#### 5.4. Порядок выполнения опытов

1. При помощи рычага 5 открыть дно 6 мерной емкости 7.
2. С помощью вентиля 2 и 4 добиться установившегося движения воды в трубопроводе.
3. Снять показания  $h_{p1}$ ,  $h_{p2}$  и  $h_{p3}$  пьезометров.
4. Закрыть дно 6 мерной емкости 7.
5. Измерить по секундомеру время  $\tau$  наполнения мерной емкости 7.

6. Опыты повторить несколько раз при различных расходах воды.
7. Определить коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, в зависимости от температуры жидкости (см. приложение Б).
8. Результаты замеров занести в таблицы 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Опытные данные и их обработка при внезапном расширении трубопровода

| № замера | $h_{p1}$ , м | $h_{p2}$ , м | $\tau$ , с | $Q$ , м <sup>3</sup> /с | $v_{срI}$ , м/с | $v_{срII}$ , м/с | $\frac{\alpha_I v_{срI}^2}{2g}$ , м | $\frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g}$ , м | $\zeta_{on}$ | $\zeta_p$ | $\varepsilon$ , % |
|----------|--------------|--------------|------------|-------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------|-----------|-------------------|
| 1        |              |              |            |                         |                 |                  |                                     |                                         |              |           |                   |
| 2        |              |              |            |                         |                 |                  |                                     |                                         |              |           |                   |
| 3        |              |              |            |                         |                 |                  |                                     |                                         |              |           |                   |

Таблица 5.2 – Опытные данные и их обработка при внезапном сужении трубопровода

| № замера | $h_{p2}$ , м | $h_{p3}$ , м | $\tau$ , с | $Q$ , м <sup>3</sup> /с | $v_{срII}$ , м/с | $v_{срIII}$ , м/с | $\frac{\alpha_{II} v_{срII}^2}{2g}$ , м | $\frac{\alpha_{III} v_{срIII}^2}{2g}$ , м | $\zeta_{on}$ | $\zeta_p$ | $\varepsilon$ , % |
|----------|--------------|--------------|------------|-------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|-----------|-------------------|
| 1        |              |              |            |                         |                  |                   |                                         |                                           |              |           |                   |
| 2        |              |              |            |                         |                  |                   |                                         |                                           |              |           |                   |
| 3        |              |              |            |                         |                  |                   |                                         |                                           |              |           |                   |

### 5.5. Обработка опытных данных

1. Определить объемный расход жидкости  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau},$$

где  $V$  – заполняемый объем мерной емкости, м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время заполнения мерной емкости, с.

2. Определить средние скорости движения жидкости в сечениях I-I, II-II и III-III трубопровода по формулам:

$$v_{срI} = \frac{Q}{S_1}, \quad v_{срII} = \frac{Q}{S_2}, \quad v_{срIII} = \frac{Q}{S_3},$$

где  $S_1 = \pi d_1^2/4$ ,  $S_2 = \pi d_2^2/4$  и  $S_3 = \pi d_3^2/4$  – площади сечений I-I, II-II и III-III, м<sup>2</sup>.

3. Определить числа Рейнольдса в сечениях I-I, II-II и III-III по формулам:

$$Re_1 = \frac{v_{срI} d_1}{\nu}, \quad Re_2 = \frac{v_{срII} d_2}{\nu}, \quad Re_3 = \frac{v_{срIII} d_3}{\nu}.$$

4. По величине чисел Рейнольдса установить режим движения жидкости в сечениях I-I, II-II и III-III.

5. В зависимости от режима движения жидкости выбрать численные значения коэффициентов Кориолиса  $\alpha_I$ ,  $\alpha_{II}$  и  $\alpha_{III}$ .

6. Определить скоростные напоры  $\alpha_I v_{срI}^2 / 2g$ ,  $\alpha_{II} v_{срII}^2 / 2g$  и  $\alpha_{III} v_{срIII}^2 / 2g$ , м, в сечениях I-I, II-II и III-III.

7. По формулам (5.5) и (5.7) определить местные потери напора при внезапном расширении и внезапном сужении трубопровода.

8. По формулам (5.6) и (5.8) определить опытные коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta_{оп}$  при внезапном расширении и сужении трубопровода.

6. Определить расчетные значения коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta_p$  по соответствующей формуле (5.3) и (5.4).

7. Сопоставить опытное и расчетное значение  $\zeta$  и определить относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\zeta_{оп} - \zeta_p}{\zeta_p}.$$

9. Результаты обработки опытных данных свести в таблицы 5.1 и 5.2.

## 5.6. Контрольные вопросы

1. Чем обуславливаются местные потери напора?
2. Назовите виды местных сопротивлений.
3. Приведите формулу Вейсбаха.
4. От чего в общем случае зависит коэффициент местного сопротивления?
5. Как определяются общие местные потери напора в трубопроводе при наличии нескольких местных сопротивлений?
6. Когда сказывается взаимное влияние местных сопротивлений?
7. Какие существуют способы уменьшения местных потерь напора?
8. Что понимают под эквивалентной длиной трубопровода?
9. Каково устройство установки для опытного определения коэффициентов местных сопротивлений?
10. Приведите последовательность проведения опытов по определению коэффициентов местных сопротивлений при внезапном расширении и сужении трубопровода.

## 6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ И НАСАДОК

### 6.1. Цель работы

Целью работы является опытное определение коэффициентов расхода при истечении жидкости через отверстие и насадок.

### 6.2. Теоретический раздел

Законы истечения жидкости из отверстий и насадков различной формы имеют большое практическое значение, поскольку они применяются при решении многих технических задач (при расчетах расходомерных устройств, наполнении и опорожнении резервуаров, водохранилищ, бассейнов, расчетах эжекторов и инжекторов, карбюраторов, пожарных брандспойтов и пр.)

Для практики наибольший интерес представляет задача о связи между напором (уровнем жидкости) в резервуаре и скоростью (расходом) струи, вытекающей из отверстия или насадка в стенке или дне резервуара:

$$v(Q) = f(H).$$

Истечение может происходить как в атмосферу (свободное истечение), так и под уровень жидкости, при постоянном напоре (установившееся истечение) или при переменном напоре (неустановившееся истечение).

Отверстия классифицируют по следующим признакам.

1. *По форме.* Различают круглые, квадратные, прямоугольные, треугольные и пр.

2. *По размеру.* Различают малые и большие отверстия.

*Малым* называют отверстие, вертикальный размер которого значительно меньше напора перед отверстием, что позволяет считать давление во всех точках этого отверстия практически одинаковым. Высота такого отверстия  $a$  или диаметр  $d$  (для круглого отверстия) не превышает  $0,1 H$ . В противном случае отверстие считается *большим*. При этом речь не идет об абсолютных геометрических размерах отверстий, а о соизмеримости их высоты и расчетного напора. Таким образом, узкая вертикальная щель в боковой стенке резервуара является большим отверстием, а отверстие любого размера в дне резервуара – малым.

3. *По толщине стенки,* в которой выполнено отверстие. Различают тонкие и толстые стенки.

*Тонкой,* с гидравлической точки зрения, считают стенку, если вытекающая через отверстие в ней струя жидкости соприкасается лишь с кромкой отверстия, обращенной внутрь резервуара, и не касается боковой поверхности отверстия. Это может быть обеспечено либо при малой толщине стенки (для круглого отверстия  $\delta \leq 0,2 d_o$ ) (рисунок 6.1,а), либо срезом кромок под острым углом (рисунок 6.1,б). При истечении жидкости через отверстие в тонкой стенке учитываются только местные потери напора.

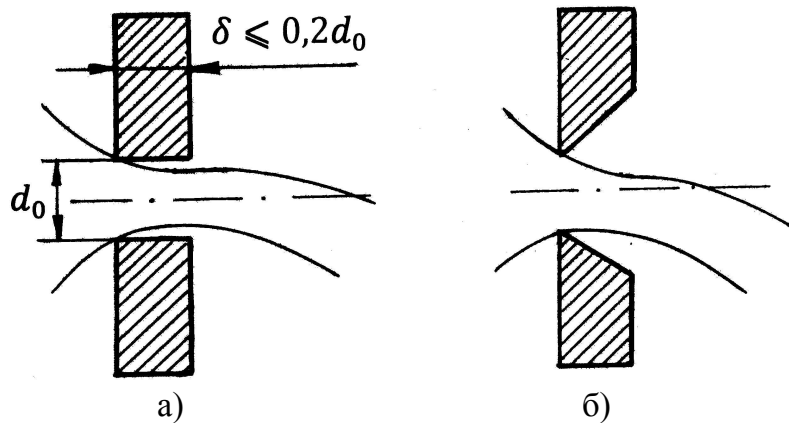


Рисунок 6.1 –Тонкие стенки

В противном случае стенка называется *толстой*. Через отверстие в такой стенке жидкость течет как бы в короткой трубе.

Как показывают опыты, при установившемся истечении через малое отверстие площадью сечения  $S_o$ , расположенное в тонкой стенке, струя жидкости на выходе из отверстия сжимается и на некотором расстоянии от последнего (для круглого отверстия это расстояние равно примерно половине его диаметра) приобретает наименьшую площадь сечения  $S_c$  (рисунок 6.2). Это объясняется тем, что частицы жидкости, подходящие с разных сторон к отверстию, вследствие инерции обтекают его кромку по плавным сходящимся кривым. За сжатым сечением кривые выравниваются, и возникает практически параллельно-струйное движение жидкости.

Отношение площади сжатого сечения к площади отверстия называется *коэффициентом сжатия струи*:

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_o}.$$

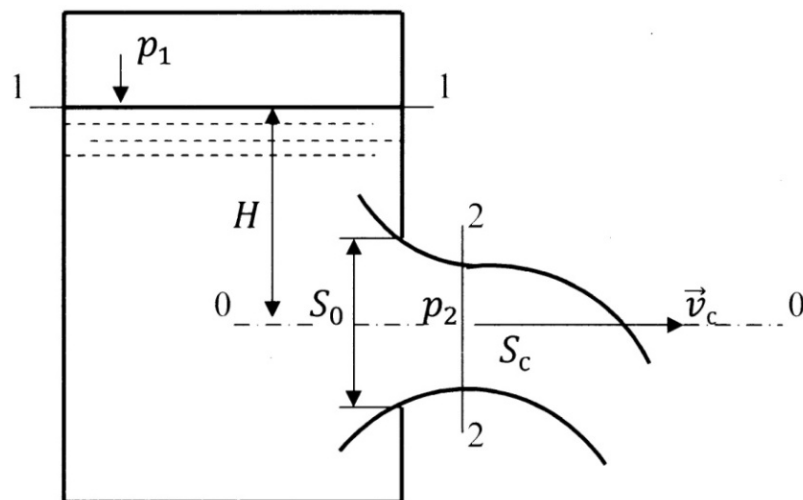


Рисунок 6.2 –Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке

Степень сжатия струи существенно влияет на характер истечения из отверстия и, в свою очередь, зависит от расположения отверстия.

Сжатие является *совершенным*, когда боковые стенки и дно резервуара практически не влияют на истечение, то есть когда отверстие находится от них на расстоянии  $l$ , большем утроенного размера отверстия (рисунок 6.3, 1). В противном случае имеет место *несовершенное* сжатие (рисунок 6.3, 2) и боковые стенки или дно резервуара влияют на истечение.

Сжатие струи может быть *полным* (по всему периметру) и *неполным*. При неполном сжатии отверстие прилегает к одной или нескольким стенкам, со стороны которых жидкость не испытывает сжатия (рисунок 6.3, 3).

При совершенном сжатии для отверстия круглой формы  $\varepsilon = 0,64$ .

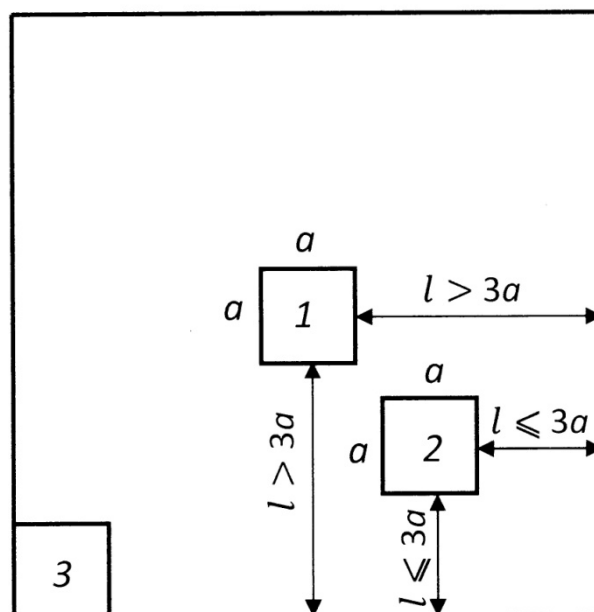


Рисунок 6.3 – Расположение отверстий при совершенном, несовершенном и неполном сжатии

Скорость истечения жидкости из отверстия определяется как скорость в сжатом сечении  $v_c$  из уравнения Бернулли (3.3), записанного для двух сечений: первое 1-1 совпадает со свободной поверхностью жидкости в резервуаре, а второе 2-2 – со сжатым сечением (рисунок 6.2).

Для наиболее распространенного случая, когда давление на свободной поверхности жидкости в резервуаре равно атмосферному и истечение также происходит в атмосферу, то есть  $p_1 = p_2 = B$ , зависимость скорости истечения от напора  $H$  имеет вид:

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_0}} \cdot \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (6.1)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса;

$\zeta_0$  – коэффициент местного сопротивления отверстия;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Расход жидкости через отверстие:

$$Q = v_c \cdot S_c.$$

Заменим  $S_c$  произведением  $\varepsilon S_o$ , а  $v_c$  – ее значением из уравнения (6.1), тогда

$$Q = \varphi \varepsilon S_o \sqrt{2gH} = \mu S_o \sqrt{2gH}, \quad (6.2)$$

где  $\mu = \varphi \varepsilon$  – коэффициент расхода.

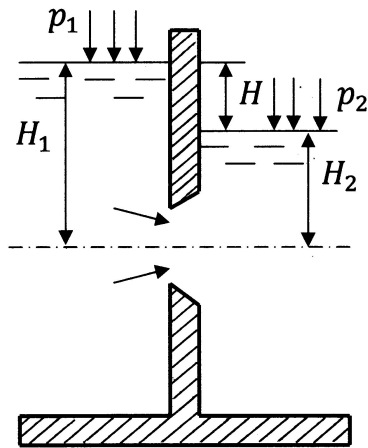


Рисунок 6.4 – Истечение  
жидкости под уровень

Если пространство, куда вытекает жидкость, заполнено жидкостью, то истечение происходит под уровень (истечение через затопленное отверстие) (рисунок 6.4).

Составляя уравнение Бернулли для тех же сечений, что и в предыдущем случае, получим такие же формулы для определения  $v_c$  и  $Q$ , как (6.1) и (6.2), но в них  $H = H_1 - H_2$ .

Расход жидкости при истечении из отверстия можно увеличить, если присоединить к нему короткую трубку, называемую *насадком*.

В технике применяют насадки различной формы: внешний (рисунок 6.5,а) и внутренний (рисунок 6.5,б) цилиндрические насадки; коноидальный (рисунок 6.5,в); конически сходящийся (рисунок 6.5,г) и конически расходящийся (рисунок 6.5,д).

Внешний цилиндрический насадок представляет собой цилиндрическую трубку длиной  $l = (3 \div 4) d$  (рисунок 6.5). Это наиболее простой в изготовлении и широко распространенный тип насадка.

При входе в насадок струя жидкости сжимается, как и при истечении через отверстие, а затем расширяется, заполняя все сечение насадка, то есть на выходе коэффициент сжатия струи  $\varepsilon = S/S_o = 1$ .

В промежутке между сжатой струей и стенками насадка, как и в местном сопротивлении при внезапном сужении потока, образуется вихревая зона с пониженным давлением (вакуумом), в результате чего усиливается подток жидкости из резервуара, и скорость движения жидкости в сжатом сечении увеличивается. Поэтому при одинаковом напоре расход жидкости через насадок будет больше, чем через отверстие.

Скорость истечения жидкости из насадка определяется как скорость в выходном сечении 2-2  $v$ .

Из уравнения Бернулли (3.3), записанного для сечений 1-1 и 2-2 ( $p_1 = p_2 = B$ ), можно получить зависимость скорости истечения от напора  $H$ , которая имеет вид:

Отсюда

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_n}} \cdot \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}.$$

Расход при истечении из насадка определяется как произведение скорости  $v$  на площадь выходного сечения  $S$ , то есть

$$Q = v \cdot S = \varphi \sqrt{2gH} \cdot S = \varphi \varepsilon S_o \sqrt{2gH} = \mu S_o \sqrt{2gH}.$$

Таким образом, скорость и расход при истечении из насадки рассчитываются по таким же формулам, что и из отверстия (см. формулы (6.1) и (6.2)). Отличие состоит лишь в величине коэффициентов скорости и расхода.

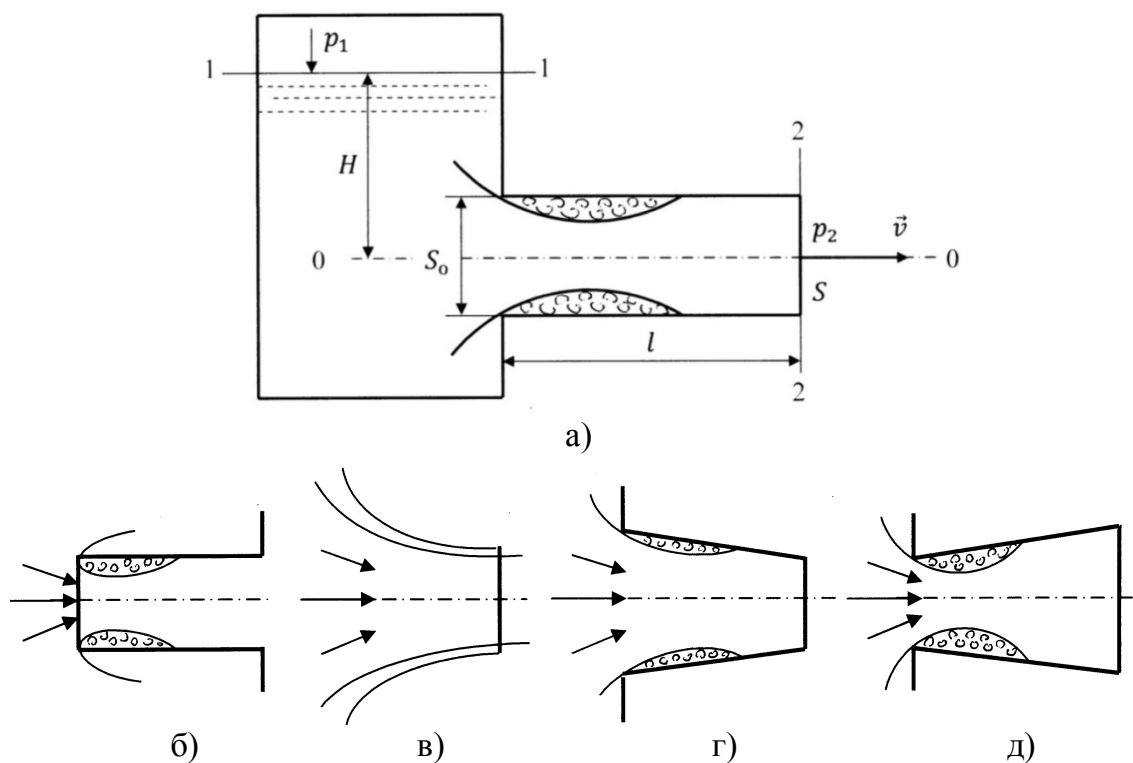


Рисунок 6.5 – Типы насадок:

- а) внешний цилиндрический насадок; б) внутренний цилиндрический насадок;  
в) коноидальный насадок; г) конически сходящийся насадок; д) конически расходящийся насадок

Значения коэффициентов  $\zeta$ ,  $\varphi$ ,  $\varepsilon$  и  $\mu$  для круглого отверстия и насадков различной формы приведены в таблице 6.1 [7].

Таблица 6.1 – Коэффициенты местного сопротивления  $\zeta$ , скорости  $\varphi$ , сжатия  $\varepsilon$ , и расхода  $\mu$  для отверстий и насадков различной формы

| Тип отверстия или насадка         | $\zeta$ | $\varphi$ | $\varepsilon$ | $\mu$ | Примечание                             |
|-----------------------------------|---------|-----------|---------------|-------|----------------------------------------|
| Круглое отверстие в тонкой стенке | 0,06    | 0,97      | 0,64          | 0,62  | При совершенном сжатии.                |
| Внешний цилиндрический насадок:   | 0,5     | 0,82      | 1             | 0,82  | При длине насадка $l = (3 \div 4) d$ . |
| Внутренний цилиндрический насадок | 1       | 0,71      | 1             | 0,71  |                                        |
| Коноидальный насадок              | 0,06    | 0,97      | 1             | 0,97  |                                        |
| Конически сходящийся насадок      | 0,09    | 0,96      | 0,98          | 0,94  | При угле конусности $13^\circ$ .       |
| Конически расходящийся насадок    | 3,5     | 0,45      | 1             | 0,45  | При угле конусности $8^\circ$ .        |

Данные таблицы 6.1 позволяют сделать вывод о применении насадков того или иного типа.

Местные потери в насадках больше, чем при истечении из отверстия, так как они складываются не только из потерь на вход в насадок, но и на внезапное расширение струи. Поэтому коэффициент скорости  $\varphi$ , а следовательно, и сама скорость истечения почти из всех насадков оказывается меньше, чем скорость истечения из отверстия. Однако из-за наличия вакуума в насадках расход имеет большее значение.

Внешний цилиндрический насадок следует применять тогда, когда ставится цель скорейшего опорожнения резервуара без необходимости большой скорости истечения (канистры и бачки для горючесмазочных и лако-красочных материалов и т.п.).

Внутренний цилиндрический насадок устанавливается в силу конструктивных причин. В нем поток изменяет свое направление на  $180^\circ$ , потеря напора получается больше, чем во внешнем цилиндрическом насадке, а следовательно, меньший расход истечения.

Цилиндрические внешние и внутренние насадки устанавливают в теле дамб для пропуска ливневой и талой воды и в теле плотин для водосброса или промывки осадков, скопившейся перед плотиной, а также используются в конструкции расходомеров.

Коноидальные и конически расходящиеся насадки (конфузоры) обеспечивают получение максимального расхода при большой скорости, дальности полета и силе удара вытекающей струи. Их используют в пожарных брандспойтах, гидромониторах, струйных аппаратах, входных элементах насосов и вентиляторов и др.

Конически расходящиеся насадки (диффузоры) используют для преобразования части кинетической энергии в потенциальную, когда необходимо уменьшить скорость выхода жидкости или увеличить давление (например, в струйных аппаратах, выходных элементах насосов и др.).

Истечение жидкости при переменном напоре является неустановившимся, так как опорожнение резервуара происходит при понижающемся напоре. Время полного опорожнения в таком случае примерно в два раза больше времени истечения такого же объема жидкости при постоянном напоре. Это связано с тем, что по мере снижения уровня жидкости условия истечения изменяются: при малом напоре возникает воронка, в которую прорывается воздух, и в конце опорожнения лишь отдельные струйки жидкости будут стекать через кромки отверстия.

Теоретически время опорожнения резервуара от уровня  $H_1$  до уровня  $H_2$  (см. рисунок 6.6) может быть определено по формуле:

$$\tau = \frac{2F}{\mu S_0 \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}),$$

где  $F$  – площадь горизонтального сечения резервуара,  $\text{м}^2$ .

Пользуясь этой зависимостью, можно определить величину коэффициента расхода  $\mu$ :

$$\mu = \frac{2F}{S_0 \tau \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}), \quad (6.3)$$

### 6.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 6.6 [8].

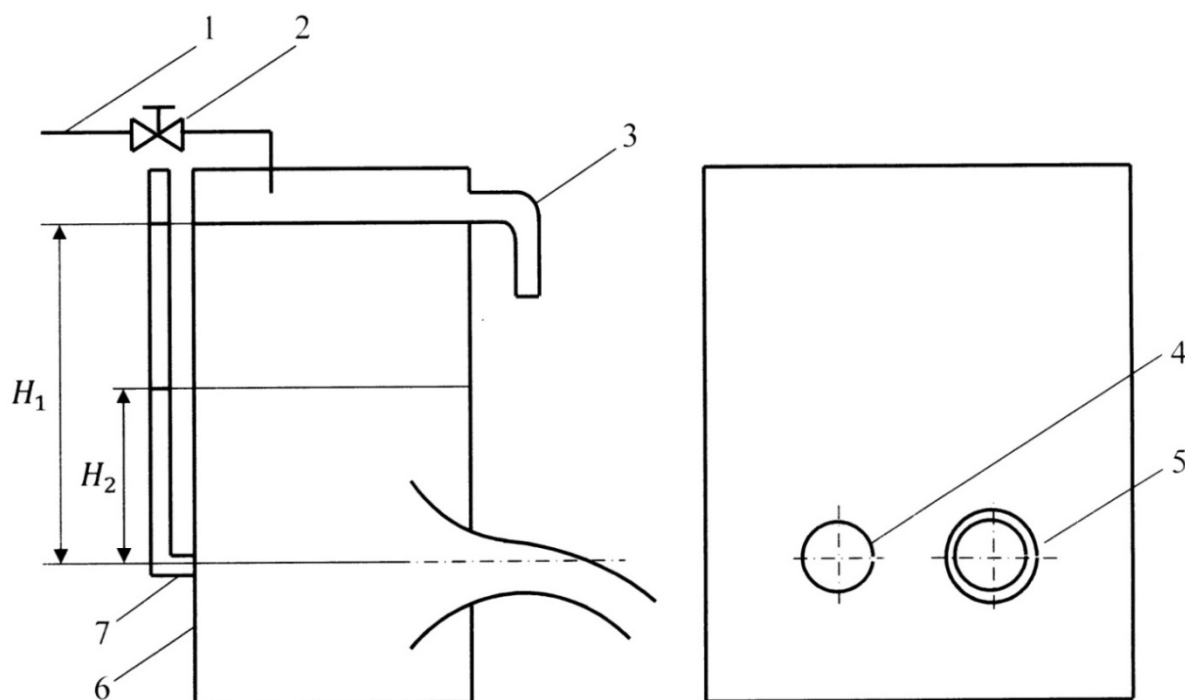


Рисунок 6.6 – Схема лабораторной установки:

1 – подводный трубопровод; 2 – вентиль; 3 – сливная труба;  
4 – отверстие; 5 – насадок; 6 – резервуар; 7 – водомерное стекло;  
диаметр отверстия 0,042 м; диаметр насадка 0,025 м

Установка состоит из вертикального резервуара 6 с водомерным стеклом 7 и сливной трубы 3. В передней стенке резервуара имеется отверстие 4 и насадок 5, которые могут работать раздельно. Вода в резервуар подается по подводному трубопроводу 1 с вентилем 2.

### 6.4. Порядок выполнения опытов

1. Проверить закрытия отверстия и насадка.
2. Наполнить резервуар 6 до уровня  $H_1$ .
3. Открыть отверстие.
4. Закрыть дно 6 мерной емкости 7.
5. Измерить по секундомеру время  $\tau$  опорожнения резервуара от уровня  $H_1$  до уровня  $H_2$ . Значения  $H_1$  и  $H_2$  могут быть выбраны произвольно.

6. При тех же значениях  $H_1$  и  $H_2$  определить время опорожнения резервуара через насадок.

7. Прodelать опыт несколько раз, выбирая различные значения  $H_1$  и  $H_2$ . Во время опыта необходимо обратить внимание на форму и толщину струй, вытекающих из отверстия и насадка.

8. Результаты замеров занести в таблицы 6.2 и 6.3.

Таблица 6.2 – Опытные данные и их обработка при истечении воды из отверстия

| № замера | $H_1$ ,<br>м | $H_2$ ,<br>м | $\tau$ ,<br>с | $\mu_{оп}$ | $\mu_p$ | $\varepsilon$ ,<br>% |
|----------|--------------|--------------|---------------|------------|---------|----------------------|
| 1        |              |              |               |            |         |                      |
| 2        |              |              |               |            |         |                      |
| 3        |              |              |               |            |         |                      |

Таблица 6.3 – Опытные данные и их обработка при истечении воды из насадка

| № замера | $H_1$ ,<br>м | $H_2$ ,<br>м | $\tau$ ,<br>с | $\mu_{оп}$ | $\mu_p$ | $\varepsilon$ ,<br>% |
|----------|--------------|--------------|---------------|------------|---------|----------------------|
| 1        |              |              |               |            |         |                      |
| 2        |              |              |               |            |         |                      |
| 3        |              |              |               |            |         |                      |

### 6.5. Обработка опытных данных

1. По формуле (6.3) определить величину коэффициента расхода  $\mu_{оп}$  для истечения из отверстия и насадка.

2. Сравнить величину  $\mu_{оп}$  с табличным значением  $\mu_p$  (см. таблицу 6.1).

3. Сопоставить опытное и расчетное значение  $\mu$  и определить относительную погрешность по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\mu_{оп} - \mu_p}{\mu_p}.$$

4. Результаты обработки опытных данных свести в таблицы 6.2 и 6.3.

## 6.6. Контрольные вопросы

1. Какая задача ставится при истечении из отверстий и насадков?
2. По каким признакам классифицируют отверстия?
3. Какие отверстия являются малыми?
4. Какая стенка является тонкой?
5. Что понимают под коэффициентом сжатия струи? От чего он зависит?
6. Какое сжатие является совершенным, несовершенным, неполным?
7. От чего зависит скорость истечения из отверстий и насадков?
8. Какое истечение является свободным, затопленным?
9. С какой целью к отверстию присоединяют насадки?
10. Какие различают насадки по форме? В каких случаях применяют тот или другой насадок?
11. Каково устройство установки для опытного определения коэффициентов расхода при истечении из отверстия и насадка?
10. Приведите последовательность проведения опытов по определению коэффициентов расхода при истечении из отверстия и насадка.

## **7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ**

Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать следующие пункты:

- название и цель работы;
- основные формулы и формулировки;
- схему лабораторной установки;
- заполненные таблицы замеров и обработки опытных данных;
- результаты расчетов и графики (при необходимости);
- вывод.

Отчеты о выполнении лабораторных работ выполняются на стандартных листах формата А4 на одной стороне листа в соответствии с ГОСТ 2.105-95 «Общие требования к текстовым документам» и должны содержать титульный лист (форма титульного листа отчета приведена в приложении В).

Отчеты должны быть выполнены аккуратно, графики – на миллиметровой бумаге в соответствии с требованиями ЕСКД и правилами черчения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тверская С.Е. Гидромеханика: учебное пособие / С.Е. Тверская, В.И. Истомин. – Севастополь: СевГУ, 2021. – 181 с.
2. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
3. Луговский В.В. Гидромеханика / В.В. Луговский. – Л.: Судостроение, 1990. – 192 с.
4. Константинов Ю.М. Гидравлика: Учеб. для вузов / Ю.М. Константинов. – К.: Вища шк., Головное изд-во, 1988. – 398 с.
5. Гейер В.Г. Гидравлика и гидропривод: Учеб. для вузов / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учеб. для вузов / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
7. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – К.: Вища шк., 1984. – 342 с.
8. Методические указания для выполнения лабораторных работ по курсу «Гидромеханика» / Разраб. В.В. Абрамская, Н.М. Стоянов. – Севастополь: СПИ, 1989. – 21 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Таблица А.1 – Соотношения между единицами давления

| Наименование внесистемной единицы давления                     | Обозначение (русское) единицы | Соотношение с единицей СИ | Соотношение с другими внесистемными единицами                                         |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Килограмм-сила на квадратный метр                              | кгс/м <sup>2</sup>            | 9,81 Па                   | 10 <sup>-4</sup> кгс/см <sup>2</sup>                                                  |
| Килограмм-сила на квадратный сантиметр (техническая атмосфера) | кгс/см <sup>2</sup> (ат)      | 9,81·10 <sup>4</sup> Па   | 10 <sup>4</sup> кгс/м <sup>2</sup><br>735,6 мм рт. ст.<br>10 <sup>4</sup> мм вод. ст. |
| Миллиметр ртутного столба (Торр)                               | мм. рт. ст. (Торр)            | 133,3 Па                  | 10 <sup>-3</sup> м рт. ст.<br>13,6 мм вод. ст.                                        |
| Миллиметр водяного столба                                      | мм. вод. ст.                  | 9,81 Па                   | 10 <sup>-3</sup> м вод. ст.                                                           |
| Бар                                                            | бар                           | 10 <sup>5</sup> Па        | 750 мм рт. ст.                                                                        |
| Физическая атмосфера                                           | атм                           | 101325 Па                 | 760 мм рт. ст.                                                                        |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Таблица Б.1 – Коэффициенты кинематической вязкости  $\nu$  воды

| Темпе-<br>ратура<br>воды,<br>°C | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | Темпе-<br>ратура<br>воды,<br>°C | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | Темпе-<br>ратура<br>воды,<br>°C | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | Темпе-<br>ратура<br>воды,<br>°C | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с |
|---------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| 0                               | 1,79                                    | 9                               | 1,35                                    | 18                              | 1,06                                    | 40                              | 0,66                                    |
| 1                               | 1,73                                    | 10                              | 1,31                                    | 19                              | 1,04                                    | 45                              | 0,60                                    |
| 2                               | 1,67                                    | 11                              | 1,27                                    | 20                              | 1,01                                    | 50                              | 0,56                                    |
| 3                               | 1,62                                    | 12                              | 1,24                                    | 22                              | 0,99                                    | 55                              | 0,51                                    |
| 4                               | 1,57                                    | 13                              | 1,21                                    | 24                              | 0,92                                    | 60                              | 0,48                                    |
| 5                               | 1,52                                    | 14                              | 1,18                                    | 26                              | 0,88                                    | 70                              | 0,41                                    |
| 6                               | 1,47                                    | 15                              | 1,15                                    | 28                              | 0,84                                    | 80                              | 0,37                                    |
| 7                               | 1,43                                    | 16                              | 1,12                                    | 30                              | 0,80                                    | 90                              | 0,33                                    |
| 8                               | 1,39                                    | 17                              | 1,09                                    | 35                              | 0,73                                    | 100                             | 0,28                                    |

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
(обязательное)  
**Форма титульного листа отчета о выполнении  
лабораторной работы**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Морской институт  
Кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений"

**ОТЧЕТ**  
о выполнении лабораторной работы №  
(название работы)

по дисциплине «Гидромеханика»

Выполнил: студент группы

\_\_\_\_\_  
(шифр группы)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Проверил: \_\_\_\_\_  
(должность, Ф.И.О. преподавателя)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

20 \_\_\_\_ г.

Учебное издание

**Тверская Светлана Евгеньевна**

## **ГИДРОМЕХАНИКА**

*Учебно-методическое пособие  
по проведению лабораторного практикума*

*В авторской редакции*

Изд. № 47/2022. Объем 4,5 п.л. Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 4,41.  
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»