



Белорусская государственная
орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени
сельскохозяйственная академия



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Кафедра гидротехнических сооружений и водоснабжения

Н. В. Васильева

РЫБОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ГИДРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ГИДРАВЛИКИ

*Методические указания по выполнению
лабораторных работ для студентов,
обучающихся специальности 6-05-0831-01
«Водные биоресурсы и аквакультура»*

Горки
БГСХА
2024





Белорусская государственная
орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени
сельскохозяйственная академия



УДК 626.88(072)
ББК 40.6я73
В19

*Рекомендовано методической комиссией
факультета биотехнологии и аквакультуры.
Протокол № 4 от 22 декабря 2023 г.*

Автор:
кандидат технических наук, доцент *Н. В. Васильева*

Рецензенты:
доктор сельскохозяйственных наук, профессор *В. И. Желязко*;
доктор сельскохозяйственных наук, доцент *Н. В. Барулин*

Васильева, Н. В. Технические средства аквакультуры:
В19 методические указания к лабораторным работам / Н. В. Васильева, – Горки
: БГСХА, 2024. – 110 с.

Изложены теоретические основы изучаемых процессов, дано описание лабораторных установок. Приведены необходимые таблицы для записи полученных результатов и основные зависимости их математической обработки.

Для студентов, обучающихся по специальности 6-05-0831-01 – Водные биоресурсы и аквакультура.

УДК 639.335:631.3 (072)
ББК 47.2 Я43

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2023





Введение

Республика Беларусь по запасам внутренних водных ресурсов является одной из богатейших стран Европы. На ее территории насчитывается более 10 тысяч озер (200 тыс. га), 130 водохранилищ (79,94 тыс. га), 90,6 тыс. километров рек, 17,0 тыс. километров мелиоративных каналов.

В настоящее время в нашей стране проводятся различные рыболовные мероприятия, направленные на увеличение рыбных запасов во внутренних водоемах.

Для выполнения задач, поставленных перед рыбной промышленностью, необходимо расширить и реконструировать действующие, а также ввести в строй новые прудовые хозяйства и рыбопитомники.

В связи с развитием рыбоводства и новых его отраслей роль специалистов в этой области приобретает еще большее значение. В рыбхозах работает много специалистов, которые должны знать типы, назначение, конструкции гидротехнических сооружений, применяемых в рыбном хозяйстве, правила эксплуатации этих сооружений, а также принимать активное участие в ремонте и реконструкции их.

Одной из важнейших задач высшей школы является повышение уровня самостоятельной работы студентов, направленной на развитие у них творческого мышления, ознакомление их с современными методами научных исследований. Важную роль в выполнении этой задачи имеют работы, проводимые студентами в лабораториях.

При выполнении лабораторных работ предусмотрено использование современных методик исследований и измерительной аппаратуры.

Исследования на физических моделях гидросооружений позволяют с достаточной достоверностью прогнозировать поведение будущего сооружения и явления, возникающие при его эксплуатации (например, размывы в нижнем бьефе, влияние фильтрационного потока, эффективность рыбопропускных и рыбозащитных сооружений и др.), находить при этом оптимальные технические решения.





Белорусская государственная
орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени
сельскохозяйственная академия



Данные методические указания разработаны в соответствии с действующими нормативными документами Республики Беларусь и программой курса «Рыбохозяйственная гидротехника с основами гидравлики» для специальности 6-05-0831-01 – Водные биоресурсы и аквакультура.





Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В НАТУРЕ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ УО «БГСХА»

Цель работы:

1. Ознакомиться с конструкцией гидроузла в натуре.
2. Составить эскизы.
3. Кратко описать назначение гидроузла и устройство отдельных сооружений.

Современное рыбководное хозяйство практически невозможно представить без гидротехнических сооружений. Целью настоящей работы является ознакомление студентов с конструкциями построенных гидротехнических сооружений в натуре. В качестве объекта принят верхний гидроузел академии на р. Копылке, состоящий из грунтовой плотины и водосбросного сооружения открытого типа с затворами.

В результате изучения этого гидроузла студенты должны ознакомиться с конструкцией грунтовой плотины и водосбросного сооружения, а также с их элементами и составить следующие эскизы с указанием основных размеров:

- 1) план гидроузла;
- 2) вид с верхнего бьефа;
- 3) поперечный разрез по грунтовой плотине.

Необходимо сделать краткое описание назначения гидроузла и устройства отдельных сооружений в журнале лабораторных работ.

Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ПЛОТИННЫХ ВОДОЗАБОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Цель работы:

1. Изучить основные гидравлические явления при эксплуатации боковых плотинных водозаборных гидроузлов.
2. Изучить работу фронтальных водозаборных гидроузлов.

2.1. Общие сведения

Плотинные водозаборные гидроузлы сооружают на реках в тех





случаях, когда бытовые уровни в них не достаточны для осуществления самотечной подачи воды потребителю. Существуют две основные группы плотинных водозаборных гидроузлов: *боковые* и *фронтальные*. Боковые водозаборы устраивают на прямолинейных участках рек при невысоких коэффициентах водозабора. Фронтальный водозабор создает благоприятные условия для поступления в канал осветленных поверхностных слоев воды.

2.2. Описание установки

На рабочей части русловой площадки участок русла заполняют сыпучим размываемым материалом. После завершения формирования русла, а также магистрального канала монтируют установку модели гидроузла. Модели гидроузла устанавливают таким образом, чтобы они имели одинаковые посадочные размеры и местоположение участков подвода и отвода воды. Русловая площадка оборудована шпиге масштабами, мерными водосливами, дозатором для подачи наносов. Характер движения поверхностных токов воды определяется по системе цветных нитей, закрепленных на тросе или проволоке, установленной у поверхности и у дна русла.

2.3. Порядок выполнения работы

1. На русловую площадку пускают необходимый расход воды. После его стабилизации на модели бокового водозабора изучают гидравлические условия его работы. С помощью цветных нитей и средств имитации наносов (проваренные опилки, молотый уголь, синтетические шарики малых размеров и т. д.) выявляют характер течения и транспортировки наносов в зоне сооружения. Делают необходимые зарисовки.
2. Заменяют модель на фронтальный водозабор и проводят те же наблюдения.
3. Делают основные выводы по итогам выполнения работы.
4. Выполняют схемы компоновки водозаборного узла с боковым водозабором и фронтальным, зарисовывая план течений и характер движения наносов.

В ходе выполнения работы необходимо определить:

- 1) расход водозабора и расход транзитного потока;





- 2) напор на пороге водозабора;
- 3) ширину захвата водозаборных поверхностных струй;
- 4) ширину захвата донных струй;
- 5) количество наносов, поступивших в отстойник-ловушку за установленное время

2.4. Обработка результатов исследований

Результаты измерений заносят в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Опытные данные и их обработка

а) боковой водозабор

| $H_{\text{вод}}$ | $H_{\text{гр}}$ | $Q_{\text{вод}}$ | $Q_{\text{гр}}$ | $\lambda_{\text{о}}$ | V | $V_{\text{захв}}$ | $\lambda_{\text{в}}$ | $h_{\text{вх}}$ | Примечание |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------|-----|-------------------|----------------------|-----------------|------------|
| | | | | | | | | | |

б) фронтальный водозабор

| $H_{\text{вод}}$ | $H_{\text{гр}}$ | $Q_{\text{вод}}$ | $Q_{\text{гр}}$ | $\lambda_{\text{о}}$ | V | $V_{\text{захв}}$ | $\lambda_{\text{в}}$ | $h_{\text{вх}}$ | Примечание |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------|-----|-------------------|----------------------|-----------------|------------|
| | | | | | | | | | |

Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ТИПОВ И КОНСТРУКЦИЙ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН И ДАМБ

Цель работы:

1. Изучить конструктивные особенности основных типов грунтовых плотин и дамб.
2. Выполнить поперечные разрезы основных типов плотин, дамб и дать их краткое описание.

Грунтовые плотины являются древнейшими гидротехническими сооружениями.

В настоящее время грунтовые плотины имеют самое широкое распространение во всех странах благодаря следующим преимуществам:

- 1) возведение их возможно в любых географических районах независимо от климатических и грунтовых условий;
- 2) для возведения грунтовых плотин пригодны практически все местные грунты;
- 3) грунтовые плотины могут быть любой высоты.

При изучении плотин из грунтовых материалов студенту следует знать:

- 1) типы грунтовых насыпных плотин;





- 2) конструкции поперечного профиля, его основные элементы и их назначение;
- 3) противодиффузионные грунтовые и негрунтовые устройства в теле грунтовых плотин (экраны, ядра, диафрагмы), их достоинства и недостатки;
- 4) противодиффузионные устройства в нескальных и скальных основаниях грунтовых плотин;
- 5) конструкции различных типов креплений верховых и низовых откосов грунтовых плотин, их назначение;
- 6) типы, конструкции и назначение дренажных устройств тела грунтовых плотин и их оснований.

Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТЕЛЕ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ

Цель работы:

1. Изучить на модели картину и закономерности движения фильтрационного потока, положения депрессионной кривой, фильтрационного расхода.
2. Сравнить полученные результаты с аналитическим решением.

4.1. Общие сведения

Знания условий и закономерностей движения грунтового потока необходимы при решении ряда вопросов расчета и проектирования грунтовых, бетонных и других видов гидротехнических сооружений. Фильтрация из верхнего бьефа в нижний происходит под воздействием напора, создаваемого плотиной, при этом тело плотины насыщается гравитационной водой до определенной поверхности, называемой *депрессионной*, в любой точке которой давление равно атмосферному. Линия пересечения поверхности грунтовых вод с поперечным профилем плотины называется *кривой депрессии*.

Фильтрационный поток, ограниченный сверху кривой депрессии, называется *безнапорным*.

Грунт, расположенный ниже депрессионной поверхности, нахо-





дится в водонасыщенном состоянии. Выше депрессионной поверхности расположена зона капиллярного поднятия воды, величина которой зависит от рода и плотности грунта. Выше этой зоны грунт имеет естественную влажность.

Устройство дренажа является одним из радикальных средств уменьшения водонасыщенной зоны и повышения устойчивости основания и откосов грунтовых плотин и дамб.

4.2. Описание установки

Исследования проводятся в застекленном лотке на модели земляной плотины из однородного грунта (среднезернистый песок) на водонепроницаемом основании (рис. 4.1). Одна модель плотины представлена без дренажа, другая с дренажем. Внутренний дренаж плотины изготовлен из латунной перфорированной трубки диаметром 12 мм. Приемная часть дренажа выполнена в виде обратного фильтра из одного слоя крупнозернистого песка. Для измерения положения депрессионной кривой в теле плотины устроены пьезометры диаметром 8 мм, которые соединены резиновыми трубками с дублирующими стеклянными пьезометрами, смонтированными на щите.

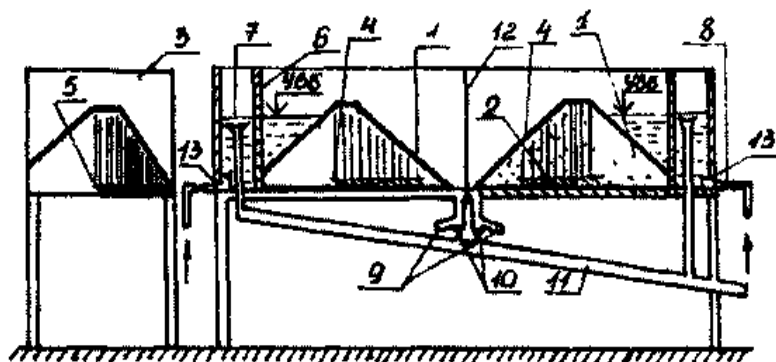


Рис. 4.1. Схема установки безнапорной фильтрации:

1 – модель грунтовой плотины; 2 – дренаж; 3 – щит пьезометров; 4 – пьезометры;
5 – дублирующие пьезометры; 6 – сетка; 7 – переливная воронка; 8 – вентиль
подачи воды; 9 – трубка для измерения фильтрационного расхода; 10 – вентиль
перекрытия воды; 11 – отводящая трубка; 12 – перегородка; 13 – фильтр

4.3. Порядок выполнения работы





1. Определение положения кривой депрессии в теле плотины производится по показаниям дублирующих пьезометров, смонтированных на выносном щите.

После того как в теле плотины будет наблюдаться установившийся фильтрационный режим, производят измерение координат депрессионной кривой по уровням, наблюдаемым в пьезометрах. Данные измерений заносят в табл. 4.1 и 4.2, по которым производится построение кривой депрессии. При этом показания пьезометров снимают отдельно для плотины с дренажем и без дренажа. В табл. 4.3 заносят результаты расчетов координат X и Y аналитической кривой депрессии.

2. На формате миллиметровки вычерчивают поперечные сечения плотин в масштабе 1:5 по данным измерений, приведенных в табл. 3.1. Затем по данным табл. 4.2 наносят положения пьезометров и их показания, согласно которым получают экспериментальную кривую депрессии.

Для определения фильтрационного расхода закрывают нижний вентиль и с помощью мерного цилиндра и секундомера вычисляют фильтрационный расход, проходящий через сливную трубку. Для исключения случайной ошибки замер производят не менее двух раз и берут среднее арифметическое:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}.$$

3. Коэффициент фильтрации грунта модели плотины находят по формуле

$$K = \frac{Q}{BT_{cp}I_{cp}},$$

где Q – фильтрационный расход модели;
 B – ширина лотка (длина модели плотины);

$T_{cp} = \frac{y_m + y_b}{2}$ – средняя высота линии депрессии над плоскостью сравнения (основанием плотины) между двумя произвольно взятыми пьезометрами. Рекомендуется выбирать пьезометры в средней части депрессионной кривой;

I_{cp} – средний пьезометрический уклон линии депрессии на том же участке.





Определение координат кривой депрессии и фильтрационного расхода аналитически

Для плотины без дренажа (рис. 4.2) порядок расчета следующий.

1. Определяют положение осей координат X и Y ; ось X располагают по линии подошвы плотины в сторону нижнего бьефа, ось Y – на расстоянии λH от точки уреза воды, где λ – величина, зависящая от коэффициента откоса m , определяется по формуле Г. М. Михайлова:

$$\lambda = \frac{m}{1 + 2m},$$

здесь H – глубина воды в нижнем бьефе.

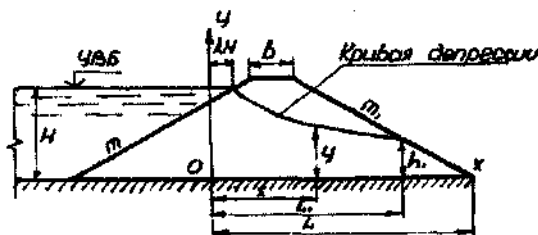


Рис. 4.2. Схема к расчету фильтрации для плотины без дренажа

2. Определяют высоту точки выхода депрессионной кривой на низовом откосе h по следующей зависимости:

$$h = \frac{L}{m} - \sqrt{\left(\frac{L}{m}\right)^2 - H^2},$$

где L – расстояние от оси Y до конца низового откоса;
 m – коэффициент верхового откоса.

3. Ординаты кривой депрессии рассчитывают по уравнению, произвольно задавая значениями абсцисс X :

$$y^2 = H^2 - \frac{H^2 - h^2}{L_1} X,$$





где L_1 – расчетное расстояние от оси Y до точки выхода кривой депрессии на низовом откосе.

Координаты X и Y заносят в табл. 3.3, по которым строят аналитическую кривую депрессии на том же поперечном профиле плотины, где построена экспериментальная кривая.

4. Фильтрационный расход вычисляют по формуле

$$q = K \frac{H^2 - h^2}{2L_1},$$

где q – удельный фильтрационный расход;

K – коэффициент фильтрации грунта тела плотины, определенный экспериментальным методом.

Для плотины с трубчатым дренажем расчетная схема приведена на рис. 4.3.

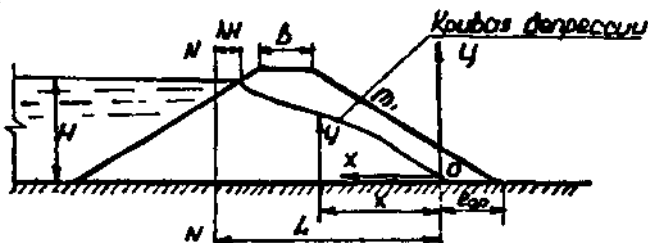


Рис. 4.3. Схема к расчету фильтрации для плотины с трубчатым дренажем

Так как в модели устроен трубчатый дренаж, то начало координат располагают в центре дренажной трубы, и кривая депрессии строится по формуле

$$y^2 = \frac{H^2}{L} X,$$

где L – расстояние от начала координат до раздельного сечения MN , которое располагается на расстоянии λH .

Удельный расход фильтрации определяют по формуле

$$q = K \frac{H^2}{2L}.$$

Координаты X и Y заносят в табл. 3.3, по которым строят аналитическую кривую депрессии на поперечном профиле плотины.





4.4. Обработка результатов исследований

Данные измерений параметров плотины и фильтрационного расхода заносят в табл. 4.1. Данные измерения координат кривой депрессии по уровням воды, наблюдаемым в пьезометрах, заносят в табл. 4.2. В табл. 4.3 заносят результаты расчетов координат X и Y аналитической кривой депрессии. По данным измерений табл. 4.2 строят экспериментальную кривую депрессии.

Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОД ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ НА МОДЕЛЯХ

Цель работы:

1. Ознакомиться на моделях с основными элементами флютбета (понур, водобой, рисберма).
2. Определить давление фильтрационного потока на подошву флютбета, расход фильтрации.

5.1. Общие сведения

Гидротехническое сооружение, создающее разность уровней верхнего и нижнего бьефов и расположенное на водопроницаемом грунте основания, всегда вызывает движение грунтового потока под флютбетом сооружения и в обход его под влиянием этой разности.

Флютбет – это совокупность частей сооружения, сверху которых протекает вода. Составными частями флютбета являются понур, водобой и рисберма.

Флютбет сооружения служит для двух целей: безопасного пропуска поверхностного потока из верхнего бьефа в нижний и гашения напора фильтрационного потока на подошву сооружения. Если флютбет сооружения практически водонепроницаем (бетон, железобетон, камень), а грунт основания представляет собой легко проницаемую для воды массу, то фунтовой поток не имеет свободной поверхности и является напорным. Напорное движение грунтовых вод под флютбетом сооружения наблюдается тогда, когда уровень грунтовых вод в районе сооружения стоит





выше подошвы флютбета.

Такое высокое стояние фунтовых вод относительно флютбета наблюдается преимущественно под водозаборными сооружениями, бетонными плотинами, головными регуляторами ветвей и глубоко заложенных распределителей оросительных систем, под осушительными сооружениями.

5.2. Описание установки

Работа проводится в застекленной лотке. По длине лоток разделен на две части: в одной установлена модель бесшпунтового флютбета, в другой – одношпунтового флютбета (рис. 5.1).

Основание сооружений выполнено из среднезернистого равномерно утрамбованного песка. Флютбет сооружений выполнен из водонепроницаемого материала, шпунт – из оцинкованного железа, а затворы – из органического стекла.

Для измерения давления фильтрационного потока в дне лотка под подошвой флютбета установлены пьезометры из латунных трубок $d = 8,0$ мм, соединенных посредством резиновых трубок со стеклянными пьезометрами. Концы пьезометров находятся на уровне подошвы флютбета, а их количество и расстояние между ними указаны на щите пьезометров.

Для поддержания постоянного напора в верхнем бьефе установлена переливная воронка 7. Чтобы избежать быстрой кольматации грунта в верхнем бьефе мельчайшими частицами, выпадающими в спокойной воде, последняя подается через специальный фильтр 14. Фильтр представляет собой металлический стакан с отверстиями, заполненный песчано-гравелистой смесью. Загрязненную смесь периодически промывают и используют снова.



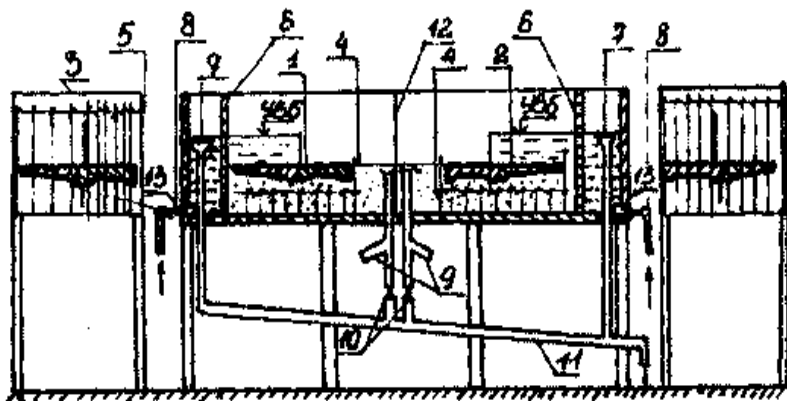


Рис. 5.1. Схема фильтрационной установки напорной фильтрации: 1 – модель бесплунтового флотбета; 2 – модель одношпунтового флотбета, 3 – щит пьезометров, 4 – пьезометры; 5 – дублирующие пьезометры; 6 – сетка; 7 – переливная воронка; 8 – вентиль подачи воды, 9 – отводящая трубка для измерения фильтрационного расхода, 10 – вентиль для измерения фильтрационного расхода; 11 – отводящая труба; 12 – перегородка, 13 – фильтр

Фильтрационный расход замеряют через трубку 9 путем закрытия вентиля 10. Для замера фильтрационного расхода необходимо иметь мензурку и секундомер.

5.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомившись с лабораторной установкой, вычисляют размеры флотбетов и снимают показания пьезометров. Данные измерений заносят в табл. 5.1 и 5.2.
2. Определяют величину фильтрационного расхода Q объемным способом. Для этого мерным сосудом измеряют объем воды W (см^3), профильтровавшейся за время t (с). Объем воды берут не менее 1000 см^3 , при этом время измерения t должно быть не менее 120 с. Для исключения случайной ошибки замер производят не менее двух раз и данные измерений заносят в табл. 4.3.
3. На формате миллиметровки вычерчивают флотбеты в масштабе 1 : 5 по данным табл. 5.1 (рис. 5.2).



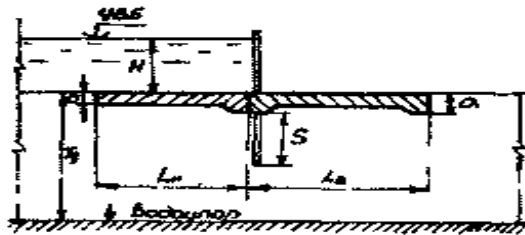


Рис. 5.2. Схема одношпунтового флютбета

4. По данным табл. 5.2 на чертежи флютбетов наносят положения и показания пьезометров. Плавно соединив показания пьезометров, получают пьезометрические линии напорной фильтрации. Площадь между пьезометрической линией и линией подземного контура флютбета называется *эпюрой противодействия на подошву флютбета*. В зависимости от положения отметки уровня воды в нижнем бьефе эпюра противодействия делится на две части. Площадь эпюры между пьезометрической линией и линией на отметке уровня воды в нижнем бьефе выражает фильтрационное давление на подошву флютбета. Оставшаяся часть эпюры противодействия выражает взвешивающее давление (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Эпюра противодействия напорной фильтрации на подошву флютбета





5. Определяют коэффициент фильтрации грунта основания:

$$k = \frac{Q}{TBJ_{cp}},$$

где T – глубина водопроницаемого слоя основания, см;

B – ширина фильтрационного лотка, см;

$J_{cp} = \frac{P_n + P_{n+2}}{L_{n-(n+2)}}$ – уклон пьезометрической линии между двумя

пьезометрами P_n и P_{n+2} , а $L_{n-(n+2)}$ – расстояние между пьезометрами, см.

Показания пьезометров рекомендуется брать в средней части водобоя, где пьезометрическая линия ближе к прямой.

5.4. Обработка результатов исследований

Данные определения размеров флютбета заносят в табл. 5.1 и 5.2. Данные по определению величины фильтрационного расхода заносят в табл. 5.3.

Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРУБЧАТОГО РЕГУЛЯТОРА

Цель работы:

1. Ознакомиться на модели с конструктивными элементами трубчатого регулятора.
2. Изучить режимы течения потока.
3. Определить пропускную способность сооружения при различных режимах в лотке на модели и по существующим зависимостям.
4. Сравнить результаты исследований.

6.1. Общие сведения

Трубчатые регуляторы широко применяются на гидромелиоративных системах в качестве регуляторов, переездов, совмещенных с регуляторами и сопрягающими сооружениями, водомеров-регуляторов и др. Этот тип сооружений не рекомендуется на каналах в тех случаях, когда минимальный расход в трубе проходит





с заиляющими скоростями. Трубы бывают круглого, прямоугольного и более сложного очертания.

Трубчатые регуляторы могут быть разделены на три основные части: входная, водопроводящая (в виде трубы), выходная. Затвор располагается, как правило, на входе.

Участок подхода входной части предназначен для обеспечения организованного подвода воды к оголовку.

Выходная часть предназначена для осуществления сброса потока в нижний бьеф и гашения избыточной кинетической энергии.

Гидравлический режим в трубчатых регуляторах определяется действующими в этот момент граничными условиями (местоположением уровней бьефов, геометрическими параметрами водовода и т.п.). Различают три основных режима: безнапорный, напорный и полунанпорный. Отдельные режимы могут устойчиво существовать в широком диапазоне изменения граничных условий. К этим режимам в первую очередь относятся безнапорный и напорный. Условия существования режимов:

безнапорный

$$H_1 < h_{тр}(d_{тр}),$$

$$h_6 < h_{тр}(d_{тр}),$$

напорный

$$H_1 > 1,2h_{тр}(d_{тр}),$$

$$h_6 > h_{тр}(d_{тр}),$$

где H_1 – глубина воды в верхнем бьефе, м;

h_6 – глубина воды в нижнем бьефе, м;

$h_{тр}$ – высота трубы, м;

$d_{тр}$ – диаметр трубы, м.

Полунанпорный режим существует в относительно узком диапазоне изменения граничных условий:

$$h_{тр}(d_{тр}) < H_1 < 1,2h_{тр}(d_{тр}),$$

$$h_6 < h_{тр}(d_{тр}).$$

При затопленном входном сечении трубы и свободном выходном сечении в сооружениях мелиоративных систем его применять не рекомендуется, а избегать как переходного, когда от напорного он периодически переходит в безнапорный. Следует отметить, что регулирующие сооружения на каналах мелиоративных систем работают практически во всех режимах, так как расходы и глубины в каналах в процессе эксплуатации изменяются в больших пределах.





6.2. Описание установки

Схема модельной установки трубчатого регулятора показана на рис. 6.1.

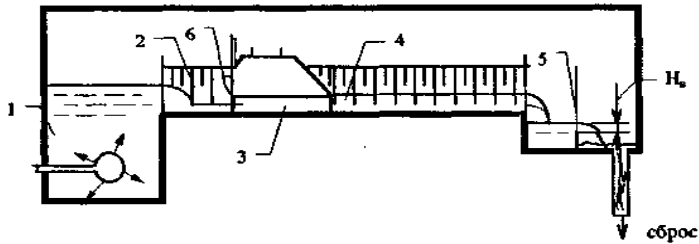


Рис. 6.1. Схема модельной установки:
1 – напорный резервуар, 2 – входная часть регулятора; 3 – транзитная часть;
4 – выходная часть регулятора, 5 – треугольный водослив; 6 – затвор.

Установка состоит из напорного бассейна 1, входной части регулятора 2, транзитной части 3, выходной части регулятора 4, выходной части лотка, оснащенной треугольным водосливом с тонкой стенкой для измерения проходящего расхода 5.

Входная часть представляет собой канал с закрепленными откосами.

Транзитная часть представляет собой трубу прямоугольного сечения, выполненную из жести. В начале трубы установлен затвор коробчатого типа б.

Выходная часть представляет собой облицованный канал.

6.3. Порядок выполнения работы

1. Студенты знакомятся с моделью, измеряют и записывают основные размеры:

$b_{\text{тр}}$ – ширина трубы, м;

$h_{\text{тр}}$ – высота трубы, м;

$l_{\text{тр}}$ – длина трубы, м.

С помощью шпигельмасштаба определить:

Δ_0 – отметку порога водослива;

Δ_4 – отметку дна трубы;

Δ_5 – отметку дна в верхнем бьефе;

Δ_6 – отметку дна в нижнем бьефе.





Результаты измерений заносят в табл. 6.1.

2. Подается вода в лоток. Устанавливают с помощью регулятора расхода безнапорный режим течения на водопроводящем тракте трубчатого сооружения, когда по всей длине сооружения наблюдается свободная поверхность потока.

С помощью шпигенмасштаба определить:

Δ_1 – отметку уровня воды на мерном водосливе;

Δ_2 – отметку уровня воды в верхнем бьефе;

Δ_3 – отметку уровня воды в нижнем бьефе.

Таблица 6.1. Данные лабораторных исследований

| Режим | $b_{т}, м$ | $h_{т}, м$ | $l_{т}, м$ | Δ_0 | Δ_1 | Δ_2 |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Безнапорный | | | | | | |
| Полунапорный | | | | | | |
| Напорный | | | | | | |

Окончание табл. 6.1

| Режим | Δ_3 | Δ_4 | Δ_5 | Δ_6 | $h_{в}, м$ | $Q_{пр}, л/с$ | $Q_{расч}, л/с$ |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Безнапорный | | | | | | | |
| Полунапорный | | | | | | | |
| Напорный | | | | | | | |

Определить глубину воды в трубе $h_{вр}$.

3. Устанавливают полунапорный режим движения воды в трубе-регуляторе, при этом входной оголовок находится в затопленном состоянии, а в трубе наблюдается свободная поверхность потока.

Определить отметки $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

4. Устанавливают напорный режим движения воды в трубе, при этом входной и выходной оголовки находятся в затопленном состоянии, свободная поверхность потока отсутствует, давление на потолке трубы больше атмосферного.

Определить отметки $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

Результаты измерений по п. 2 – 4 заносят в табл. 6.1.

5. Для расчетных режимов расходы воды, проходящие в трубе, вычисляют по формуле истечения через водослив с тонкой стенкой (формула Томсона) для треугольного водослива с углом $\alpha = 90^\circ$:

$$Q = 1,4H_b^2,$$





где H_v – напор над ребром водослива, м; $H_v = \Delta_1 - \Delta_0$.

6.4. Обработка результатов исследований

Пропускная способность закрытых водопропускных сооружений определяется известными из гидравлики методами в зависимости от режима их работы на основании опытных данных.

Безнапорный режим. Расчетная схема приведена на рис. 6.2.

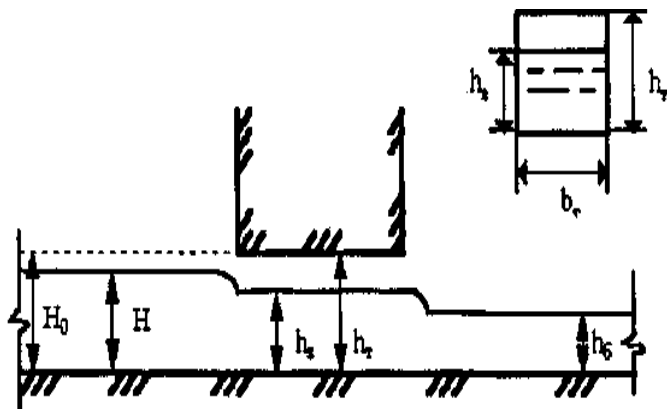


Рис. 6.2. Расчетная схема при безнапорном режиме

Пропускная способность трубы

$$Q = \varepsilon \varphi b_{\text{тр}} h_v \sqrt{2g(H_0 - h_v)}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где ε – коэффициент бокового сжатия, $\varepsilon = 0,9$;

φ – коэффициент скорости, $\varphi = 0,95$;

$b_{\text{тр}}$ – ширина трубы, м;

h_v – глубина воды в трубе, м;

H_0 – расчетный напор над порогом входного оголовка с учетом скорости подхода, м.

Полунапорный режим. Расчетная схема приведена на рис. 6.3.



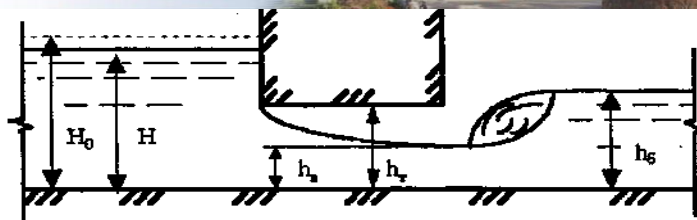


Рис. 6.3. Расчетная схема при полунапорном режиме

Пропускная способность трубы

$$Q = \varepsilon \varphi b_{\text{тр}} \alpha h_{\text{тр}} \sqrt{2g(H_0 - \alpha h_{\text{тр}})}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где $h_{\text{тр}}$ – высота трубы, м;

H_0 – расчетный напор над порогом входного оголовка, м;

α – коэффициент вертикального сжатия, $\alpha = 0,62 - 0,64$ или

$$\alpha = 0,614 + 0,2 \ln \left(1 + \left(\frac{h_{\text{тр}}}{H_0} \right)^{2,5} \right).$$

Напорный режим. Расчетная схема приведена на рис. 6.4. Коэффициенты скорости и бокового сжатия для данной опытной установки получены экспериментально.

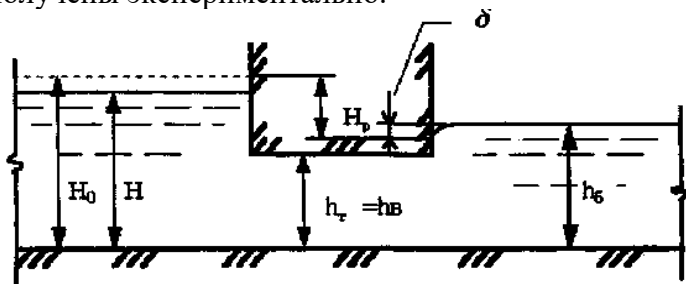


Рис. 6.4. Расчетная схема при напорном режиме

Пропускная способность трубы

$$Q = \mu w \sqrt{2gH_p}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где μ – коэффициент расхода;

w – площадь живого сечения потока в трубе, м^2 ;





$$w = b_{гр}h_b = b_{гр}h_{тр} ,$$

H_p – действующий напор, м;

$$H_p = H - h_6 ,$$

где H – глубина воды в верхнем бьефе, м;

h_6 – глубина воды в нижнем бьефе, м.

Лабораторная работа № 7. ИЗУЧЕНИЕ БЕСПЛОТИННОГО ВОДОЗАБОРНОГО ГИДРОУЗЛА

Цель работы:

1. Изучить конструктивные и гидравлические особенности бесплотинных водозаборов.
2. Изучить план или картину течения потока вблизи водозабора.
3. Измерить характерные гидравлические параметры потока на водозаборном участке при работе различных струенаправляющих устройств.
4. Оценить влияние взаимного расположения направляющих шпор, водозаборной камеры (кармана) и водоприемника на величину захвата донных наносов, на водоприемную способность водозабора.

7.1. Общие сведения о водозаборах

Бесплотинным водозаборным гидроузлом называют комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающий забор воды из открытого незарегулированного водоисточника.

В состав водозаборного гидроузла могут входить различные типы сооружений и устройств: водоподводящий канал, водозаборное сооружение, отстойник, струенаправляющие устройства и т.п.

Для улучшения работы водозабора применяют различные конструктивные и инженерные устройства: донные пороги, струенаправляющие и водоподпорные шпоры, карманы или камеры и др.

Направляющую шпору располагают на противоположном от водозабора берегу реки под углом $140 - 145^\circ$ к направлению течения потока (рис. 7.1,б). Высота шпоры у корня – $0,7H_p$ (где H_p





– наполнение устойчивого русла при $Q_{10\%}$). Для наиболее эффективной работы водозабора оголовки шпору устанавливают на расстоянии $\ell_{\text{пр}}$ выше по течению от входного порога регулятора. При этом наиболее рациональное значение этого параметра предлагается определять по формуле, полученной профессором В. М. Ларьковым путем обработки опытных данных:

$$\ell_{\text{пр}} = 0,36 \frac{\beta^2 Q^{0,4}}{1 + \beta i^{0,285}},$$

где $\beta = V/h$ – коэффициент формы русла;

V и h – ширина и глубина потока;

Q – руслоформирующий расход;

i – уклон русла.

Шпору изготавливают из дерева. В процессе опыта ее размещают на различных расстояниях от входного отверстия регулирующего сооружения водозабора.

Донный порог. В меженный период при расходах $(0,2 - 0,5) Q_{10\%}$ летне-весеннего паводка борьбу с наносами ведут с помощью донного порога. Местоположение порога на модели меняют 2–3 раза, располагая его вблизи входного порога. Высоту порога назначают $P_{\text{пор}} = (0,7 - 0,8) H_{\text{п}}$ в начальной части и $(0,6 - 0,5) H_{\text{п}}$ в конце (где $H_{\text{п}}$ – глубина потока в подводящем русле при расчетном расходе водозаборного сооружения). Порог модели изготавливают из оргстекла.

Водоподпорная шпора. Для повышения расхода путем увеличения подпора на пороге водозабора применяют водоподпорную шпору, которую устанавливают за входным оголовком (ниже по течению) водозабора.

Для этих же целей используют так называемый карман, который состоит из продольной и поперечной дамбы.

Шпора и водозаборный карман трансформируют транзитный поток воды перед входным порогом, направляя верхние осветленные струи в водозабор, а донные, влекущие наносы, – вниз по течению.

6.2. Описание установки

Работа выполняется в русловом лотке. Русло водотока проложено





в песчаном грунте.

Модель водозабора представляет собой трубчатое водорегулирующее сооружение. Водоприемная часть водозабора выполнена по типу открытого раструбного оголовка; водоотводящая часть водозабора изготовлена в виде закрытого (трубчатого) водовода. Забор воды происходит из питающего магистрального канала водохозяйственной системы (рис. 6.1).

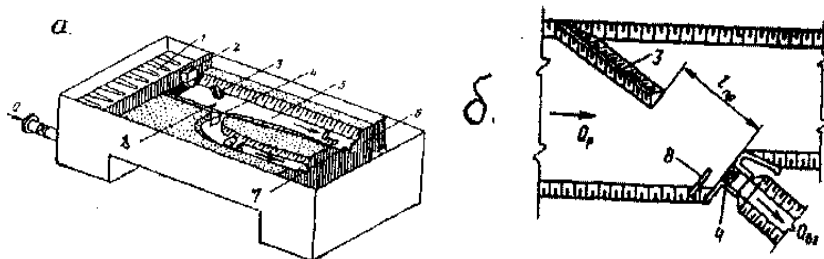


Рис. 6.1. Схема лабораторной установки:
a – общий вид; *б* – схема расположения шпоры и донного порога;
1 – успокоитель; *2* – дозатор; *3* – направляющая шпора; *4* – регулятор
водозабора; *5* – русло реки; *6* – приемный колодец; *7* – мерные
водосливы; *8* – донный порог.

Для измерения расхода воды водозабора используются мерные водосливы. Уровни и глубины воды измеряются шпитценмаштабом, параметры русла и водотока – мерной линейкой.

Для измерения количества наносов, поступающих в водозабор, используется отстойник-ловушка, установленный за выходным оголовком водозаборного сооружения или на выходе наносоприемного колодца.

Для определения ширины захвата поверхностных и донных струй руслового потока водоприемной частью используется система цветных нитей, закрепленных на тросе или проволоке, натянутой у поверхности и у дна русла.

6.3. Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы грунт на русловой части рабочей площадки замачивают, рыхлят, а затем выравнивают, соблюдая определенный уклон дна. На поверхности грунта формируют участок речного русла, имеющего заданную форму поперечного сечения.





2. Составляют эскиз модели.
3. Измеряют параметры русла (m ; v ; B ; i ; h) и отметку уровня воды в канале перед водозабором (отметка УВ).
4. Измеряют параметры и отметку порога водозабора: ширину входа $B_{\text{вод}}$; диаметр трубы d ; отметку порога водозабора $\nabla \text{ПВ}$.
5. Фиксируют в процессе проведения опытов положение шпоры, донного порога, камеры.
6. Определяют отметку порога мерного водослива для транзитного потока $\nabla \text{ПМ}_{\text{транз.}}$ и отметку порога мерного водослива для расхода водозабора $\nabla \text{ПМ}_{\text{вод}}$.
7. Наполняют водой магистральный канал, плавно открывая задвижку.
8. После замачивания русла устанавливают и пропускают расход, составляющий $0,5Q_{\text{max}}$. При этом расходе по расположению цветных нитей фиксируют ширину поверхностных и донных струй перед водозабором. Опыты проводят для 2–3 положений (перемещений) шпоры и донного порога. Результаты заносят в журнал наблюдений. По результатам измерений устанавливают наиболее эффективное положение струнаправляющих устройств. Такие же опыты выполняют с заборной камерой или карманом.
9. Для проверки и оценки работоспособности и эффективности исследованных устройств при других гидравлических режимах увеличивают расход до Q_{max} , после чего проводят опыты аналогично п. 8.
10. При проведении опытов измеряют отметки уровней воды в магистральном канале $\nabla \text{МК}$; перед входом в водозабор $\nabla \text{УВ}$; отметки порога мерных водосливов $\nabla \text{ПМ}_{\text{транз.}}$ и $\nabla \text{ПМ}_{\text{вод}}$; отметку порога водозабора $\nabla \text{ПВ}$. Затем вычисляют характерные напоры на пороге водосливов и водозабора по следующим формулам:
$$\Delta H_{\text{транз.}} = \nabla \text{МК} - \nabla \text{ПМ}_{\text{транз.}}$$
$$\Delta H_{\text{вод}} = \nabla \text{МК} - \nabla \text{ПМ}_{\text{вод}}$$
$$\Delta H_{\text{вх.вод}} = \nabla \text{УВ} - \nabla \text{ПВ}.$$
11. Измеряют ширину захвата $B_{\text{зах.пов}}$ поверхностных и ширину захвата $B_{\text{зах.дон}}$ донных струй, которые характеризуют эффективность работы водозабора.
12. По тарировочному графику определяют $Q_{\text{тр}}$ и $Q_{\text{вод}}$. Результаты измерений заносят в табл. 6.1.





6.4. Обработка результатов исследований

Отчетный материал оформляется в виде пояснительной записки, в которой отражаются содержание и цель работы, прилагаются схемы (эскизы), дается описание и техническая характеристика по каждому типу водозабора. Приводятся результаты наблюдений, на основании которых делаются выводы. Особое внимание при оценке эффективности уделяется показателям: относительной величине расхода водозабора

$$\lambda_Q = Q_{\text{вод}}/Q_{\text{тр}};$$

относительной ширине захвата поверхностных струй

$$\lambda_{\text{в}} = B_{\text{пов}}/B_{\text{дон}}.$$

Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Цель работы:

1. Ознакомиться с устройством водосливной плотины, ее конструктивными элементами, с режимом ее эксплуатации как многопролетного сооружения.
2. Определить основные геометрические параметры, а также гидравлические характеристики сооружения: скоростной коэффициент φ , коэффициент расхода водослива m , координаты свободной поверхности потока x , y , коэффициент подтопления водослива $\sigma_{\text{п}}$.

8.1. Общие сведения

Водосливными называют *плотины*, которые осуществляют сброс воды через поверхностные водосливные отверстия. Водосливные плотины используют в составе речного гидроузла для сброса из пруда в нижний бьеф неаккумулируемых паводковых вод. Одним из наиболее распространенных типов водосливных плотин являются бетонные, как наиболее простые по конструкции. Отличительной особенностью водосливных плотин является геометри-





ческая форма, в основу которой положен рациональный треугольный профиль с наклонными гранями.

8.2. Описание установки

Исследования выполняются на модели трехпролетной водосливной плотины безвакуумного практического профиля (рис. 8.1), установленной в гидравлическом горизонтальном лотке.

Модель плотины высотой $P = 36$ см изготовлена из оцинкованного листового железа. Сливная грань выполнена по координатам Кригера –Офицера при профилирующем напоре над гребнем водослива $H_{\text{проф}} = 10$ см; длина горизонтальной вставки $C = 0$. Водосливный фронт плотины разделен на три пролета бычками и боковыми стенками из оргстекла, в которых устроены пазы для плоских затворов. Сливная грань модели оборудована пьезометрами, которые используются для измерения осредненного давления воды на сливной поверхности и глубины сбросного потока от гребня плотины до водобоя. Первый пьезометр установлен в начале криволинейного профиля с координатой $X = 0$, второй – в точке с координатой $Y = 0$ (на гребне водослива), последний – в конце сопрягающей радиальной вставки плотины.

Для измерения уровней воды в верхнем и нижнем бьефах используются пьезометры и мерная игла. Координаты пьезометров по горизонтали определяются по мерной горизонтальной рейке, закрепленной на лотке, и визирному указателю, установленному на каретке шпиценмасштаба. При этом высотное положение пьезометров (ордината «у») контролируется по начальному показанию запрошенных пьезометров (без напора воды в ВБ).

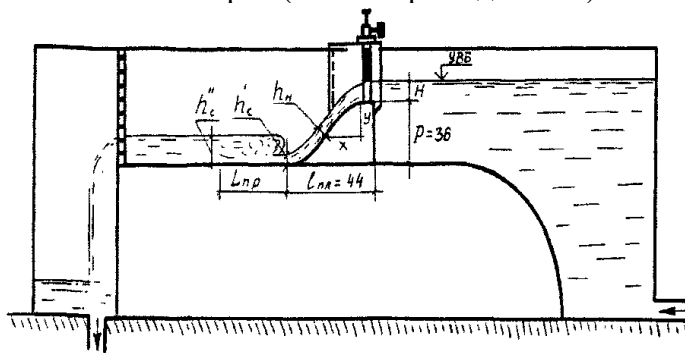


Рис. 8.1. Схема лабораторной установки





8.3. Порядок выполнения работы

Опыты по определению скоростного коэффициента, коэффициента бокового сжатия и координат свободной поверхности сбросного потока проводятся при отогнанном гидравлическом прыжке, при напоре на пороге $H \cong 1$ дм, при установившемся расходе $Q = \text{const}$.

До начала опытов измеряют основные параметры модели и составляют эскиз плотины. Координаты сливной грани и установленных на ней устьев пьезометров определяются: по горизонтали – относительно вертикальной напорной грани плотины с использованием мерной горизонтальной рейки и передвижного штатива (шпиценмасштаба); по вертикали – относительно отметки гребня водослива по показаниям дублирующих пьезометров, установленных на отдельном пьезометрическом щите.

Дальнейшие исследования проводят в такой последовательности. Постепенно открывают задвижку на питающей линии до подъема уровня воды в верхнем бьефе, при котором напор перед водосливом достигнет $H_{\text{проф}} = 10$ см. Эту глубину фиксируют по разности уровней воды в пьезометрах, установленных в верхнем бьефе (ПВБ) и на гребне водослива (П.1). После стабилизации режима измеряют координаты свободной поверхности струи при помощи мерной иглы и по показаниям пьезометров. Рабочие створы (сечения) и точки для измерения свободной поверхности потока выбирают в местах установки пьезометров.

Расход воды через плотину вычисляют с помощью мерного водослива, оборудованного шпиценмасштабом и тарировочной кривой.

Для оценки пропускной способности водосливной плотины, т.е. при определении коэффициента расхода при других напорах над гребнем, отличных от $H_{\text{проф}}$, проводят аналогичные измерения при $H < H_{\text{пр}}$ и $H > H_{\text{пр}}$.

Для определения коэффициента подтопления водослива поднимают уровень воды в НБ до глубины: $h \cong P$; $h \cong 1,1 P$; $h \cong 1,2 P$. При этом для каждого такого случая измеряют также напор над порогом водослива H .

Результаты измерений заносят в табл. 8.1 и 8.2.





8.4. Обработка результатов исследований

При обработке опытных данных и определении гидравлических характеристик сооружения используют формулу пропускной способности водослива:

$$Q = \varepsilon \sigma_{\text{п}} m B \sqrt{2g} H_0^{3/2}.$$

Обработку опытных данных рекомендуется осуществлять в следующей последовательности. Строится график $\sigma_{\text{п}} = m_{\text{подп}}/m_{\text{непод}}$ или график $\sigma_{\text{п}} = f(Z_0/H_0)$. При этом значение H_0 определяют по формуле

$$H_0 = H_{\text{н}} + \frac{\alpha \cdot V_0^2}{2g},$$

где $H_{\text{н}} = H_1 - P$ – напор над порогом водослива, дм;

P – высота порога, дм;

$V_0 = Q/BH_1$ – средняя скорость в верхнем бьефе, дм/с;

Q – расход воды, л/с;

g – ускорение свободного падения, дм/с²;

H_0 – напор над порогом водослива, дм;

B – суммарная ширина пролетов плотины, дм;

ε – коэффициент бокового сжатия;

$\sigma_{\text{под}}$ – коэффициент подтопления.

Значение коэффициента расхода водослива вычисляют на основании опытных данных по формуле

$$m_{\text{оп}} = \frac{Q}{\varepsilon \cdot B \sqrt{2g} H_0^{3/2}}.$$

Коэффициент бокового сжатия при $\sigma_{\text{под}} = 1$ вычисляют по Френсису – Кригеру:

$$\varepsilon = 1 - 0,1 \ln \xi \frac{H_0}{b},$$

где ξ – коэффициент формы быков [12];

b – ширина одного пролета;

n – число сжатий, равное удвоенному числу пролетов.





Для исследуемой модели можно принять $\xi = 0,7$.

После этого на миллиметровой бумаге строится график зависимости коэффициента расхода от напора на водосливе (при $\sigma_{\text{п}} = 1$)

$$m = m_{\text{неп}} = f(H_0),$$

а также график полноты напора

$$\sigma_{\text{п}} = m/m_{\text{пр}}.$$

При этом для исследуемого профиля водослива принимают значение коэффициента расхода при профильном напоре $m_{0\text{пр}} = 0,49$. Профиль сливной грани плотины строится на миллиметровой бумаге по координатам устьев пьезометров (см. табл. 8.1, при $H_0 = 0$).

На этом же профиле вычерчивают кривую свободной поверхности струи по показаниям пьезометров при напоре на пороге H_1 и эпюру гидродинамического давления по данным (см. табл. 8.1). Скоростной коэффициент вычисляют по формуле

$$\varphi_{\text{оп}} = \frac{E_0}{E_1},$$

где E_0 – полная удельная энергия относительно дна водобоя;

$E_1 = h_1 + \frac{\alpha \cdot V_1^2}{2g}$ – полная удельная энергия в начале водобоя (в сжатом сечении).

Значения E_0 и E_1 вычисляют с учетом показаний пьезометров.

Обработку и анализ опытных данных удобно вести в табличной форме (см. табл. 9.1).

Профиль свободной поверхности потока и эпюру гидродинамического давления на сливной грани желательно строить на миллиметровке в одинаковом масштабе.

Влияние уровня воды в НБ (подтопления) на пропускную способность водослива оценивают коэффициентом подтопления $\sigma_{\text{под}}$.

Значение $\sigma_{\text{под}}$ зависит от величины подтопления, т.е. превышения уровня НБ над порогом водослива $h_{\text{п}} = \nabla \text{НБ} - \nabla \text{П}$.

Опытные значения $\sigma_{\text{под}}$ вычисляют по зависимости





$$\sigma_{\text{под}} = \frac{m_{\text{под}}}{m_{\text{неп}}}.$$

Значение $m_{\text{под}}$ вычисляют по формуле при измеренной глубине на пороге подтопленного водолива и $\sigma_{\text{под}} = 1$, а значение $m_{\text{неп}}$ определяют по графику, построенному по данным табл. 8.2, при одном и том же значении H_0 .

По результатам опытов и их обработки строят график

$$\sigma_{\text{под}} = f(h_n).$$

Лабораторная работа №9. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Цель работы:

1. Изучить конструкции автоматических водосбросных сооружений и дать их краткое описание.
2. Ознакомиться на модели с конструкцией башенного водосброса.
3. Определить пропускную способность башенного водосброса.

9.1. Общие сведения

Под *водосбросами* при плотинах из местных материалов понимают комплекс сооружений, главной задачей которых является обеспечение беспрепятственного пропуска расчетных максимальных расходов воды из верхнего бьефа в нижний. Водосбросы, включающиеся в работу автоматически при поднятии уровня воды в водохранилище выше отметки нормального подпорного уровня (НПУ), называются *автоматическими*.

В зависимости от высотного расположения сооружений на водосбросном тракте и их водных устройств относительно НПУ различают водосбросы *поверхностные* и *глубинные*. К поверхностным относятся водосбросы, уровень воды во входной части которых соприкасается атмосферой, а отводящая часть может выполняться как открытой, так и заглубленной в грунт (ниже поверхности земли). В глубинных водосбросах входная часть расположена под уровнем воды, а отводящая – в толще грунта. Каждой группе водосбросных сооружений дают название в зависимости от конструкции головной (водосливной) части сооружения.





9.3. Порядок выполнения работы

При безнапорном режиме работы башни и отводящего водовода пропускная способность сооружения зависит от напора на гребне водослива и величины открытия глубинного (напорного) отверстия. Для этих условий коэффициент расхода водосброса определяется по формуле

$$\mu_6 = \frac{Q}{\omega_{om} \sqrt{2gH_n}},$$

где ω_{om} – площадь замкнутого напорного водопропускного отверстия;

H_n – напор перед порогом водослива;

Q – расход, пропускаемый при напоре H_n .

Площадь замкнутого напорного водопропускного отверстия вычисляется по формуле

$$\omega_{om} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a,$$

где R – расчетный радиус водослива;

a – высота водосливного отверстия (поднятия затвора).

При напорном режиме работы башни и отводящего водовода коэффициент расхода равен

$$\mu_t = \frac{Q}{\omega_{mp} \sqrt{2gH_d}},$$

где Q – расход, пропускаемый при напоре H_n ;

ω_{mp} – площадь поперечного сечения трубы;

H_d – действующий напор.

Действующий напор рассчитывается по формуле

$$H_d = - \nabla НБ.$$

По результатам исследований строятся графики пропускной способности $Q = f(H_1; d; h_{нб})$.

На графиках принятые обозначения показывают:

H_1 – напор на сооружении;

$h_{нб}$ – глубина воды в нижнем бьефе;

d – величина открытия глубинного отверстия.





9.4. Обработка результатов исследований

Результаты по определению пропускной способности башенного водосброса сведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Определение расходов и уровней воды

| К измерению расхода треугольным водосливом | | | К измерению уровней воды в верхнем и нижнем бьефах | | | | | |
|--|--|---|---|--|--|--|---|---|
| Отметки | | Напор $H = \nabla UB$ – $-\nabla гр.,$ дм | Расход по тарировоч- ной кривой $Q,$ дм ³ /с | Напор на пороге во- досброса H_n дм | Глубина воды в верхнем бьефе $H_{нб},$ дм | Уровень воды в нижнем бьефе (∇ два трубы = =1,398 дм) $\nabla_{нб},$ дм | Глубина воды в нижнем бьефе $h_{нб},$ дм | Перепад уровней $Z =$ $= H_{нб} -$ $-h_{нб},$ дм |
| гребня во- дослива $\nabla гр.,$ дм | ∇UB пере- вод водово- дом, дм | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Лабораторная работа № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОТОКА С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Цель работы:

1. Ознакомиться на модели с основными элементами конструкции быстротока (входная часть, лоток с элементами шероховатости, выходная часть), а также с его работой.
2. На основании опытных данных по существующей формуле определить коэффициент удельной шероховатости и сравнить его с коэффициентом шероховатости, подсчитанным по формуле Шези.

10.1. Общие сведения

Сопрягающими называются гидротехнические сооружения, которые на относительно коротком участке переводят поток на более низкие отметки местности. Основные типы сопрягающих сооружений – это быстротоки и перепады.

Сопрягающие сооружения имеют широкое распространение на мелиоративных и гидроэнергетических системах, они могут служить также водосбросными сооружениями на водохранилищных узлах для сброса паводковых вод.

Во всех случаях сопрягающие сооружения служат для преобразо-





вания (гашения) кинетической энергии подающей воды на возможно коротком участке.

Сопрягающие сооружения должны:

- 1) создавать безопасные гидравлические условия для движения воды как в самом сооружении, так и в примыкающих к нему водотоках;
 - 2) быть статически устойчивыми;
 - 3) иметь наиболее рациональные, экономичные формы в соответствии с местными условиями их работы (назначение сооружения, рельеф местности, фунты, грунтовые воды, местные и привозные строительные материалы, условия и сроки производства работ).
- Вследствие сложности явлений, имеющих место при протекании потока через сопрягающее сооружение, теоретическая база гидравлики не всегда достаточна для решения вопроса о проектировании гидротехнических сооружений. Поэтому лабораторные исследования дополняют теорию и помогают дальнейшему ее развитию.

10.2. Описание установки

Общая схема модели быстроточка представлена на рис. 10.1.

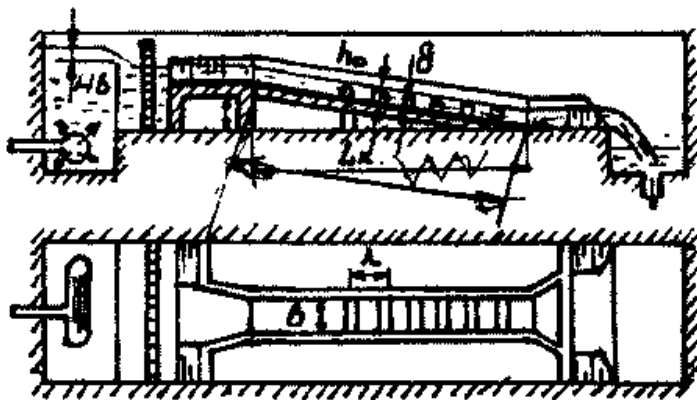


Рис. 10.1. Схема установки быстроточка с искусственной шероховатостью

Модель состоит из напорного бассейна, оснащенного водосливом с тонкой стенкой треугольного выреза для измерения проходя-





щего расхода, входной части быстротока, лотка и выходной части.

В напорный бассейн через специальный успокоитель поступает вода из трубопровода, расход которой регулируется задвижкой. Со стороны входной части быстротока устроен треугольный водослив. Переход в быстроток выполнен в виде деревянного решетчатого успокоителя. Входная часть быстротока устроена в виде сужающегося раструба. Лоток быстротока прямоугольного сечения, длина его взята такой, чтобы при искусственной шероховатости в конце лотка было установившееся равномерное движение.

Выходная часть быстротока выполнена в виде расширяющегося колодца, в конце которого установлена водобойная стенка.

Устройство искусственной шероховатости в лотке необходимо для увеличения в нем воды с целью уменьшения скорости, что иногда крайне необходимо для реальных сооружений при уклонах быстротока более 10 %.

В данном случае применена искусственная шероховатость в виде прямоугольных брусков. Основное условие, которому должна удовлетворять искусственная шероховатость, выражается зависимостями:

$$\lambda = 8 \cdot \sigma ; \quad 1 \leq \beta \leq 12,$$

где λ – расстояние между брусками;
 σ – высота брусков;

$$\beta = b / h_0 ,$$

где b – ширина лотка быстротока;
 h_0 – глубина воды в лотке.

10.3. Порядок выполнения работы

1. Студенты знакомятся с моделью, измеряют и записывают в схематические чертежи модели быстротока основные размеры:
 b – ширина лотка быстротока;
 L – длина лотка быстротока;
 σ – высота брусков искусственной шероховатости;
 λ – расстояние между брусками.





Результаты измерений заносят в табл.10.1.

Таблица 10.1. Результаты измерений

| b | σ | λ | L | ΔH | J | H_a | h_0 |
|---|----------|-----------|---|------------|---|-------|-------|
| | | | | | | | |

Уклон быстротока вычисляют по формуле

$$J = \frac{\Delta H}{L_x},$$

где ΔH – разность отметок в начале и конце быстротока;

L_x – длина лотка быстротока.

2. Пускают воду в лоток и после установившегося движения с помощью мерной иглы определяют:

- а) напор над ребром водослива H_b ;
- б) глубину потока в конце лотка быстротока h_0 .

10.4. Обработка результатов исследований

На основании опытных данных и с использованием зависимости для прямоугольных поперечных брусков определяют коэффициент удельной шероховатости k :

$$1000 \cdot k = 47,5 - 1,2\alpha + 0,1\beta; \quad \alpha = h_0/\sigma; \quad \beta = b/h_0.$$

Из формулы Шези также определяют $k = 1/C$ и результаты сравнивают:

$$Q = \omega C \sqrt{RJ},$$

откуда

$$k = \frac{\omega \sqrt{RJ}}{Q},$$

где Q – расход;

ω – площадь поперечного сечения потока;

R – гидравлический радиус;

J – уклон быстротока;

C – коэффициент Шези.

$$R = \omega / \chi,$$

где χ – смоченный периметр; $\chi = b + 2h_0$; $\omega = bh_0$.





Вычисления проводят в табл. 10.2.

Таблица 10.2. Результаты вычислений

| По данным наблюдений | | | По теоретическим расчетам | | | | | |
|--------------------------|---------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------|------------|------------|----------------------------------|
| $1,2 \frac{h_0}{\sigma}$ | $0,1 \frac{b}{h_0}$ | $k = \frac{47,5 - 1,2\alpha + 0,1\beta}{1000}$ | $\omega = h_0 \cdot b$ | $\chi = b + 2h_0$ | $R = \frac{\omega}{\chi}$ | \sqrt{R} | \sqrt{J} | $k = \frac{\omega \sqrt{RJ}}{Q}$ |

Лабораторная работа № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ПЕРЕПАДА

Цель работы:

1. Ознакомиться с конструкцией модели перепада (входная часть конструкции ступеней, выходная часть) и с картиной прохождения потока через модель. Выполнить гидравлический расчет двухступенчатого перепада.
2. При установившемся движении воды на модели измерить глубину затопления потока на ступени, а также длину ступени и сравнить их со значениями глубины и длины, вычисленными по соответствующим формулам или графикам.

1.1. Общие сведения

Многоступенчатые перепады чаще всего устраивают, если рельеф местности не позволяет применять быстроток, т.е. когда уклон местности достигает порядка 0,2 – 0,3.

В большинстве случаев вопрос об устройстве перепада или быстротока решается на основании их технико-экономического сравнения.

11.2. Описание установки

Модель двухступенчатого перепада представлена на рис. 11.1.

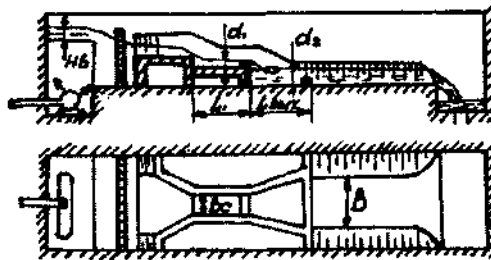


Рис. 11.1. Схема установки перепада

Двухступенчатый перепад состоит из напорного бассейна, оснащенного водомерным устройством (водослив с тонкой стенкой треугольного выреза), вход-





ной части перепада, ступеней и выходной части. На выходе из напорного бассейна установлен успокоитель в виде деревянных решеток. Модель перепада изготовлена из дерева. Входная часть выполнена в виде сужающегося раструба, перепад двухступенчатый, прямоугольного сечения и выходная часть выполнены в виде расширяющегося в плане раструба с водобойной стенкой.

11.3. Порядок выполнения работы

1. Выполняют схематические чертежи модели, измеряют и наносят на них основные размеры:

P_1 и P_2 – высоты ступеней;

d_1 и d_2 – глубины колодцев;

d_c – ширина ступени перепада;

L_2 и $L_{\text{вых}}$ – длины ступеней;

B – ширина на выходном участке $L_{\text{вых}}$.

2. После пуска воды и создания в сооружении установившегося движения измеряют:

1) напор на водосливе $H_{\text{вод}}$;

2) глубину воды на входном участке $H_{\text{вых}}$.

Замеры проводят мерной иглой (шпиценмасштабом), за измеренную глубину принимают разность показаний мерной иглы на дне ступени и на поверхности воды.

11.4. Обработка результатов исследований

Результаты измерений заносят в табл. 11.1 и 11.2.

Таблица 11.1. Результаты измерений

| P_1 | d_1 | L_1 | b_c | P_2 | d_2 | $L_{\text{вых}}$ | B | $H_{\text{вод}}$ | $H_{\text{вых}}$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|-----|------------------|------------------|
| | | | | | | | | | |

Таблица 11.2. Результаты вычислений

| Q | $H_{\text{вых}}$ | q | $h_{\text{кр}}$ | h_{c1} | h_{c2} | ℓ_{01} | $\ell_{\text{пр}}$ | L_1 | H_{01} | H_1 | d_1 | h_{c2} |
|-----|------------------|-----|-----------------|----------|----------|-------------|--------------------|-------|----------|-------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | | | |

Лабораторная работа № 12. ИЗУЧЕНИЕ КРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ И ДРЕНАЖА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Цель работы:

1. Ознакомиться с креплениями верхового и низового откосов плотин.
2. Составить эскизы креплений и дать их краткое описание.
3. Ознакомиться с дренажами грунтовых насыпных плотин.
4. Выполнить эскизы дренажей и дать их краткое описание.

Откосами называются наклонные плоскости, ограничивающие плотину с боковых сторон. Откос, обращенный к верхнему бьефу, называется *верховым*,





мокрым или внутренним, а находящийся со стороны нижнего бьефа – *низовым, сухим или наружным*.

Крепление откосов грунтовых плотин устраивают для защиты от следующих воздействий:

- 1) размыва течением или волнением воды в бьефе;
- 2) разрушения льдом;
- 3) размыва фильтрационным потоком воды, вытекающей из тела плотины (из пор грунта), например, при снижении уровня воды в бьефе или откате волн;
- 4) размыва дождевыми и талыми водами, стекающими по откосу плотины (низовому), а также по откосу берега в нижнем бьефе;
- 5) разрушения под воздействием ветра;
- 6) прорастания растений с сильно развитой корневой системой, так как при отмирании и гниении корней растений в теле плотины могут раскрыться сосредоточенные ходы фильтрации.

Тип покрытия откоса выбирают с учетом перечисленных факторов, а также интенсивности их воздействия на откос.

В общем случае покрытие откоса состоит из следующих элементов (рис. 12.1):

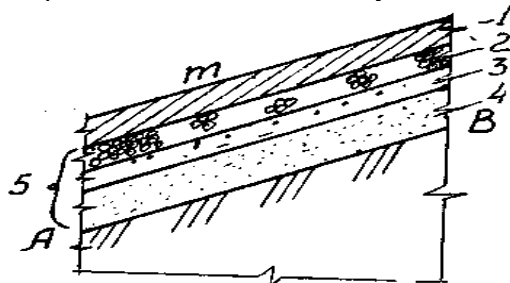


Рис. 12.1. Схема покрытия откоса АВ (в общем случае):

- 1 – крепление; 2 – дренаж; 3 – обратный фильтр;
4 – защитный слой; 5 – подготовка

- 1) **крепления**, защищающего откос от размыва его поверхности водой бьефа, от разрушения его льдом и т.п.;
- 2) **подготовки**, укладываемой под креплением;
- 3) **дренажа** (выполненного крупнозернистым материалом), причем дренаж (вместе с обратным фильтром и защитным слоем) иногда может играть роль подготовки;
- 4) **обратных фильтров**, предотвращающих вынос мелкозернистых частиц грунта в дренаж или за пределы тела плотины;
- 5) **защитного слоя**, который совместно с креплением, подготовкой, дренажем и обратным фильтром защищает глинистый грунт от промерзания и других воздействий, указанных выше.

В частных случаях покрытие откоса может состоять только из некоторых перечисленных выше элементов.





Для защиты верхового откоса применяют следующие виды креплений: каменные (насыпные); бетонные монолитные, железобетонные сборные и монолитные с обычной и предварительно напряженной арматурой; асфальтобетонные; биологические.

Для защиты низового откоса применяют залужение, дерновое и гравийно-галечниковое покрытие.

В грунтовых насыпных плотинах могут быть устроены два типа дренажа: дренаж низового клина плотины и дренаж основания плотины.

Дренаживание тела и основания плотины предусматривают с целью приема и организованного отвода в нижний бьеф фильтрационной воды, чтобы исключить фильтрационные деформации грунтов тела и основания плотины; уменьшения зоны действия фильтрационного потока, что позволяет повысить устойчивость низового откоса; недопущения выхода фильтрационного потока на низовой откос – заглубления депрессионной кривой ниже зоны промерзания.

Дренаж рекомендуется устраивать во всех типах плотин и при различной их высоте.

Дренаж состоит из двух основных частей:

1) **приемной** – в виде обратных фильтров из пористого песка, гравия или щебня, а также из пористого бетона или синтетических волокнистых материалов;

2) **отводящего (коллектора)** – для отвода воды в нижний бьеф. Выполняют из перфорированных труб или в виде лент из крупного щебня и камня.

Задача обратных фильтров – предотвращение фильтрационных деформаций грунта в зоне выхода фильтрационного потока в дренаж. По расположению в теле плотины и по конструкции различают следующие типы дренажа: дренажный банкет, наклонный дренаж, трубчатый, горизонтальный, комбинированный.

В ходе выполнения работы студенты должны ознакомиться с типами креплений верхового и низового откосов и дренажа плотин. Необходимо выполнить эскизы типов креплений и дренажа и дать их краткое описание.

Лабораторная работа № 13. ИЗУЧЕНИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ РЫБОСБОРНО-ОСУШИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В ПРУДАХ

Цель работы:

1. Изучить схемы размещения рыбосборно-осушительной сети в прудах.
2. Выполнить эскизы схем размещения рыбосборно-осушительной сети в прудах и дать их краткое описание.

В рыбоводных прудовых хозяйствах выращивание рыбы осуществляется в прудах различных категорий, которые заливаются водой на определенный отрезок времени. По окончании периода работы вода из рыбоводных прудов должна быть полностью спущена, а ложе их очищено. Для сбора воды с ложа и подвода ее к донному водоспуску, а также для полного ската рыбы на ложе пруда нарезают рыбосборно-осушительную сеть каналов. Расположение сети рыбосборно-осушительных каналов на ложе прудов зависит от рельефа ложа





прудов. Осушительную сеть прокладывают таким образом, чтобы все пониженные места ложа полностью осушались и густота сети, и ее расположение обеспечивали полный скат в осушительную сеть рыбы при облове пруда. Осушительная (рыбосборная) сеть обычно состоит из одной или нескольких центральных канав и веток к ним. Центральные каналы подводят к донным водоспускам, через которые осуществляется спуск воды. Водоспуски устанавливают в самых пониженных местах. Дно центральных каналов выводят на отметку порога донного водоспуска, а отметку порога устанавливают из расчета полного стока воды пруда из самых пониженных мест. Гидравлический расчет каналов осушительной сети прудов не производится, а их размеры принимают в соответствии с нормативными данными, приведенными в табл. 13.1.

Таблица 13.1. **Определение размеров поперечного сечения и заложения откосов осушительных каналов**

| Пруды | Глубина каналов, м | Ширина по дну, м | Коэффициент заложения откоса |
|-------------|--------------------|------------------|------------------------------|
| Головные | 1,0 | 0,5 – 1,0 | В зависимости от грунтов |
| Зимовальные | 0,5 | 0,53 – 0,4 | 1 : 1 |
| Нерестовые | 0,5 | 0,3 | 1 : 1 – 1 : 1,5 |
| Мальковые | 0,5 | 0,4 | 1 : 1 – 1 : 1,5 |
| Маточные | 0,5 | 0,4 | 1 : 1 |
| Выростные | 0,7 | 0,4 – 0,6 | 1 : 1 – 1 : 1,5 |
| Нагульные | 1,0 | 0,5 – 1,0 | 1 : 1,5 |

Лабораторная работа № 14. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РЫБОУЛОВИТЕЛЕЙ

Цель работы:

1. Изучить конструкции и схемы расположения рыбоуловителей.
2. Определить размеры камеры рыбоуловителя.
3. Выполнить эскиз рыбоуловителя и дать его краткое описание.

Рыбоуловитель – специальное гидротехническое сооружение, предназначенное для концентрации, содержания и порционного отлова выращенной в прудах рыбы.

Выбор той или иной схемы размещения рыбоуловителя зависит от рельефа участка, находящегося ниже водопроводящей части донного водоспуска, расположения дамбы пруда, водосборного канала и водоприемника.

Камеру рыбоуловителя выполняют прямоугольной формы в плане и трапециевидального поперечного сечения. Дно рыбоуловителя располагают на 0,8 – 1,2 м ниже донного водоспуска. Ширину по дну принимают не более 6 – 8 м, длина зависит от площади пруда (объема выращенной в нем рыбы). Глубина воды в камере не должна превышать 1,0 – 1,2 м, в начале и конце рыбоуловителя располагают бетонные стенки с пазами для решеток и шандор. При нахождении рыбы в рыбоуловителе менее одного месяца отношение массы рыбы к объему воды должно составлять 1:4, более одного месяца – до 1:7 – 1:10.

По условиям работы в рыбоуловителе постоянно должна быть расчетная глубина воды, поэтому решение вопроса, по какой схеме должно осуществляться





водоснабжение рыбоуловителя, является очень важным. Схема водоснабжения рыбоуловителя назначается в зависимости от того, на каких прудах располагается рыбоуловитель (на русловых или пойменных), каков расход в источнике водоснабжения и как рыбоуловитель располагается по отношению к источнику водоснабжения.

В ходе выполнения работы студенты должны ознакомиться с конструкциями рыбоуловителей и схемами их расположения. Необходимо выполнить эскизы конструкций рыбоуловителей и дать их краткое описание.

Лабораторная работа № 15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПЛАСТИЧНОСТИ, НАИМЕНОВАНИЯ И КОНСИСТЕНЦИИ ГРУНТА

Цель работы:

1. Найти количественные значения классификационных показателей глинистого грунта.
2. Определить наименование глинистого грунта в соответствии со СТБ 943–93.

15.1. Определение границы текучести

Граница текучести (W_L) характеризуется влажностью (в процентах) пасты, приготовленной из грунта и воды, в которую балансирный конус погружается под действием собственной массы (76 г) за 5 с на глубину 10 мм (рис. 15.1).

Порядок выполнения работы.

1. Из сухого грунта, прошедшего через сито с отверстиями 1 мм, с добавлением небольшого количества воды приготавливают грунтовую пасту, которую выдерживают не менее 24 ч в закрытом стеклянном сосуде.
2. Грунтовую пасту тщательно перемешивают и укладывают в стаканчик прибора, заполняя его без пустот. Поверхность пасты сглаживают до уровня с краями стаканчика.
3. К поверхности грунтовой пасты, находящейся в стаканчике, подносят конус (рис. 15.1) и наблюдают за его свободным погружением в течение 5 с.
4. Погружение конуса за 5 с на глубину менее 10 мм показывает, что влажность пасты еще не достигла искомой границы текучести. В этом случае грунтовую пасту вынимают из стаканчика, добавляют в него немного воды, тщательно перемешивают и повторяют операции согласно п. 2 и 3.

При погружении конуса на глубину более 10 мм грунтовую пасту вынимают из стаканчика, кладут на стекло, перемешивают шпателем, давая ему немного подсохнуть, и повторяют операции согласно п. 2 и 3. Погружение конуса в пасту в течение 5 с на глубину 10 мм указывает на достижение искомой границы текучести.



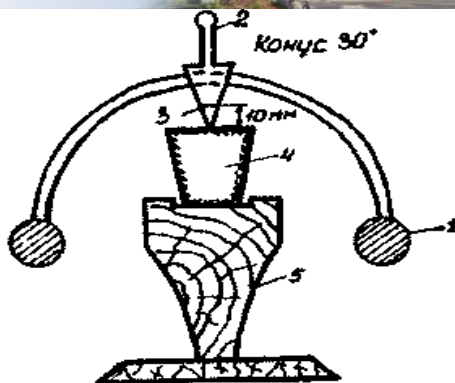


Рис. 15.1. Схема прибора для определения границы текучести: 1 – балансирующий конус; 2 – ручка; 3 – круговая метка; 4 – стаканчик с грунтом; 5 – подставка

5. Отбирают из испытываемой пасты пробу массой 15 г и определяют влажность (см. лабораторную работу № 14). Производят не менее двух параллельных определений. Расхождение в результатах замеров свыше 2 % не допускается.

6. Результаты заносят в табл. 15.1.

Таблица 15.1. Определение границы текучести

| Номер бюкса | Масса бюкса, г | | | Предел текучести $W_L = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0}$ |
|-------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|
| | пустого m_0 | с влажным грунтом m_1 | с сухим грунтом m_2 | |
| | | | | |

15.2. Определение границы раскатывания

Границей раскатывания (W_p) называют влажность (в процентах), при которой паста, изготовленная из грунта и воды и раскатанная в жгут длиной 3 – 10 мм и толщиной 3 мм, начинает распадаться на отдельные кусочки.

Порядок выполнения работы.

1. Грунтовую пасту, оставшуюся от определения границы текучести, подсушивают до тех пор, пока она при раскатывании не перестанет прилипать к ладоням рук.

2. Из подсушенной пасты берут небольшие кусочки и раскатывают их на стекле или кальке до образования жгута диаметром 3 мм. Если при такой толщине грунтовый жгут начинает крошиться, то считают, что предел раскатывания достигнут.

3. Набрав не менее 10 – 15 г жгута грунта в предварительно взвешенный бюкс, определяют его влажность (см. лабораторную работу №14). Если жгут начинает крошиться, не достигнув толщины 3 мм, добавляют несколько капель





воды, затем вновь перемешивают и раскатывают. Если при толщине 3 мм жгут сохраняет эластичность и не крошится, его переминают руками, а затем снова раскатывают до толщины 3 мм.

4. Для каждого образца грунта производят не менее двух параллельных определений. Расхождение в результатах должно быть не более 2 %, в противном случае испытание повторяют. Данные опыта заносят в табл. 15.2.

Таблица 15.2. **Определение границы раскатывания**

| Номер бюкса | Масса бюкса, г | | | Предел текучести $W_p = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0}$ |
|-------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|
| | пустого m_0 | с влажным грунтом m_1 | с сухим грунтом m_2 | |
| | | | | |

5. По влажности границы текучести и раскатывания определяют число пластичности, согласно которому дают наименование глинистому грунту. Показатель консистенции устанавливают, используя значение влажности, определенное в лабораторной работе № 14.

15.3. Определение наименования и консистенции глинистого грунта

Глинистые грунты подразделяются на типы в зависимости от числа пластичности I_p (ГОСТ 25100 – 82).

Под пластичностью грунта понимают его способность в определенном интервале влажности изменять свою форму без разрыва сплошности под воздействием внешнего давления и сохранять ее, когда внешнее давление прекращается.

Число пластичности – это значение диапазона влажностей, при которых грунт сохраняет пластические свойства. Чем больше число пластичности, тем больше возможностей проявления пластичных свойств грунта.

Глинистые грунты становятся пластичными при определенном содержании воды. С увеличением содержания воды они переходят в текучее состояние, а с уменьшением – в твердое.

Влажность, при которой грунт переходит из пластичного состояния в текучее, называют *границей текучести* (верхний предел пластичности W_L). Влажность, при которой грунт переходит из пластичного состояния в твердое, называют *границей раскатывания* (нижний предел пластичности W_p). Эти величины называют характерными влажностями-ми, их применяют для классификации глинистых грунтов. Разность между влажностями при пределе текучести и раскатывания называют *числом пластичности*.

$$I_p = W_L - W_p.$$

По числу пластичности выделяются следующие грунты: супеси, $1 \leq I_p \leq 7$ %; суглинки, $7 < I_p \leq 17$; глины, $I_p > 17$ %.

Консистенция грунта – это степень взаимной подвижности его частиц. Зная





характерные влажности W_L , W_p и естественную влажность W , можно определить консистенцию грунта, измеряемую величиной

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}.$$

Разновидности глинистых грунтов выделяются по консистенции, характеризующейся показателем текучести I_L . Супеси подразделяют на твердые, $I_L < 0$; пластичные, $0 \leq I_L \leq 1$; текучие, $I_L > 1$; суглинки и глины – на твердые, $I_L < 0$; полутвердые, $0 \leq I_L \leq 0,25$; тугопластичные, $0,25 < I_L \leq 0,5$; мягкопластичные, $0,5 < I_L \leq 0,75$; текучепластичные, $0,75 \leq I_L \leq 1,0$; текучие, $I_L > 1$.

Лабораторная работа № 16. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРФЯНЫХ ГРУНТОВ

Цель работы:

1. Определить степень заторфованности.
2. Определить степень разложения торфа по внешним признакам.

16.1. Общие сведения

Песчаные и глинистые грунты могут содержать растительные остатки, количество которых нормируется **степенью заторфованности q** .

Степень заторфованности (q) – относительное содержание растительных остатков в грунте. Определяется как отношение массы растительных остатков в образце грунта, высушенного при температуре $100 - 105^\circ \text{C}$, к его массе:

$$q = \frac{m_{p.o}}{m}.$$

Свойства водонасыщенных торфов и заторфованных грунтов зависят от содержания растительных остатков, степени разложения (минерализации), структурной прочности, характера залегания (открытые или погребенные слои, в виде линз, выклиниваний и т.д.).

При проектировании оснований из таких грунтов необходимо учитывать специфические особенности торфов и заторфованных грунтов:

- 1) водонасыщенность;
- 2) большую и неравномерную сжимаемость, медленное протекание осадок, существенную изменчивость и анизотропию всех характеристик во времени под воздействием нагрузки и осушения.

Торф – органико-минеральный грунт, образовавшийся в результате естественного отмирания и неполного разложения болотных растений в условиях повышенной влажности при недостатке кислорода, содержащий по массе 50 % и более органического вещества.

Грунт заторфованный – песчаный, пылеватый, глинистый или насыпной, содержащий по массе от 10 до 50 % органического вещества (табл. 16.1).

Органическое вещество – органические соединения, входящие в состав грунта в виде неразложившихся остатков растительных и животных организмов, а





также продуктов их разложения и преобразования

Таблица 16.1. Наименование грунтов с примесью растительных остатков

| Грунты | Относительное содержание растительных остатков (степень заторфованности q) |
|---|--|
| 1. Грунты с примесью растительных остатков | |
| Песчаные | $0,03 < q \leq 0,1$ |
| Глинистые | $0,05 < q \leq 0,03$ |
| 2. Заторфованные грунты | |
| Слабозаторфованные | $0,1 < q \leq 0,25$ |
| Среднезаторфованные | $0,25 < q \leq 0,4$ |
| Сильнозаторфованные | $0,4 < q \leq 0,6$ |
| 3. Торфы | $q > 0,6$ |

Степень разложения торфа (R_p) – отношение массы бесструктурной (полностью разложившейся) части, включающей гуминовые кислоты и мелкие частицы негумифицированных остатков растений, к общей массе торфа (табл. 16.2):

$$R_p = \frac{m_{p.o}}{m_m} \cdot 100 \%$$

Таблица 16.2. Определение степени разложения по внешним признакам

| Степень разложения R_p , % | Внешние признаки |
|------------------------------|---|
| До 20 | Светло-коричневый торф. Представляет собой спутанный войлок нитевидных корешков осок, иногда с примесью гипновых и сфагновых мхов. Торф с преобладанием гипнового мха имеет бронзовый оттенок. Вода светлая, иногда мутноватая, отжимается легко |
| 20 – 35 | Темный серо-коричневый торф. Корешки осок ясно различимы на изломе в темной массе торфа. Остатки мхов различимы при внимательном рассмотрении. Вода отжимается, мутная, светло-серая или коричневая |
| 35 – 50 | Темный серо-коричневый торф. Растительные остатки трудно различимы; нередко встречаются кусочки древесины и коры. Вода отжимается с трудом, мутная, темно-серая с заметными взвешенными частицами. При 35 %-ной степени разложения начинает слабо пачкать руки при размазывании |
| Более 50 | Торф землисто-черный, иногда с коричневым оттенком. Из растительных остатков нередко встречаются мелкие кусочки коры и древесины. Вода не отжимается. Торф легко проходит между пальцами. Сильно пачкает руки при размазывании. От 50 %-ной степени разложения торф начинает продавливаться между пальцами. Отжатый торф теряет упругость |

Для грунтов с примесью растительных остатков, верховых и низменных торфов ориентировочные значения физико-механических характеристик можно принимать по СНБ 475–75, а для погребенных торфов – по табл. 16.3.





Таблица 16.3. Расчетные значения физико-механических характеристик погробенных торфов (СНиП 11-15-74)

| Характеристики погробенности торфа | Значения характеристик при степени разложения торфа R_p , % | | |
|--|---|---------|---------|
| | 20 – 30 | 31 – 40 | 41 – 60 |
| Плотность γ , т/м ³ | 1,1 | 1,3 | 1,5 |
| Плотность твердых частиц γ_s , т/м ³ | 1,4 | 1,8 | 2,2 |
| Природная влажность W | 3,0 | 2,0 | 1,2 |
| Коэффициент пористости e | 4,1 | 3,1 | 2,2 |
| Угол внутреннего трения ϕ , град | 2,2 | 2,6 | 30 |
| Удельное сцепление C , МПа | 0,03 | 0,02 | 0,01 |
| Модуль деформации E_0 , МПа | 1,50 | 3,00 | 2,00 |
| Коэффициент бокового давления ξ | 0,24 | 0,28 | 0,32 |

16.2. Обработка результатов исследований

Определение степени заторфованности и степени разложения торфа приведено в табл. 16.4 и 16.5.

Таблица 16.4. Определение степени заторфованности

| Номер бюкса | Масса, г | | | | | Степень заторфованности $q = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} = \frac{m_p \cdot o}{m}$ | q_{ϕ} |
|-------------|-------------|------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|--|------------|
| | бюкса m_0 | бюкса с влажным торфом m_1 | бюкса с сухим торфом m_2 | воды $m_1 - m_2$ | сухого торфа $m_2 - m_0$ | | |
| | | | | | | | |

Таблица 16.5. Определение степени разложения торфа

| Степень разложения R_p , % | Внешние признаки |
|------------------------------|------------------|
| | |

Лабораторная работа № 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Цель работы:

1. Вычислить количественные значения: коэффициента пористости грунта e , степени плотности J_d , степени влажности S_r , гранулометрического состава, коэффициента неоднородности грунта.
2. Определить плотность грунта ρ , плотность частиц ρ_s , влажность W . Затем по расчетным формулам можно определить e и S_r .
3. Классифицировать исследуемый песчаный грунт по количественным показателям в соответствии с СТБ Е 933-1-2002 и получить его полное название.

17.1. Определение гранулометрического состава песчаного грунта

Относительное содержание частиц различной крупности, выраженное в процентах от массы сухого грунта, характеризует гранулометрический, или меха-





нический состав грунта. По гранулометрическому составу дается наименование крупнообломочным и песчаным грунтам.

Определение гранулометрического состава производится соответствующими анализами, для чего грунты разделяются на фракции (размеры зерен, близкие по крупности).

Ситовой метод применяют для определения гранулометрического состава песчаных и крупнообломочных грунтов. Грунт с помощью специального набора сит рассеивают на отдельные фракции. Стандартный набор состоит из сит с отверстиями 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Сита собирают в колонку так, чтобы их отверстия уменьшались сверху вниз. Под нижнее сито подставляют поддон.

Порядок выполнения работы.

1. Из воздушно-сухого грунта отбирают среднюю пробу, величина которой зависит от однородности состава грунта. Чем менее однороден грунт, тем больше должна быть средняя проба.

Средняя проба берется следующим образом: на листе бумаги весь образец грунта тщательно перемешивают, разравнивают ножом или линейкой и разделяют на части. Две части, лежащие накрест, отбрасывают, а две другие соединяют, перемешивают, разравнивают, разделяют на четыре части и т.д. Эту операцию продолжают до тех пор, пока объем оставшегося грунта не будет примерно равен величине средней пробы (величина средней пробы в данном случае берется равной 100 г). Объем средней пробы для крупнообломочных грунтов составляет 600 – 3000 см³, для песчаных – 200 – 600 см³.

2. Пробу грунта взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г.

3. Взвешенный грунт помещают в колонку сит и встряхивают до тех пор, пока не будет достигнута полная отсортировка частиц грунта на ситах.

4. Фракции, оставшиеся после просеивания на ситах и в поддоне, взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г. Суммарная масса всех фракций не должна отличаться более чем на 0,5 % от массы средней пробы, взятой для анализа.

5. Из суммарной массы навески вычисляют процентное содержание каждой фракции по формуле

$$X = \frac{A \cdot 100\%}{B},$$

где X – процентное содержание фракций в грунте;

A – масса фракций;

B – масса средней пробы.

Полученные данные записывают в табл. 17.1.

Таблица 17.1. **Определение гранулометрического состава**
Масса средней пробы дана в граммах

| Показатели | Размеры отверстий сит, мм | | | | | | | | Сумма |
|----------------------------------|---------------------------|---|---|---|-----|------|-----|------|-------|
| | 10 | 5 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,1 | <0,1 | |
| Масса фракций, г | | | | | | | | | |
| Масса фракций с учетом потерь, г | | | | | | | | | |
| Распределение потерь, г | | | | | | | | | |





| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Содержание фракций, % | | | | | | | |
| Совокупность фракций данного размера и меньше, % | | | | | | | |

Для большей наглядности и удобства сравнения различных грунтов между собой гранулометрический состав обычно изображают графически, чаще в виде суммарной кривой гранулометрического состава или методом треугольных координат. Кривая гранулометрического состава строится в системе прямоугольных координат в полулогарифмическом масштабе. Для построения графика последовательно суммируют содержание фракций, начиная с наиболее мелкой или крупной.

Расчет результатов анализа по совокупности фракций приводится в табл. 17.2.

Таблица 17.2. Результаты гранулометрического анализа по совокупности фракций

| Диаметр частиц каждой фракции, мм | Содержание каждой фракции в группе, % | Диаметр частиц по совокупности фракций, мм | Содержание по совокупности фракций, % |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| 10,0 – 5,0 | 0,0 | | |
| 5,0 – 2,0 | 2,4 | < 5 | 100 |
| 2,0 – 1,0 | 8,2 | 2 | 97,6 |
| 1,0 – 0,5 | 32,4 | 1 | 89,4 |
| 0,5 – 0,1 | 48,5 | 0,5 | 57,0 |
| 0,1 и менее | 8,5 | 0,1 | 8,5 |

После подсчета данных, приведенных в табл. 17.2, на оси ординат откладывают процентное содержание фракций, на оси абсцисс – логарифмы диаметров частиц.

Суммарная кривая гранулометрического состава грунта приведена на рис. 17.1.

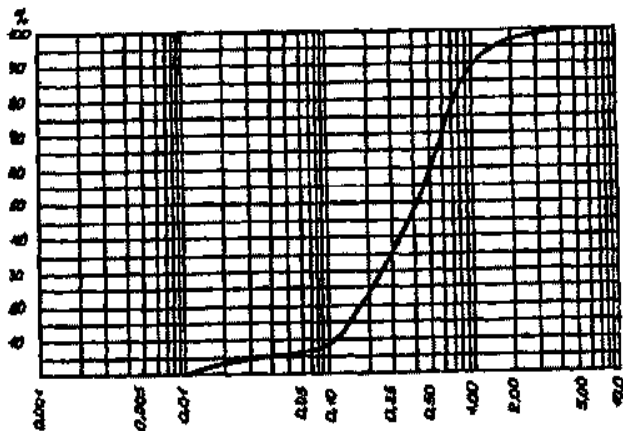


Рис. 17.1. Суммарная кривая гранулометрического состава грунта





По кривой гранулометрического состава находят коэффициент неоднородности грунта η как отношение диаметра частиц, процентное содержание которых в грунте составляет менее 60 %, к диаметру частиц с процентным содержанием в грунте меньше 10 %:

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}.$$

Для грунта, гранулометрический состав которого определен в лабораторной работе, строят кривую гранулометрического состава.

Степень неоднородности гранулометрического состава η : однородный, $\eta < 3$, неоднородный, $\eta > 3$.

Определяют наименование грунта согласно классификации СТБ Е 933-1–2002 по табл. 17.3.

Таблица 17.3. Классификация (СТБ Е 933-1–2002)

| Виды крупнообломочных и песчаных грунтов | Распределение частиц по крупности в % от массы воздушно-сухого грунта |
|---|---|
| А. Крупнообломочные | |
| Валунный грунт (при преобладании неокатанных частиц – глыбовый) | Масса частиц крупнее 200 мм составляет более 50 % |
| Галечный грунт (при преобладании неокатанных частиц – щебенистый) | Масса частиц крупнее 10 мм составляет 50 % |
| Гравийный грунт (при преобладании неокатанных частиц – дресвяный) | Масса частиц крупнее 2 мм составляет более 50 % |
| Б. Песчаные | |
| Песок гравелистый | Масса частиц крупнее 2 мм составляет более 25 % |
| Песок крупный | Масса частиц крупнее 0,5 мм составляет более 50 % |
| Песок средней крупности | Масса частиц крупнее 0,25 мм составляет более 50 % |
| Песок мелкий | Масса частиц крупнее 0,1 мм составляет 75 % и более |
| Песок пылеватый | Масса частиц крупнее 0,1 мм составляет менее 75 % |

17.2. Влажность грунта

Грунт естественного залегания всегда содержит то или иное количество воды. Величина естественной влажности является важнейшей характеристикой физического состояния грунта. *Влажностью* называется отношение массы воды, удаленной из образца высушиванием при температуре 100 – 105° С, к массе абсолютно сухого грунта. Влажность может быть выражена в процентах или в долях единицы.

Порядок выполнения работы.

1. Взвешивают пустой бюкс с крышкой на технических весах с точностью до 0,01 г (m_0).
2. В бюкс помещают образец влажного грунта массой 10 – 20 г и взвешивают (m_1).





3. Сняв предварительно крышку, бюкс помещают в сушильный шкаф, где поддерживается постоянная температура около 105°C. Выдерживают образец в шкафу не менее 6 ч, после остывания бюкса его взвешивают (m_2).
4. Величину влажности грунта W в процентах вычисляют по формуле

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \cdot 100\%,$$

где W – влажность грунта, %;
 m_1 – масса бюкса с влажным грунтом, г;
 m_2 – масса бюкса с сухим грунтом, г;
 m_0 – масса бюкса, г.

5. Данные определения заносят в табл. 17.4.

Таблица 17.4. **Определение влажности грунта весовым способом**

| Номер бюкса | Масса, г | | | | | Влажность грунта, % $W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \cdot 100$ |
|-------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------|--|
| | бюкса m_0 | бюкса с влажным грунтом m_1 | бюкса с сухим грунтом m_2 | воды $m_1 - m_2$ | сухого грунта $m_2 - m_0$ | |
| | | | | | | |

6. Для каждой пробы грунта следует делать два определения. Расхождения между параллельными определениями допускаются до 2 %.

17.3. Плотность частиц грунта

Плотностью частиц грунта называется отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к объему твердой части грунта:

$$\rho_s = \frac{m_c}{V_s},$$

где m_c – масса сухого грунта, г;
 V_s – объем сухого грунта, см³.

Плотность частиц грунта обуславливается только минералогическим составом. Для ориентировочных расчетов принимают плотность песков, равной 2,66 г/см³; супесей и суглинков – 2,7 г/см³; глин – 2,75 г/см³.

Для определения плотности частиц грунта применяют мерные сосуды (пикнометры) емкостью не менее 100 см³. Для незасоленных грунтов используют дистиллированную воду, а для засоленных – керосин, толуол, ксилол. Зная плотность грунта, находят плотность твердых частиц:

$$\gamma_s = \rho_s g, \text{ кН/м}^3,$$

где γ_s – плотность твердых частиц;
 ρ_s – плотность грунта;
 g – ускорение свободного падения.

17.4. Плотность грунтов

Плотность грунта равна отношению массы грунта, включая массу воды в его порах, к занимаемому этим грунтом объему. Плотность грунта зависит от





влажности, пористости, минералогического состава и может меняться в значительных пределах. Максимального значения плотности грунт при данной пористости достигает при полном заполнении пор водой. Плотность грунта используется в инженерно-технических расчетах оснований, земляных сооружений и среды для подземных конструкций, а также при установлении объема земляных работ.

Удельный вес грунта применяют для характеристики отношения веса грунта к занимаемому им объему в расчетах при определении природного давления, давления на подпорные стены. Зная плотность грунта, удельный вес находят по формуле

$$\gamma = \rho_s g, \text{ кН/м}^3,$$

где γ – удельный вес;

g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$;

ρ_s – плотность грунта, кг/м^3 .

Определение плотности грунта при плотном сложении

1. Взвесив металлический стакан (m_0), в него насыпают небольшую порцию песка в воздушно-сухом состоянии и производят уплотнение при помощи деревянной трамбовки.
2. После уплотнения первой порции песка в стакан насыпают вторую порцию песка и снова ее уплотняют. Операцию повторяют до тех пор, пока стакан не будет заполнен полностью.
3. Удалив избыток песка линейкой, взвешивают стакан с песком (m_1).
4. Плотность грунта вычисляют по выражению

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V}, \text{ г/см}^3,$$

где V – объем стакана, см^3 ;

m_1 – масса стакана с песком, г;

m_0 – масса стакана, г.

Определение плотности грунта в рыхлом состоянии

1. Песок высыпают на лист бумаги, а затем небольшой струей ссыпают в тот же металлический стакан, предварительно опустив туда разрыхлитель. После этого разрыхлитель, медленно вращая, вынимают из стакана. Избыток песка удаляют линейкой, чтобы поверхность его была на одном уровне с краями сосуда.
2. Стакан с грунтом взвешивают (m_1). Определяют плотность песка по формуле





$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V}, \text{ г/см}^3.$$

Данные определений заносят в табл. 17.5 лабораторной тетради.

Таблица 17.5. **Определение плотности песчаного грунта нарушенной структуры**

| Состояние грунта | Объем стакана $V, \text{ см}^3$ | Масса стакана, г | | Масса грунта $m_1 - m_0$ | Объемная масса грунта $\rho, \text{ г/см}^3$ |
|-------------------|------------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|--|
| | | пустого m_0 | с грунтом m_1 | | |
| Предельно плотное | | | | | |
| Предельно рыхлое | | | | | |

Метод режущего кольца

Данный метод применяют для связных грунтов, легко поддающихся вырезке, а также песчаных грунтов ненарушенного сложения и естественной влажности.

Порядок выполнения работы.

1. Определяют размеры и внутренний объем кольца.
2. Кольцо взвешивают на технических весах (m_0).
3. Зачистив поверхность грунта, ставят на нее кольцо острым режущим краем вниз. Придерживая кольцо рукой, острым ножом вырезают столбик грунта высотой 1 – 2 см и диаметром, равным внешнему диаметру кольца. Осторожно нажимая на верхний край кольца, насаживают его на столбик грунта. Вырезание столбика грунта и погружение кольца в грунт продолжается до полного его заполнения. В песчаные грунты, из которых не удастся вырезать столбик, кольцо вдавливают.
4. После заполнения кольца столбик грунта подрезают снизу ножом и отделяют кольцо с грунтом. Грунт, выступающий из кольца, срезают вровень с его краями.
5. Взвешивают кольцо с грунтом (m_1).
6. Определив массу грунта ($m = m_1 - m_0$), вычисляют его плотность по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ г/см}^3,$$

где m – масса грунта, г;

V – объем кольца, см^3 .

Для каждого образца грунта количество параллельных определений больше чем на 0,03 г/см^3 не допускается. Данные определений записывают в табл. 14.6.

Таблица 17.6. **Определение плотности грунта методом режущего кольца**

| Наименование грунта | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|
| Высота кольца, см | Диаметр кольца, см | Масса кольца, г | Масса кольца с грунтом, г | Масса грунта, г | Объем кольца, см^3 | Объемная масса грунта, г/см^3 |
| h | d | m_0 | m_1 | m | V | ρ |
| | | | | | | |





17.5. Плотность сухого грунта, пористость грунтов

Плотностью сухого грунта называется отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к занимаемому этим грунтом объему (включая имеющиеся в этом грунте поры):

$$\rho_d = \frac{m_c}{V},$$

где m_c – масса сухого грунта, г;
 V – объем образца, см³.

Плотность сухого грунта определяется по формуле

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 - 0,01 \cdot W},$$

где ρ – плотность грунта, г/см³;
 W – влажность грунта, %.

Пористостью n называют отношение объема пор к общему объему грунта. Пористость определяют по формуле

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \cdot 100\%,$$

Или

$$n = \frac{\rho}{(1 + 0,01 \cdot W)} \cdot 100\%,$$

где ρ – плотность грунта, г/см³;
 ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³;
 ρ_d – плотность сухого грунта, г/см³;
 W – весовая влажность, %.

Приведенной пористостью, или коэффициентом пористости, называется отношение объема пор к объему скелета грунта. Коэффициент пористости e выражается в долях единицы и вычисляется по следующим формулам:

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \quad \text{или} \quad e = \frac{n}{100 - n}.$$

Выделяют следующие виды песчаных грунтов по плотности сложения (табл. 14.7).





Таблица 17.7. Классификация песчаных грунтов по плотности сложения (СТБ 943–93)

| Виды песков | Плотность сложения песчаных грунтов (коэффициент пористости) | | |
|--|---|-------------------|------------|
| | Плотный | Средней плотности | Рыхлый |
| Песок гравелистый или средней крупности | $e < 0,55$ | $0,55 \leq 0,70$ | $e > 0,70$ |
| Песок мелкий | $e < 0,60$ | $0,60 \leq 0,75$ | $e > 0,75$ |
| Песок пылеватый | $e < 0,60$ | $0,60 \leq 0,80$ | $e > 0,80$ |

Для более общей характеристики песчаных грунтов по плотности находят относительную плотность, или степень плотности. Степень плотности выражается в долях единицы и рассчитывается по формуле

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}},$$

где e – коэффициент пористости песка естественного сложения;

e_{\max} – то же при рыхлом сложении;

e_{\min} – то же при плотном сложении.

Обычно песчаные грунты в зависимости от степени плотности разделяют на следующее категории: рыхлые при $I_d \leq 1/3$; средней плотности при $1/3 < I_d \leq 2/3$; плотные при $2/3 < I_d \leq 1$.

Степень влажности характеризует долю заполнения пор водой. Она выражается в долях единицы и определяется по формуле

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w},$$

где W – природная влажность, доли единицы;

ρ_s – плотность частиц грунта, г/см^3 ;

e – коэффициент пористости грунта природного сложения и влажности;

ρ_w – плотность воды, г/см^3 .

Выделяются разновидности (СТБ 943–93) крупнообломочных и песчаных грунтов по степени влажности S_r : маловлажные, $0 < S_r \leq 5$; влажные, $0,5 < S_r \leq 0,8$; насыщенные водой, $0,8 < S_r \leq 1$.

Данные по определению пористости n , коэффициента пористости e , степени плотности I_d и степени влажности для песчаных грунтов заносятся в табл. 14.8.





Таблица 17.8. **Характеристики, определяемые расчетом**
(плотность сухого грунта, пористость, коэффициент пористости, степень плотности и степень влажности)

| Наименование грунта | Состояние грунта | Плотность грунта ρ , г/см ³ | Влажность W , % | Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³ | Пористость n , % | Коэффициент пористости e | Степень плотности для песков $I_d = \frac{e_m}{e_{max}}$ | Степень влажности S_r |
|---------------------|------------------|---|-------------------|--|--------------------|----------------------------|--|-------------------------|
| | Плотное | | | | | | | |
| | Рыхлое | | | | | | | |

Лабораторная работа № 18. ИЗУЧЕНИЕ ВОДОПОДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И СООРУЖЕНИЙ НА НЕЙ В НАТУРЕ НА ПРИМЕРЕ РЫБОВОДНЫХ ХОЗЯЙСТВ

Цель работы:

1. Ознакомиться с водоподающей системой и сооружениями на ней.
2. Составить эскизы.
3. Кратко описать назначение водоподающей системы и сооружений на ней.

Водоподающая система осуществляет транспортировку воды от источника водоснабжения до рыбоводных хозяйств различного назначения. Основным элементом водоподающей системы является магистральный канал, который располагается выше отметок уровней воды в прудах. Для подвода воды к отдельным прудам рыбоводного хозяйства предусматривают ответвления. На каналах водоподающей системы в прудовых рыбоводных хозяйствах устраивают различные по своему назначению гидротехнические сооружения. Для регулирования расходов и горизонтов воды в начале магистрального канала устраивают шлюз-регулятор, а для отключения участков канала или отдельных ответвлений от него предусматривают перегораживающие сооружения. Для соединения отдельных участков магистрального канала устраивают сопрягающие сооружения.

В результате изучения водоподающей системы и сооружений на ней студенты должны ознакомиться с поперечными сечениями каналов и вычертить на миллиметровке с указанием основных размеров:

- 1) поперечный профиль магистрального канала;
- 2) эскиз водоподающего лотка или трубопровода;
- 3) план магистрального канала с сооружением на нем.

Необходимо также сделать краткое описание назначения водоподающего канала и устройства сооружений на нем в журнале лабораторных работ.

Лабораторная работа № 19. ИЗУЧЕНИЕ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЛА И РАБОТЫ РЕГУЛЯЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ





Цель работы:

1. На лабораторной установке изучить процесс возникновения русловых деформаций и мероприятия, воздействующие на эрозионную деятельность реки в необходимом направлении.
2. Ознакомиться с работой и воздействием на речной поток распространенных типов регуляционных сооружений.

19.1. Общие сведения

Под действием текущей воды происходит переформирование естественного русла и поймы реки. Это приводит к изменению формы русла, его деформации, что вызывает соответствующее изменение гидравлической структуры потока. Поток изменившейся гидравлической структуры снова влияет на форму русла, изменяет его. Такое взаимодействие русла и потока постоянно, пока существует река, и носит название *руслового процесса*.

Русловые процессы естественных водоемов не всегда дают возможность использовать их для водохозяйственных целей без соответствующего регулирования водного режима. Такое регулирование осуществляется при помощи искусственных защитных и регуляционных сооружений.

Одним из методов борьбы с местными размывами берегов и дна русла является отклонение струй от зоны размыва при помощи продольных струенаправляющих дамб или поперечных полузапруд (рис. 19.1), донных порогов (рис. 19.2), струенаправляющих щитов М.В. Потапова (рис. 19.3) и др.

Продольная струенаправляющая дамба отклоняет струи потока в сторону от размываемого (вогнутого) берега; при этом между дамбой и берегом создается вращательное движение воды вокруг вертикальной (или наклонной) оси, причем таких водоворотов бывает несколько. Скорость течения воды у берегов за дамбой и несколько ниже по течению уменьшается, благодаря значительной потере энергии на вращение водоворота и изменение направления струй. При этом не только прекращается размыв, но даже начинается отложение наносов между дамбой и берегом.

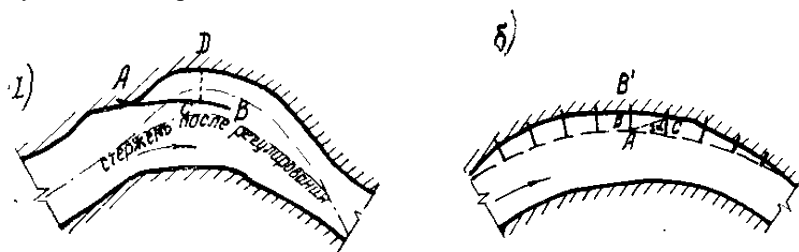


Рис. 19.1. Защита берега: а – струенаправляющей дамбой; б – полузапрудами



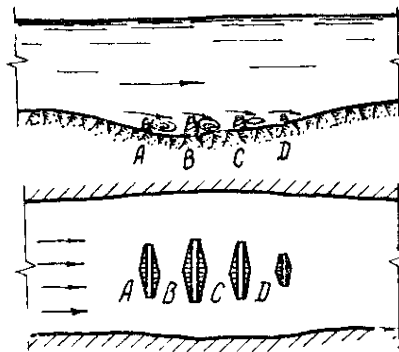


Рис. 19.2. Схема действия донных порогов

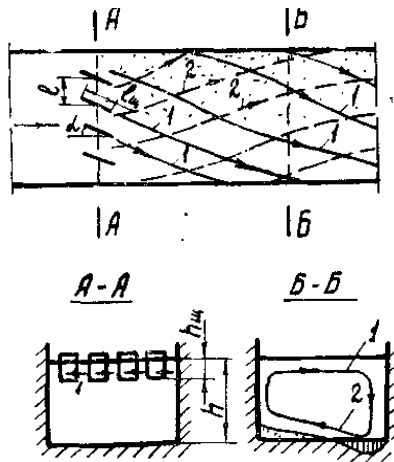


Рис. 19.3. Действие щитов М. В. Потапова

Действие поперечных полузапруд состоит в том, что поток, сжатый полузапрудой АВ (рис. 18.4), отклоняется от берега, затем снова приближается к нему в точке С. В зоне АВС образуются основной водоворот с вертикальной осью и несколько второстепенных; эти водовороты поглощают часть энергии потока, и скорости у берега значительно уменьшаются, прекращая его размыв. Следующую по течению полузапруду ставят несколько выше точки С – в точке Д.



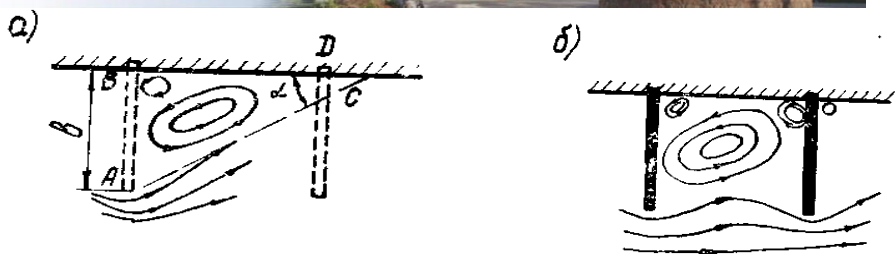


Рис. 19.4. Схема действия полузаপুরд

При местном размыве и углублении русла устраиваются на дне невысокие донные пороги (см. рис. 18.2), отклоняющие струи потока от дна. Благодаря этому создаются вихри с горизонтальной осью, что не только ведет к прекращению размыва, но и создает благоприятные условия для откладывания наносов у донных порогов.

Применение струенаправляющих щитов М. В. Потапова основано на использовании метода искусственной поперечной циркуляции. Если в потоке с размываемым дном установить систему плавающих щитов под определенным углом к течению потока (см. рис. 18.3), то они будут отклонять поверхностные струи к одному берегу, а донные – к противоположному. Образующееся винтовое движение обладает повышенной транспортирующей способностью в отношении донных наносов, которые будут откладываться на размываемых участках. Изменяя характер поперечной циркуляции, можно вызвать ее там, где она будет полезной в отношении размыва русла или отложения наносов.

19.2. Описание установки

Лабораторная установка представляет собой русловую площадку из речного песка размером в плане $1,0 \times 4,9$ м, выполненную в железобетонном лотке 1 (рис. 18.5). На русловой площадке формируется исследуемый участок русла 2. Вода подается в напорный бассейн 3 через специальный успокоитель 4.

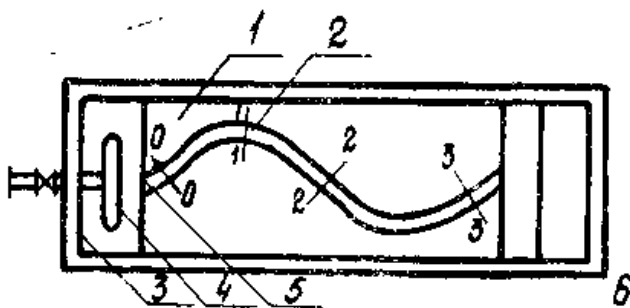




Рис. 18.5. Схема русловой установки

Для предотвращения выноса песка из лотка и выравнивания скоростей на выходе из напорного бассейна установлена латунная сетка 5. В конце лотка имеется загораживание, чтобы песок не смывался в сливной бак 6.

В плане русло извилистое и имеет постоянное по длине поперечное сечение параболической формы. Для изучения различного рода русловых деформаций на русловом участке выделены три зоны: верховая – между сечениями 0 – 0 и 1 – 1; средняя – между сечениями 1 – 1 и 2 – 2; низовая – между сечениями 2 – 2 и 3 – 3 (см. рис. 18.5).

В данной работе необходимо ознакомиться с действием следующих регулиционных сооружений:

- 1) продольная струна направляющая дамба;
- 2) поперечные полузапруды;
- 3) донный порог;
- 4) струна направляющие щиты М. В. Потапова.

19.3. Порядок выполнения работы

1. Знакомят с русловой установкой, фиксируют береговую линию вешками и в журнале лабораторных работ наносят форму русла по координатам.

2. После пуска воды визуальнo изучают режим участка русла. Устанавливают места береговых деформаций и их причины на выделенных зонах: верховой, средней и низовой.

3. После стабилизации деформаций русла вешками обозначают линии наибольших глубин и в журнал заносят деформированные участки русла; делают зарисовку характерных береговых и донных деформаций с их кратким описанием.

4. Отключают воду и на основании визуальной оценки деформаций русла устанавливают тот или иной тип регулиционного сооружения с целью воздействия на эрозионную деятельность потока в нужном направлении.

5. После установки регулиционных сооружений пускают поток воды в русло и изучают работу сооружений. Результаты наблюдений заносят в журнал и дают краткое описание работы сооружений, эффективность их действия на эрозионные процессы в русле.

В процессе наблюдений над характером потока необходимы следующие материалы:

- 1) легкие поплавки из кусочков дерева или кружочки плотной бумаги – для фиксации направления поверхностных струй, водоворотных зон, сбойных течений;
- 2) кристаллики марганцовокислого калия или вымоченные в воде опилки – для фиксации направления донных струй и донных водоворотных зон;
- 3) мелкий гравий – для крепления русла в местах сосредоточенного размыва и подмыва регулиционного сооружения.





Лабораторная работа № 20. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы:

- 1) изучить конструкции приборов для измерения избыточного и вакуумметрического давлений;
- 2) создавая в лабораторной установке различные давления, измерить их применяемыми приборами;
- 3) используя основное уравнение гидростатики, вычислить давления в местах подключения приборов, сопоставить их с опытными величинами.

20.1. Общие сведения

Давлением называют физическую величину, характеризующую напряжение в жидкости, т. е. равную силе, приходящейся на единицу площади. В энергетическом смысле давление представляет собой энергию, содержащуюся в единице объема жидкости. За единицу давления в системе СИ принят паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Ньютон (Н) – сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

Различают давление атмосферное, избыточное, абсолютное, вакуумметрическое.

Атмосферное давление – это давление столба воздуха на уровне моря. Для измерения его применяются приборы, называемые барометрами.

Так как приборы для измерения давлений чаще всего используются в атмосферных условиях, то за точку отсчета удобно принимать атмосферное давление. Давление, отсчитываемое от атмосферного в положительную сторону (выше атмосферного), называется избыточным или манометрическим ($p_{\text{и}}$, $p_{\text{ман}}$). Для измерения избыточного давления применяются приборы, называемые манометрами.

Сумму атмосферного и избыточного давлений называют абсолютным или полным давлением ($p_{\text{полн}}$). Если абсолютное давление меньше атмосферного, то их разность называют вакуумметрическим давлением ($p_{\text{вак}}$). Приборы для измерения вакуумметрического давления называются вакуумметрами.

Давление в любой точке покоящейся однородной жидкости можно вычислить по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, так называемое внешнее давление;

ρgh – давление столба жидкости, так называемое весовое, или гидростатическое, давление;

ρ – плотность жидкости;

h – глубина погружения точки под уровень жидкости.

Если в уравнении (1.1) $p_0 = p_{\text{ат}}$, а $p > p_{\text{ат}}$, то избыточное давление $p_{\text{и}} = p - p_{\text{ат}} = \rho gh$. В случае, когда $p_0 = p_{\text{ат}}$, то вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = p_{\text{ат}} - p =$





$ρgh$. Поэтому небольшие величины как избыточного, так и вакуумметрического давления можно измерить по высоте h столба жидкости в стеклянной трубке, один конец которой присоединяется к месту, где определяется давление, а второй сообщается с атмосферой (рис. 1, а, б, в). Простейший жидкостный манометр, изображенный на рис. 1, а, называется пьезометром. При значительных величинах избыточного или вакуумметрического давлений применяются U-образные стеклянные трубки, заполненные ртутью (рис. 1, б, в). Избыточное давление в точке А (рис. 1, б) согласно основному уравнению гидростатики вычисляется по формуле

$$p_A = g(\rho_{рт} h - \rho h_1),$$

где $\rho_{рт}$, ρ – соответственно плотности ртути и жидкости, давление в которой измеряется.

Вакуумметрическое давление в газовой среде (рис. 1, в)

$$p_{\text{вак}} = \rho_{рт} gh.$$

Так как плотность газа составляет весьма мизерную долю от плотности ртути, то влиянием высоты его столба в соединительном трубопроводе пренебрегают.

Однотрубные (чашечные) манометры (рис. 1, г) аналогичны U-образным, но одна часть трубки у них заменена сосудом значительно большего диаметра (чашкой), что позволяет сглаживать колебания уровня и делает более удобным измерение (от нуля, расположенного на уровне свободной поверхности). При небольших давлениях для повышения точности отсчета применяются чашечные манометры с наклонной трубкой (микроманометры), что увеличивает длину шкалы. В этом случае измеряемое избыточное давление

$$p = \rho g \ell \sin \alpha.$$

Для измерения разности давлений в двух точках используется дифференциальный манометр (рис. 1, д). Он представляет собой U-образную трубку, заполненную жидкостью с значительно большей плотностью, чем в местах измерения давления (чаще всего ртутью). Разность давлений (рис. 1, д)

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (\rho_{рт} - \rho)gh.$$

Для измерения больших давлений применяются механические манометры. Из них наиболее распространены пружинные манометры. На рис. 20.1, ж представлена схема манометра с трубчатой одновитковой пружиной. Трубчатая пружина имеет в сечении овальную форму, изготавливается из лагуни или стали. Один конец витка ее закреплен в штуцере 1, соединенном с измеряемой средой. Второй, запаянный конец пружины, через тягу 4 и зубчатую передачу 3 соединен со стрелкой 5. При повышении давления в полости пружины она раз-





гибается и поворачивает стрелку относительно шкалы б. В приборах самопишущих или с дистанционной передачей показаний применяются многovitковые трубочатые пружины.

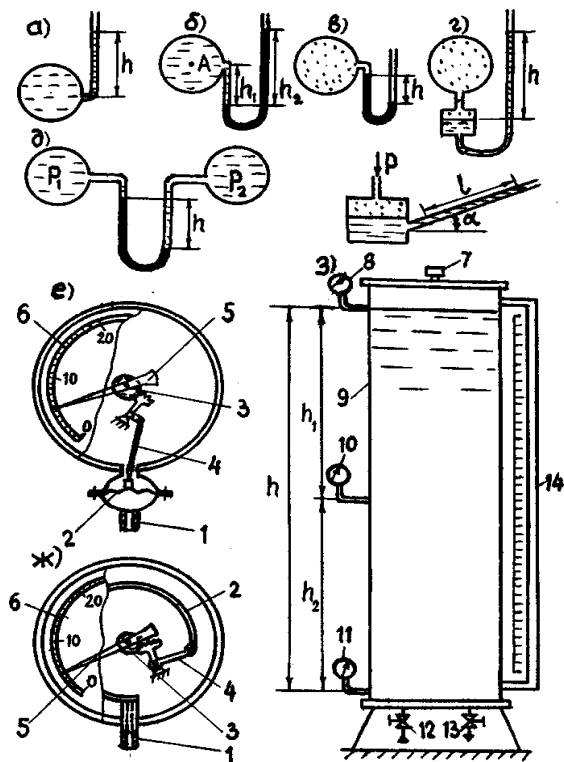


Рис. 20.1. Схема опытной установки.

Манометр, схема которого представлена на рис. 1, е, отличается тем, что основной рабочий элемент его – пружина 2 – имеет пластинчатую форму. Пружина зажата между двумя половинами корпуса. Нижняя полость соединяется через штуцер 1 с измеряемой средой, верхняя – сообщается с атмосферой. При повышении давления в нижней полости пружина прогибается и через шток 4, зубчатую передачу 3 воздействует на стрелку 5, которая поворачивается по шкале б.

Механические пружинные вакуумметры работают по тому же принципу, что и пружинные манометры. Различие лишь в том, что трубчатая или пластинчатая пружина под действием вакуума перемещается в противоположную сторону. Выпускаются также комбинированные приборы – мановакуумметры, позволяющие измерять как избыточное, так и вакуумметрическое давления. В





них нуль расположен в середине шкалы. При избыточном давлении стрелка перемещается в сторону положительных, а при вакуумметрическом давлении – в сторону отрицательных значений.

Выпускаются также пружинные дифференциальные манометры. Принцип действия такого прибора можно пояснить, используя рис. 1, е. Если нижнюю камеру (под пружиной) соединить трубкой с одной точкой измеряемой среды, а верхнюю (над пружиной) – с другой точкой, то прогиб пружины будет соответствовать разности давлений в измеряемых точках, что и определится по положению стрелки 5 на шкале 6. Чтобы стрелка перемещалась по шкале в нужном направлении, штуцер с большим давлением помечается знаком «+», а с меньшим – знаком «-».

Для измерения небольших величин давления и разрежения выпускаются также механические сильфонные манометры и вакуумметры. Чувствительным элементом у них является сильфон, представляющий собой гофрированную тонкостенную трубку из высокопрочного сплава, которая помещена в корпус. При изменении давления меняется длина сильфона. Перемещение свободного конца сильфона посредством тяги передается стрелке прибора.

Для измерения давлений в различных пределах выпускаются также электрические манометры, принцип действия которых основан на использовании различного рода электрических явлений: на способности пьезоэлектрических материалов создавать электродвижущую силу, тензорезисторов менять электрическое сопротивление под нагрузкой и др.

Такие приборы обычно имеют более сложную конструкцию.

20.2. Описание установки

Лабораторная установка. Сосуд, представляющий собой вертикальную трубку 9 (рис. 1, з), закрытую с обоих торцов крышками, заполняется водой через вентиль 12 из напорного бака лаборатории или насосной станции, что позволяет создавать в нем избыточные давления различной величины. При выпуске части воды через вентиль 13 вверху сосуда образуется вакуум. Для измерения избыточных давлений в нижней и средней частях сосуда присоединены манометры 11 и 10, а в верхней – мановакуумметр 8. Уровень воды в сосуде определяется по пьезометру 14. Открыв пробку 7 в верхней крышке, можно создать атмосферное давление на свободной поверхности воды.

20.3. Порядок выполнения работы

Всего проводятся три опыта, различающихся между собой величинами давлений в сосуде, в приведенном ниже порядке.

1. При открытых вентиле 12 и пробке 7, закрытом вентиле 13 сосуд 9 заполняется водой полностью, затем пробка 7 закрывается, создается избыточное давление в точке присоединения мановакуумметра 8. Измеряются давления манометрами 10, 11 и мановакуумметром 8.





2. Открывается вентиль 13 и выпускается часть воды из сосуда 9, чтобы прибор 8 показывал вакуумметрическое давление и $h > h_2$, вентили 13 и 12 закрываются, проводится измерение давлений приборами 8, 10, 11, измеряется показание h пьезометра 14.

3. Открывается пробка 7 для сообщения верхней части сосуда с атмосферой; регистрируются показания всех приборов.

Результаты опытов и их обработки записываются в табл. 20.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 20.1. Результаты измерения и обработки опытных данных

| № п.п. | Наименование | Единица измерения | Номера опытов | | |
|--------|---|-------------------|---------------|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Показание пьезометра | мм | | | |
| 2 | Показание мановакуумметра p_m | Па | | | |
| 3 | Показание первого манометра p_{m1}^{on} | Па | | | |

Продолжение табл. 20.1

| | | | | | |
|---|---|----|--|--|--|
| 4 | Вычисленное давление в точке подсоединения первого манометра p_{m1}^B | Па | | | |
| 5 | Относительная разность Δp_1 | % | | | |
| 6 | Показания второго манометра p_{m2}^{on} | Па | | | |
| 7 | Вычисленное давление в точке подсоединения второго манометра p_{m2}^B | Па | | | |
| 8 | Относительная разность Δp_2 | % | | | |

Постоянные величины: $h_1 =$ см; $h_2 =$ см; $p_{ат} =$ кПа.

По полученным результатам измерений выполняются следующие вычисления:

1) при отсутствии в сосуде свободной поверхности жидкости (в первом опыте) избыточные давления на уровнях 1 – 1 и 2 – 2 определяются по следующим формулам:

$$p_{m1} = p_{мв} + \rho g h_1,$$

$$p_{m2} = p_{m1} + \rho g h_2 = p_{мв} + \rho g (h_1 + h_2);$$

2) при наличии в сосуде свободной поверхности жидкости (во втором и третьем опытах) избыточные давления определяются по зависимостям

$$p_{m1} = p_{мв} + \rho g (h + h_2),$$

$$p_{m2} = p_{m1} + \rho g h_2 = p_{мв} + \rho g h;$$





3) определяются абсолютные (полные) давления жидкости в плоскостях 1 – 1 и 2 – 2

$$p_{n.i} = p_{m.i} + p_{am};$$

4) по каждому опыту определяется относительное отклонение (в %) расчетного значения давления от опытного:

$$\Delta p = \left(\frac{p_m}{p_{on}} - 1 \right) 100 .$$

Лабораторная работа № 21. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Цель работы:

- 1) определить силу гидростатического давления на плоскую поверхность опытным путем;
- 2) вычислить эту силу для условий опытов;
- 3) сопоставить полученные результаты.

21.1. Общие сведения

Сила гидростатического давления жидкости на ограниченную плоскую поверхность для условий (рис. 3), когда внешнее давление равно атмосферному, определяется по формуле

$$F_p = \rho g h_{ц.т} \omega ,$$

где $h_{ц.т}$ – глубина погружения центра тяжести рассматриваемой поверхности;
 ω – площадь этой поверхности.

Так как плоская поверхность правильной формы имеет ось симметрии, то точка приложения силы, т. е. центр давления, будет находиться на ней и определяться одной ординатой относительно линии уреза жидкости (ось ОХ):

$$l_o = l_{ц.т} + \frac{I_0}{l_{ц.т} \omega} ,$$

где $l_{ц.т}$ – ордината центра тяжести площади ω (при вертикальном расположении этой площади она равна $h_{ц.т}$);

I_0 – момент инерции площади ω относительно оси, проходящий через центр тяжести ее параллельно оси ОХ.

Центр давления расположен ниже центра тяжести площади ω на величину эксцентриситета:





$$e = \frac{I_0}{I_{ц.т.}\omega}$$

21.2. Описание установки

Рассматриваемой плоской поверхностью является круглый клапан 2 (рис. 21.1.), закрывающий отверстие в стенке резервуара 1, наполненного водой. Клапан посредством рычага 4 шарнирно прикреплен к стенке резервуара и может поворачиваться относительно оси К под действием грузов δ , подвешенных на тросе, который уложен на блоки 3 и присоединен к рычагу 4. Задвижки 6 и 7 предназначены соответственно для наполнения резервуара водой и сброса ее. Глубина погружения центра тяжести клапана измеряется пьезометром 5.

21.3. Порядок выполнения работы

1. Замеряются диаметр d клапана 2, плечи l и l_1 рычага 4.
2. Подбирается масса груза (противовеса) $m_{пр}$, достаточная для преодоления сил трения и веса клапанного устройства при его открытии при незаполненном резервуаре водой.
3. Резервуар заполняется водой.
4. На подвеску устанавливаются грузы массой $m_{гр}$.

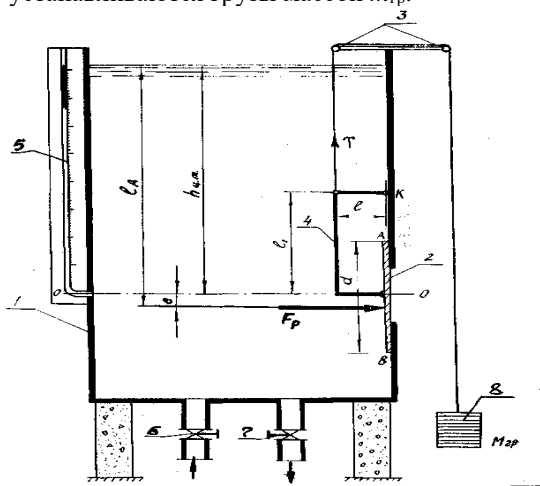


Рис. 21.1. Схема опытной установки.

5. Открывается задвижка 7, уровень воды в резервуаре понижается. В момент открытия клапана, определяемый визуально по вылету струи из отверстия и падению грузов, фиксируется показание пьезометра 5, т.е. величина $h_{ц.т.}$. Опыты проводятся для трех различных значений массы грузов. Результаты измерений записываются в табл. 21.1 журнала лабораторных работ.





Т а б л и ц а 21.1. Результаты измерения и обработки опытных данных

| № п.п. | Наименование | Единица измерения | Номера опытов | | |
|-----------|---|----------------------|------------------|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Глубина погружения центра тяжести клапана $h_{ц.т.}$ | см | | | |
| 2 | Масса груза $m_{гр}$ | кг | | | |
| 3 | Подъемное усилие T | Н | | | |
| 4 | Величина эксцентриситета e | см | | | |
| 5 | Сила гидростатического давления: опытная $F_{оп}$ вычисленная F_p | Н Н | | | |
| 6 | Относительная разность ΔF | % | | | |

Постоянные величины: диаметр клапана $d =$ см; площадь клапана $\omega =$ см²; плечо $\ell =$ см; $\ell_1 =$ см; масса противовеса $m_{пр} =$ кг.

Обработка результатов.

1. Определяется подъемное усилие открытия клапана:

$$T = (m_{гр} - m_{пр})g.$$

2. Вычисляется величина эксцентриситета, соответствующая полученному значению $h_{ц.т.}$, при котором открылся клапан:

$$e = \frac{I_0}{l_{ц.т.}\omega} = \frac{d^2}{16h_{ц.т.}}$$

3. Из уравнения моментов сил относительно оси К определяется опытное значение силы гидростатического давления на клапан:

$$F_{он} = T \frac{\ell}{\ell_1 + e}.$$

4. Вычисляется расчетная величина силы гидростатического давления, соответствующая полученному в опыте значению $h_{ц.т.}$.

5. Относительное отклонение (в %) расчетного значения силы гидростатического давления от опытного определяется по формуле

$$F_{от} = \left(\frac{F_p}{F_{он}} - 1 \right) 100.$$

Все результаты вычислений также заносятся в табл. 21.1.





Лабораторная работа № 22. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВАНИЯ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ

Цель работы:

- 1) определить плавучесть и остойчивость тела в жидкости опытным путем;
- 2) вычислить плавучесть и остойчивость тела в жидкости для условий опытов;
- 3) сопоставить опытные и вычислительные величины по плавучести и остойчивости тела.

22.1. Общие сведения

В лабораторной работе будет изучаться только надводное плавание тел в жидкости – плавучесть и остойчивость.

П л а в у ч е с т ь ю тела называется способность тела плавать в полупогруженном состоянии. Условие плавания тела выражается равенством

$$F_A = gM = G,$$

где M – масса тела;

F_A – результирующая сила давления жидкости на погруженное в нее тело – архимедова сила, которая направлена вверх и проходит через центр тяжести водоизмещения.

Архимедова сила F_A находится по формуле

$$F_A = \rho g W,$$

где ρ – плотность жидкости, в которую погружено тело;

W – объем жидкости, вытесненный телом, или водоизмещение.

О с т о й ч и в о с т ь ю называется способность плавающего тела при отклонении в заданных пределах от положения равновесия возвращаться в это положение после прекращения действия отклоняющих сил. В изучаемом курсе гидравлики рассматривается остойчивость при надводном плавании тел, при малых углах крена ($\alpha < 15^\circ$). В этом случае считается, что центр водоизмещения D перемещается по некоторой дуге, проведенной из точки пересечения линии действия силы F_A с осью плавания $O - O$. Эта точка называется метацентром (рис. 22.1, точка M).



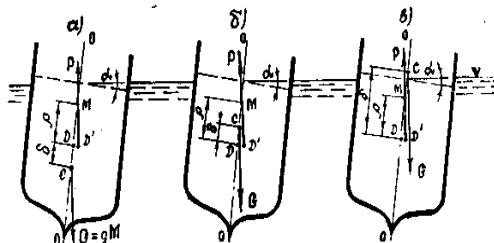


Рис. 22.1. Схема к расчету остойчивости плавающего тела.

Остойчивость плавающего тела зависит от положения центров тяжести C и водоизмещения D , а также метacentра M . Рассмотрим различное расположение этих центров:

а) центр тяжести C плавающего тела расположен ниже центра водоизмещения D . Тогда восстанавливающий момент равен (рис. 22.1, а):

$$M_B = F_A \rho_0 \sin \alpha + G \delta \sin \alpha$$

где ρ_0 – метacentрический радиус, т. е. расстояние между центром водоизмещения D и метacentром M ;

δ – расстояние между центрами тяжести C и водоизмещения D .

Метacentрический радиус находится по формуле

$$\rho_0 = \frac{I_0}{W},$$

где I_0 – момент инерции плоскости плавания относительно продольной оси (рис. 22.2).

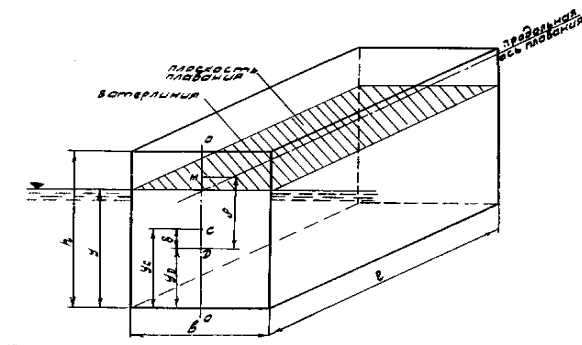


Рис. 22.2 Схема к расчету плавучести тела.





Из уравнения следует, что в этом случае плавающее тело всегда устойчиво, так как силы F_A и G стремятся восстановить плавающее тело в первоначальное положение;

б) центр тяжести C плавающего тела расположен выше центра водоизмещения D . Тогда восстанавливающий момент равен (рис. 22.1, б):

$$M_b = F_A \rho_0 s \sin \alpha - G \delta s \sin \alpha.$$

Плавающее тело будет устойчивым, если восстанавливающий момент будет положительным. Так как $F_A = G$, то из уравнения следует, что тело будет устойчивым при условии

$$\rho_0 - \delta > 0 \text{ или } \rho_0 > \delta ;$$

в) если центр тяжести C плавающего тела расположен выше метacentра M , то тело неустойчиво; возникающая пара сил G и F_A стремится увеличить крен (рис. 22.1, в), т. е.

$$\rho_0 - \delta < 0 \text{ или } \rho_0 < \delta .$$

22.2. Описание установки

Для проведения опытов имеется резервуар с жидкостью, набор образцов плавающих тел простой геометрической формы (параллелепипед, призма, цилиндр), выполненных из материалов различной плотности, весы для определения массы образцов.

22.3. Порядок выполнения работы

В работе предусматривается три опыта, которые отличаются между собой формой плавающего тела и плотностью материала.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) измеряются размеры плавающего тела и определяется его масса;
- 2) образец опускается в жидкость и определяется его осадка y (глубина погружения в жидкость наинижней точки смоченной поверхности);
- 3) создается крен плавающего тела в пределах $10 - 15^\circ$ и фиксируется его возможность возвращения в первоначальное положение.

Результаты измерений и наблюдений заносятся в журнал лабораторных работ (табл. 4.1).

В качестве примера показан расчет условия плавания однородного тела формы параллелепипеда (рис. 5). При этом рекомендуется следующий порядок вычислений:

- 1) вычисляется плотность образца $\rho_m = M / W_0$,

где W_0 – объем образца;

- 2) исходя из условия плавания тела ($F_A = G$) вычисляется осадка образца:





Т а б л и ц а 22.1. Результаты измерений и обработка опытных данных

| № п.п. | Наименование | Единица измерения | Форма образца | | |
|-----------|---|-------------------|---------------|--|--|
| | | | | | |
| 1 | Размер образца: длина ℓ | см | | | |
| | ширина b | см | | | |
| | высота h | см | | | |
| 2 | Объем образца W_0 | см ³ | | | |
| 3 | Масса образца M | г | | | |
| 4 | Плотность материала образца ρ | г/см ³ | | | |
| 5 | Осадка образца: опытная $y_{оп}$; вычисленная $y_{выч}$ | см | | | |
| 6 | Расстояние до центра тяжести y_c | см | | | |
| 7 | Расстояние до центра водоизмещения y_p | см | | | |
| 8 | Расстояние между центром тяжести и центром водоизмещения δ | см | | | |
| 9 | Момент инерции плоскости плавания I_0 | см ⁴ | | | |

Продолжения табл.22.1

| | | | | | |
|----|----------------------------------|-----------------|--|--|--|
| 10 | Объем водоизмещения W | см ³ | | | |
| 11 | Метацентрический радиус ρ_0 | см | | | |
| 12 | Условие устойчивости: опытной | | | | |
| | по данным вычислений | | | | |

$$y = \frac{\rho_m}{\rho} h,$$

где ρ – плотность жидкости;

h – высота образца;

3) вычисляется метацентрический радиус:

$$\rho_0 = \frac{I_0}{W} = \frac{b^2}{12y};$$

4) вычисляется расстояние между центрами тяжести и водоизмещения:

$$\delta = y_c - y_p = 0,5(h - y);$$

5) сравниваются значения метацентрического радиуса ρ_0 и δ . При

$$\rho_0 > \delta \text{ — тело устойчиво,}$$

$$\rho_0 < \delta \text{ — тело неустойчиво;}$$

6) в результате проведенных опытов и вычислений дается заключение об устойчивости плавающего тела.

Лабораторная работа № 23. ИССЛЕДОВАНИЕ





И ГРАФИЧЕСКАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы:

- 1) на лабораторной установке определить по показаниям трубок Пито и пьезометров составляющие полной удельной энергии в центрах тяжести трех различных по площади сечениях потока;
- 2) проанализировать визуально во время опытов и по подсчетам преобразование одного вида энергии в другой при изменении положения и площади сечения потока;
- 3) построить по результатам опытов схематично линии, показывающие изменение полной и потенциальной удельных энергий в сечениях потока вдоль пути его движения.

23.1. Общие сведения

Если в потоке несжимаемой жидкости действуют из массовых сил только сила тяжести, то выражение полной удельной энергии в любой точке можно представить в следующих трех вариантах:

$$E_G = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}, \quad (23.1)$$

$$E_w = \rho g z + p + \frac{u^2}{2} \rho, \quad (23.2)$$

$$E_m = g z + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}, \quad (23.3)$$

где z – превышение рассматриваемой точки над выбранной плоскостью отсчета (сравнения);

p , u – соответственно гидростатическое давление и скорость движения жидкости в этой точке.

Формула (23.1) выражает энергию, приходящуюся на единицу веса (м), (23.2) – на единицу объема (Па), (23.3) – на единицу массы жидкости ($\text{м}^2/\text{с}^2$). Тогда удельной энергией в сечении потока называется энергия, приходящаяся на единицу количества (веса, объема, массы) жидкости.

В гидравлике широко применяется запись (23.1). Три составляющие правой части этого уравнения имеют следующий физический смысл:

z – удельная потенциальная энергия положения точки над плоскостью сравнения (геометрический напор);

$\frac{p}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия давления жидкости в точке (пьезометрический напор);





$\frac{u^2}{2g}$ – удельная кинетическая энергия (скоростной напор).

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии в потоке жидкости. Оно устанавливает связь между удельными энергиями в двух любых сечениях потока. Если использовать запись (23.1) применительно не к точкам, а к сечениям потока, то уравнение Бернулли представляется в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{TP}, \quad (23.4)$$

где V_1, V_2 – средние скорости движения жидкости в первом и втором сечениях потока;

α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии в этих сечениях;

h_{TP} – потери энергии при движении жидкости от первого сечения ко второму.

Полная удельная энергия в первом сечении потока отличается от полной удельной энергии во втором сечении на величину потерь h_{TP} .

При изменении положения и площади сечения потока происходит преобразование одного вида энергии в другой. Уравнение (23.4) позволяет находить одну из неизвестных, составляющих полной удельной энергии, если известны все остальные.

23.2. Описание установки

В наклонный трубопровод 4 (рис. 6) переменного сечения поступает вода из резервуара 1, питаемого через задвижку 3; постоянный уровень воды в резервуаре поддерживается с помощью переливного устройства 2.

В центрах тяжести трех сечений трубопровода 4, расположенных на определенных расстояниях одно от другого, подключены трубки Пито и пьезометры. Трубка Пито (изогнутая навстречу потоку) служит для измерения полной удельной энергии, пьезометр – удельной потенциальной энергии давления.

Расход воды в опытном трубопроводе 4 регулируется задвижкой 5. Измеряется он объемным способом. Для этого поворотный желоб 7 наклоняется в сторону мерного резервуара 8 и определяется высота наполнения последнего по пьезометру 6 за время t . Сброс воды и опорожнение мерного резервуара производится через задвижки 9 и 10.

23.3. Порядок выполнения работы

1. С помощью задвижек 5 и 3 устанавливается определенный расход воды в опытном трубопроводе. При этом нужно добиться, чтобы показания пьезометров и трубок Пито стабилизировались.
2. Измеряется для каждого сечения удельная энергия положения – высота z от принятой плоскости сравнения до центра тяжести сечения.
3. Во всех трех сечениях по пьезометрам определяется





удельная энергия давления $\frac{p}{\rho g}$, а по трубкам Пито – сумма удельных энергий

давления и кинетической $\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} \right)$.

4. Поворотом желоба 7 поток направляется в мерный резервуар 8 и по секундомеру определяется время t , в течение которого уровень в пьезометре 6 поднимается на заданную высоту h .

5. Измеряются расстояния L_1 и L_2 между сечениями опытного трубопровода и площадь сечения в плане мерного резервуара.

Измеренные и вычисленные показатели заносятся в табл. 5.1 журнала лабораторных работ.

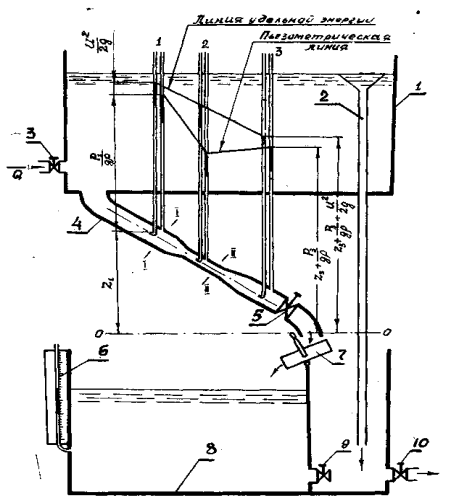


Рис. 23.1 Схема установки для демонстрации уравнения Бернулли.

Постоянные величины: объем воды в мерном баке $W = b\ell h = \text{см}^3$; размеры мерного бака в плане $b = \text{см}$; $\ell = \text{см}$; показание пьезометра на мерном баке $h = \text{см}$; время наполнения мерного бака $t = \text{с}$; расход потока $Q = W/t = \text{см}^3/\text{с}$.

Т а б л и ц а 23.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

| № п.п. | Наименование | Единица измерения | Номера сечений | | |
|--------|--------------------------|-------------------|----------------|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Диаметр трубопровода d | см | | | |
| 2 | Площадь сечения ω | см ² | | | |
| 3 | | см | | | |





| | | | | | |
|----|---|------|--|--|--|
| 4 | Высота z | см | | | |
| 5 | Показания пьезометров $p/(\rho g)$ | см | | | |
| | Пьезометрический напор $z + p/(\rho g)$ | | | | |
| 6 | | см | | | |
| 7 | Показание трубок Пито $p/(\rho g) + u^2/(2g)$ | см | | | |
| 8 | Полный напор по показанию приборов H | см | | | |
| 9 | Потери напора по показаниям приборов $h_{тр}$ | см/с | | | |
| 10 | Средняя скорость в сечениях потока V | | | | |
| | Скоростной напор, вычисленный по средней скорости $\alpha V^2/(2g)$ | см | | | |
| 11 | | см | | | |
| 12 | Полный напор по средней скорости $H' [5+10]$ | | | | |
| | Потери напора, вычисленные по средней скорости $h'_{тр}$ | см | | | |
| 13 | | см | | | |
| 14 | Расстояние между сечениями L | см | | | |
| | Гидравлический уклон $I = h'_{тр}/L$ | | | | |

1. По показаниям трубки Пито и пьезометра в каждом сечении вычисляются соответственно полная удельная энергия E_G (полный напор H) (5.1) и удельная

потенциальная энергия $z + \frac{p}{\rho g}$ относительно принятой плоскости сравнения.

2. Потери напора между соседними сечениями трубопровода равны разности полных напоров в этих сечениях:

$$h_{тр} = H_1 - H_2. \quad (23.5)$$

3. Расход жидкости в опытном трубопроводе и средняя скорость в сечении определяются соответственно по следующим формулам:

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{\omega l h}{t}, \quad (23.6)$$

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (23.7)$$

где W – объем жидкости, поступившей в мерный резервуар за время опыта;
 ω – площадь сечения трубопровода.

4. Вычисляется удельная кинетическая энергия (скоростной напор) $\frac{\alpha v^2}{2g}$ и

полная удельная энергия (полный напор) $H' = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ по средней скорости потока в каждом сечении. Так как режим движения в трубопроводе турбулентный, то коэффициент кинетической энергии $\alpha = 1,13 \dots 1,0$ (с повышением турбулентности он уменьшается и для условий данной лабораторной установки может быть принят близким к 1,0).

5. По полным напорам, вычисленным с учетом средних скоростей, определяются аналогично (5.5) потери напора $h'_{тр}$, а также гидравлический уклон между соседними сечениями:





$$I = \frac{h'_{mp}}{L} \quad (23.8)$$

По полученным результатам опытов строятся графики изменения полной и потенциальной удельных энергий потока вдоль пути его движения, пример построения которых для исследуемого трубопровода (см. рис. 6) показан на рис. 7.

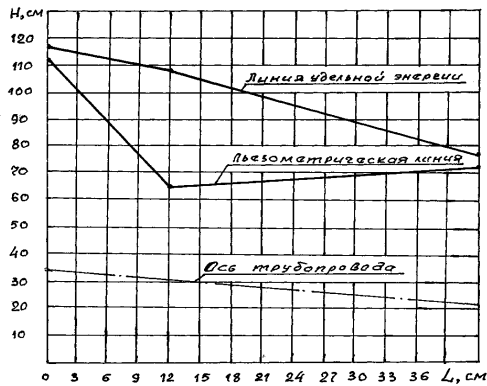


Рис. 23.2. Пьезометрическая линия и линия полной удельной энергии.

Для построения линии полной удельной энергии используются ее значения, подсчитанные по средним скоростям в сечениях потока.

Лабораторная работа № 24. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы:

- 1) установить визуально наличие ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости;
- 2) вычислить по результатам каждого опыта критерий Рейнольдса и дать заключение о режиме движения жидкости.

24.1. Общие сведения

Наблюдения за поведением частиц жидкости при ее движении позволили установить два вида движения жидкости, которые различаются разными зависимостями сил трения от скорости движения (Д. И. Менделеев, 1880). В дальнейшем поведение частиц жидкости при их движении будем называть режимом движения. Это ламинарный (слоистый) и турбулентный (беспорядочный) виды движения.





При ламинарном режиме все струйки движутся параллельно друг другу без заметного перемешивания слоев. Такое течение наблюдается в диапазоне сравнительно малых скоростей. Это легко видеть, если в поток жидкости, протекающей в стеклянной трубе, ввести окрашенную струйку с плотностью, близкой к окружающей жидкости. При ламинарном режиме движения подкрашенная струйка будет выделяться, не смешиваясь с основным потоком, по всей длине стеклянной трубы.

Если же постепенно увеличивать расход, то при некоторой возросшей скорости траектория струйки становится волнистой. Если после этого еще более увеличивать скорость, то подкрашенная струйка полностью рассеивается в основной массе движущегося потока. В этом случае наблюдавшееся ранее ламинарное движение переходит в турбулентное.

При постепенном уменьшении скорости движения потока явление повторяется в обратном порядке. Однако переход от турбулентного режима к ламинарному происходит при скорости, меньшей той, при которой наблюдается переход от ламинарного движения к турбулентному. Скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется *критической*. Исследованиями О. Рейнольдса было выявлено существование двух критических скоростей: одной – при переходе ламинарного режима в турбулентный режим, она называется верхней критической скоростью $V_{в.кр}$, другой – при переходе турбулентного режима в ламинарный режим, она называется нижней критической скоростью $V_{н.кр}$. Исследованиями также доказано, что значение верхней критической скорости зависит от внешних условий опыта: постоянства температуры, уровня вибрации опытной установки и т.д. Нижняя критическая скорость в широком диапазоне изменения внешних условий остается практически неизменной. Опытами было установлено, что нижняя критическая скорость для потока в кругло - цилиндрической трубе пропорциональна кинематической вязкости ν исследуемой жидкости и обратно пропорциональна диаметру трубы d :

$$V_{н.кр} = \kappa \nu / d \quad (24.1)$$

Коэффициент пропорциональности κ оказался одинаковым для различных V и d :

$$\kappa = V_{н.кр} d / \nu. \quad (24.2)$$

В честь О. Рейнольдса этот коэффициент был назван критическим числом Рейнольдса и обозначен $Re_{кр}$.

Для любого потока по известным V , d , ν можно составить и вычислить число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (24.3)$$

и сравнить его с критическим значением $Re_{кр}$. Если $Re < Re_{кр}$, то $V < V_{н.кр}$ и режим движения жидкости ламинарный; если $Re > Re_{кр}$, то $V > V_{н.кр}$ и режим движения, как правило, турбулентный.





Так как переход от устойчивого ламинарного режима к устойчивому турбулентному движению жидкости не происходит мгновенно, то в некотором диапазоне скоростей намечается переходный режим, который принято относить к турбулентному.

В общем случае число Рейнольдса определяется безразмерным комплексом

$$\text{Re} = \frac{Vl}{\mu/\rho} = \frac{Vl}{\nu}, \quad (24.4)$$

составленным из четырех величин: динамической вязкости μ , плотности жидкости ρ , характерного геометрического размера живого сечения l и средней скорости потока V .

Поскольку характерный размер живого сечения выбирается произвольно, число Рейнольдса имеет индекс, указывающий выбранную линейную величину. Чаще всего в качестве характерных линейных величин принимают диаметр трубы d , гидравлический радиус R или глубину потока в открытом русле (канале) h . Тогда

$$\text{Re}_d = Vd/\nu; \quad \text{Re}_R = VR/\nu; \quad \text{Re}_h = Vh/\nu. \quad (24.5)$$

Число Re_d в учебной и справочной литературе обычно обозначается без индекса.

Критическое число Рейнольдса для потоков, в которых в качестве характерной линейной величины принят гидравлический радиус R , составляет

$$\text{Re}_{крR} = V_{н.кр} R/\nu = 580.$$

24.2. Описание установки

Установка состоит из напорного резервуара 4 (рис. 10), стеклянной трубы 5, сливной воронки для поддержания постоянного напора, зажимов 3 и 6 на резиновых трубках, регулирующих подачу жидкости в приборе, трубки 1 для ввода в стеклянную трубу подкрашенной струйки, колбы 2 с окрашенной жидкостью и напорной линии с вентилем, с помощью которых производится подача жидкости в резервуар.

24.3. Порядок выполнения работы

В работе выполняются четыре опыта, различающихся между собой режимом движения потока в стеклянной трубе.

Порядок проведения опытов приведен ниже.

1. Устанавливаем такую подачу воды, чтобы уровень жидкости в резервуаре 4 сохранялся постоянным, при этом должен быть небольшой перелив через сливную воронку.





2. Производится небольшое открытие зажима b и в стеклянную трубку 5 подается подкрашенная струйка.
 3. По визуальным наблюдениям за поведением подкрашенной струйки устанавливается режим движения жидкости.
 4. Определяется время t наполнения мерного цилиндра и объем жидкости W .
 5. Замеряется температура T жидкости и по табл. 1 приложения устанавливается кинематическая вязкость воды.
- Поддерживая постоянный уровень жидкости в резервуаре 1 и постепенно увеличивая расход, опыты повторяют. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 24.1 журнала лабораторных работ.
1. Определяется площадь сечения трубы 5 , расход $Q = W/t$ и средняя скорость потока $V = Q/\omega$.
 2. Вычисляется число Рейнольдса по зависимости (24.3).
 3. Сопоставляются полученные во всех опытах числа Рейнольдса с критическим $Re_{кр} = 2320$ и устанавливается режим движения жидкости.
 4. Эти результаты сопоставляются с визуальными наблюдениями и дается заключение о соответствии критерия Рейнольдса данным опытов.

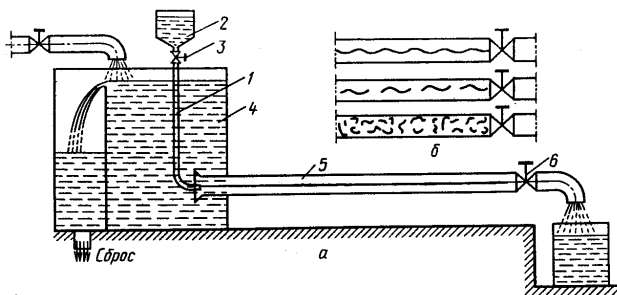


Рис. 24.1. Схема опытной установки.

Постоянные величины: диаметр трубы $d =$ см; площадь сечения трубы $\omega =$ см².

Т а б л и ц а 24.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

| № п.п. | Наименование | Единица измерения | Номера опытов | | | |
|--------|---------------------------------------|--------------------|---------------|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Объем воды в мерном цилиндре W | см ³ | | | | |
| 2 | Время наполнения мерного цилиндра t | с | | | | |
| 3 | Расход Q | см ³ /с | | | | |
| 4 | Средняя скорость V | см/с | | | | |
| 5 | Температура воды T | °С | | | | |





| | | | | | | |
|---|---|--------------------|--|--|--|--|
| 6 | Кинематический коэффициент вязкости ν | см ² /с | | | | |
| 7 | Число Рейнольдса Re | — | | | | |
| 8 | Режим движения: наблюдаемый вычисленный | — — | | | | |

Лабораторная работа № 25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы:

- 1) провести на лабораторной установке необходимые опыты и определить коэффициенты $\zeta_{м}^{оп}$ нескольких местных сопротивлений (по указанию преподавателя);
- 2) найти в справочных материалах коэффициенты $\zeta_{м}^T$ для аналогичных местных сопротивлений для условий опытов;
- 3) сравнить полученные опытные величины со справочными.

25.1. Общие сведения

Местными гидравлическими сопротивлениями называются элементы трубопроводов, каналов, в которых потери энергии происходят за счет деформации потока и вызваны изменением размеров или их конфигурации. Причинами этих потерь являются изменение скорости, отрыв транзитного потока от стенок и вихреобразование. В местном гидравлическом сопротивлении часть механической энергии, которой обладает поток, переходит в тепло и рассеивается в нем.

К простейшим местным сопротивлениям относятся внезапные или постепенные расширения, сужения и повороты канала, трубопровода. Более сложные сопротивления (например, вентиль, клапан и др.) представляют собой соединения или комбинации перечисленных простейших сопротивлений.

Потери напора в любом местном сопротивлении можно определить по формуле Вейсбаха:

$$h_M = \zeta_{M1} \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_{M2} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (25.1)$$

где ζ_{M1} – коэффициент местного гидравлического сопротивления, определенный по скорости V_1 в трубе перед местным гидравлическим сопротивлением; ζ_{M2} – коэффициент местного гидравлического сопротивления, определенный по скорости V_2 в трубе за местным гидравлическим сопротивлением.

Для простоты пользования литературными источниками по определению коэффициентов местных гидравлических сопротивлений их значения всегда приводятся по скорости V_2 в трубе за местным сопротивлением.

Тогда

$$h_M = \zeta_M \frac{v_2^2}{2g}. \quad (25.2)$$





Как видно из формулы (25.2), коэффициент ζ_m – величина безразмерная. Он представляет собой ту часть кинетической энергии, которая теряется в местном гидравлическом сопротивлении.

Обычно коэффициент ζ_m определяется опытным путем и приводится в справочной литературе в виде таблиц, графиков, эмпирических формул. Теоретические зависимости получены лишь для ζ_m некоторых местных сопротивлений. Экспериментальное определение сводится к вычислению его из уравнения (25.2) по полученным опытным путем значений h_m и V_2 . При этом местные потери напора h_m находятся из уравнения Бернулли:

$$h_m = H_1 - H_2,$$

где H_1 и H_2 – полные напоры в сечениях I – I и II – II (рис. 25.1).

Для подсчета полных напоров используются показания пьезометров и полученные опытным путем величины скоростей потока на входе и выходе местного сопротивления:

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}, \quad (25.3)$$

$$H_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}. \quad (25.4)$$

В случае, когда местное сопротивление расположено на горизонтальном участке трубопровода постоянного сечения, потери напора в нем равны разности показаний пьезометров на входе и выходе:

$$h_m = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}. \quad (25.5)$$

25.2. Описание установки

Установка (рис. 25.1) состоит из трубопровода 1, на котором последовательно расположены местные гидравлические сопротивления: внезапное расширение 2, внезапное сужение 3, колено 4, задвижка 5, диффузор 6, конфузор 7 и кран 8, пьезометров на входе и выходе каждого сопротивления. В трубопровод поступает вода из резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень. Для регулирования расхода на конце трубопровода установлен ventиль 9.



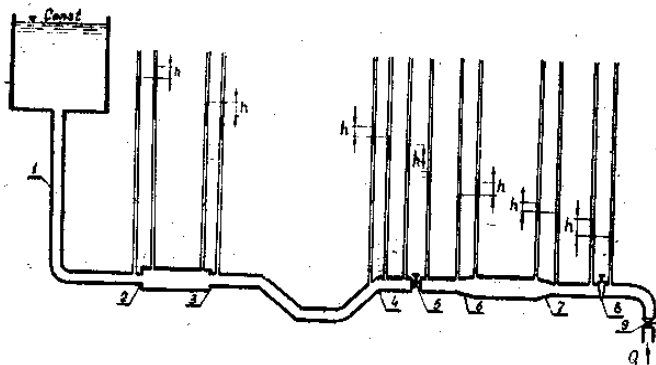


Рис. 25.1. Схема опытной установки.

25.3. Порядок выполнения работы

1. Выписываются из технической характеристики лабораторной установки величины внутренних диаметров труб, замеряются угол поворота колена, степень открытия задвижки, угол открытия крана, длина диффузора и конфузора (для определения угла конусности). Результаты записываются в табл. 9.1.
 2. Вентилем устанавливается в трубопроводе постоянный расход, который измеряется весовым способом (с помощью мерного бака, секундомера и весов) при установившемся движении потока.
 3. Снимаются показания пьезометров на входе и выходе каждого из указанных местных сопротивлений.
- Результаты измерений и вычислений по проведенным опытам записываются в табл. 9.2 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 25.1. Параметры изучаемых местных сопротивлений

| Местное сопротивление | | d_1 , см | ω_1 , см ² | d_2 , см | ω_2 , см ² | Другие пара- метры |
|-----------------------|-------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|--------------------------|
| Наименование | Схема | | | | | |
| Внезапное расширение | | | | | | |
| Внезапное сужение | | | | | | |
| Колено | | | | | | |
| Задвижка | | | | | | |
| Диффузор | | | | | | |
| Конфузор | | | | | | |
| Кран | | | | | | |





Т а б л и ц а 25.2. Измеренные и вычисленные показатели

| № п.п. | Наименование | Единица измерения | Внезапное расширение | Внезапное сужение | Колено | Задвижка | Диффузор | Конфузор | Кран |
|--------|--|-------------------|----------------------|-------------------|--------|----------|----------|----------|------|
| 1 | Скорость потока перед сопротивлением V_1 | см/с | | | | | | | |
| 2 | Скоростной напор перед сопротивлением $V_1^2/(2g)$ | см | | | | | | | |
| 3 | Скорость потока за сопротивлением V_2 | см/с | | | | | | | |
| 4 | Скоростной напор за сопротивлением $V_2^2/(2g)$ | см | | | | | | | |
| 5 | Показание пьезометра перед сопротивлением $P_1 /(\rho g)$ | см | | | | | | | |
| 6 | Показание пьезометра за сопротивлением $P_2 /(\rho g)$ | см | | | | | | | |
| 7 | Полный напор H_1 | см | | | | | | | |
| 8 | Полный напор H_2 | см | | | | | | | |
| 9 | Потери напора h_m | см | | | | | | | |
| 10 | Коэффициент местного гидравлического сопротивления: опытный $\zeta_m^{оп}$ табличный ζ_m^T | — — | | | | | | | |
| 11 | Относительная разность $\Delta\zeta_m$ | % | | | | | | | |

Постоянные величины: время наполнения мерного бака $t =$ с; объем воды в мерном баке $W =$ см³; расход воды в трубопроводе $Q =$ см³/с.

Обработка результатов.

1. Вычисляются расход в трубопроводе $Q = W/t$, площади и средние скорости потока на входе и выходе исследуемых местных сопротивлений $V_1 = Q/\omega_1$ и $V_2 = Q/\omega_2$.
2. По формуле (25.4) определяются напоры на входе и выходе каждого местного сопротивления, а по (25.3) – потери напора.
3. Опытный коэффициент местного сопротивления определяется из формулы (25.2):

$$\zeta_m^{оп} = \frac{h_m}{v_2^2 / (2g)}. \quad (25.6)$$

4. Полученные опытные значения $\zeta_m^{оп}$ сопоставляются с приведенными в литературе ζ_m^T (табл. 2 приложения).





Лабораторная работа № 26. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ

Цель работы:

- 1) провести на лабораторной установке необходимые опыты и определить гидравлические коэффициенты трения при различных скоростях движения потока в трубопроводе;
- 2) вычислить коэффициенты λ для условий опытов по рекомендуемым выше формулам;
- 3) сопоставить полученные результаты (вычислить $\Delta\lambda$).

26.1. Общие сведения

Потери удельной энергии (напора) по длине потока в напорном трубопроводе круглого сечения определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{0л} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (26.1)$$

где λ – гидравлический коэффициент трения (коэффициент Дарси);
 ℓ – длина участка трубопровода, на котором определяются потери напора;
 d – внутренний диаметр трубопровода;
 V – средняя скорость движения потока.

Многочисленными исследованиями установлено, что гидравлический коэффициент трения зависит от числа Рейнольдса ($Re = Vd/\nu$, где ν – кинематическая вязкость жидкости), диаметра и так называемой эквивалентной величины выступов (Δ_s) шероховатости трубопровода. Однако в разных условиях движения потоков влияние этих факторов сказывается по-разному и прежде всего – режима движения жидкости. Поэтому влияние их на гидравлический коэффициент трения рассмотрим отдельно для каждого режима.

Ламинарный режим движения. Как отмечалось в работе 25, ламинарный поток имеет слоистый характер – частицы жидкости движутся с различными скоростями параллельно оси трубы без перемешивания. Касательные напряжения, которые возникают между смещающимися параллельными слоями жидкости, обусловлены вязкостью жидкости и подчиняются закону жидкостного трения Ньютона, который имеет следующую запись:

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dr}, \quad (26.2)$$

где τ – касательное напряжение;

μ – динамическая вязкость жидкости;

du/dr – градиент скорости.

Используя общий закон распределения касательных напряжений

$$\tau = \rho g R I, \quad (26.3)$$





где ρ – плотность жидкости;
 g – ускорение свободного падения;
 R – гидравлический радиус потока;

I – гидравлический уклон $I = h_{дв}/\ell$. Выражая в нем τ формулой (26.2), получим дифференциальное уравнение, определяющее скорость u как функцию радиуса r трубопровода:

$$du = -\frac{\rho g I}{2\mu} r dr . \quad (26.4)$$

В результате интегрирования этого уравнения с учетом граничного условия ($u = 0$ при $r = r_0$, где r_0 – радиус трубопровода) получаем параболический закон распределения скорости (рис. 26.1) по сечению.

$$u = \frac{\rho g I}{4\mu} (r_0^2 - r^2) . \quad (26.5)$$

Максимальная скорость будет на оси трубы:

$$u_{\max} = \frac{\rho g I}{4\mu} r_0^2 . \quad (26.6)$$

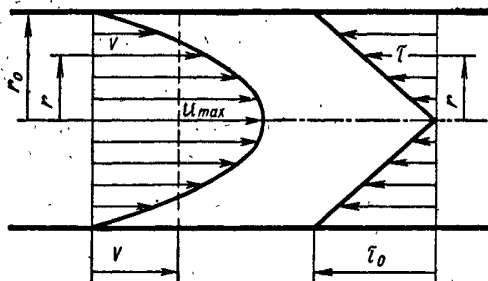


Рис. 26.1. Распределение скоростей и касательных напряжений по сечению ламинарного потока в круглой трубе.

Используя выражение (26.6), можно представить найденный закон в форме

$$u = u_{\max} (1 - r^2 / r_0^2) . \quad (26.7)$$

Определив расход жидкости суммированием расходов через элементарные кольцевые площадки живого сечения потока, найдем его среднюю скорость:

$$V = \frac{Q}{\pi_0^2} = \frac{1}{\pi_0^2} \int_0^{r_0} u_{\max} (1 - \frac{r^2}{r_0^2}) 2\pi r dr = \frac{u_{\max}}{2} . \quad (26.8)$$





Следовательно, средняя скорость потока равна половине максимальной. Решая совместно уравнения (10.6) и (10.8), получаем закон гидравлического трения в потоке при ламинарном режиме (формула Пуазейля)

$$h_{\text{от}} = \frac{32\nu l V}{gd^2}, \quad (26.9)$$

из которого следует, что потери напора на трение по длине потока пропорциональны средней скорости движения потока и кинематической вязкости жидкости.

Приведя последнюю формулу к виду (26.1), получим гидравлический коэффициент трения для ламинарного потока:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (26.10)$$

Таким образом, при ламинарном режиме движения жидкости, когда $\text{Re} = \frac{vd}{\nu} \leq \text{Re}_{\text{кр}} = 2320$, гидравлический коэффициент трения λ определяется по формуле (26.10). Теоретические результаты хорошо подтверждаются опытом для изотермических потоков, в которых отсутствует теплообмен с окружающей средой.

Турбулентный режим движения. Турбулентный поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением частиц жидкости. Наряду с основным поступательным перемещением жидкости вдоль трубы наблюдаются незакономерные поперечные перемещения и вращательные движения (завихривания) частиц, которые приводят к интенсивному перемешиванию жидкости.

Измерения скоростей в различных точках потока чувствительными самопишущими приборами обнаруживают пульсации *скоростей*, т. е. весьма быстрые и беспорядочные их колебания около некоторых средних значений, которые называют *осредненными* местными скоростями. На рис. 26.2 изображены пульсации продольной скорости в определенной точке потока.

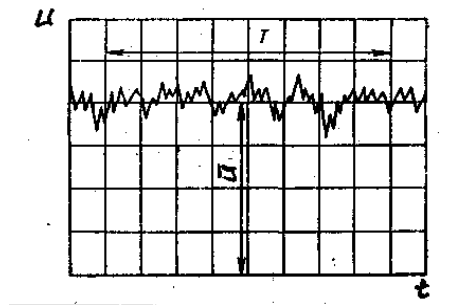


Рис. 26.2. Пульсации продольной скорости в турбулентном потоке.





За осредненную скорость в данной точке принимают такое постоянное значение скорости, при котором через любую площадку, содержащую эту точку, за время осреднения проходит объем жидкости, равный истинному; таким образом, проекция осредненной скорости на некоторое направление s определяется по формуле

$$u = \frac{1}{T} \int_0^T u_s dt, \quad (26.11)$$

где T – период осреднения;

u_s – проекция мгновенной местной скорости на это направление.

При достаточно большом периоде осреднения (по сравнению со средним периодом пульсаций, который обычно измеряется сотыми и тысячными долями секунды) величина u_s оказывается практически не зависящей от T ; в этом проявляется основная статистическая закономерность турбулентного потока. Аналогичным образом происходят пульсации давлений и касательных напряжений в различных точках потока. Следовательно, турбулентный поток является по своей природе неустановившимся движением.

Так как пульсации имеют беспорядочный, случайный характер, установить зависимости между мгновенными характеристиками потока оказывается невозможным. Вместе с тем для большинства технических задач существенны не мгновенные пульсирующие величины местных скоростей и напряжений, а лишь их осредненные во времени значения. Поэтому при гидравлических расчетах турбулентных потоков обычно пользуются их осредненными характеристиками.

Замена действительного неустановившегося движения более простой схемой осредненного установившегося потока чрезвычайно облегчает изучение турбулентного потока, сохраняя вместе с тем его главные закономерности.

Измерения скоростей показывают, что при переходе к турбулентному режиму у стенок сохраняется тонкий слой жидкости, в котором частицы, подторможенные и направленные стенками, сохраняют в основном слоистый характер движения (так называемый ламинарный или вязкий подслои). Поэтому профиль осредненных скоростей имеет два значительно различающихся участка (рис. 26.3.). В турбулентном ядре благодаря интенсивному поперечному перемешиванию, приводящему к выравниванию скоростей частиц, осредненные скорости отличаются незначительно и их распределение по основной части сечения оказывается более равномерным, чем при ламинарном режиме. В пределах вязкого подслоя происходит весьма резкое падение скоростей до нулевого значения на стенке.

Следует заметить, что поток внутри вязкого подслоя не является строго ламинарным, так как в нем существуют небольшие турбулентные пульсации скоростей и давлений и возникают периодические обмены с внешними турбулизированными слоями.





Толщина вязкого подслоя, который еще называется ламинарной пленкой δ (рис. 26.3.), чрезвычайно мала (сотые и тысячные доли диаметра трубопровода) и определяется по зависимости

$$\delta = \frac{30d}{\text{Re}\sqrt{\lambda}}. \quad (26.12)$$

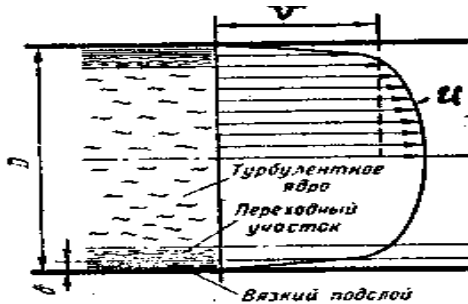


Рис. 26.3. Схема распределения осредненных скоростей в турбулентном потоке.

Между турбулентным ядром и вязким подслоем имеется тонкий переходный участок, в котором по мере приближения к подслою резко уменьшаются турбулентные пульсации и интенсивно уменьшаются осредненные скорости. Так как характеристики потока изменяются по радиусу непрерывно, установить границы между этими участками можно только условно.

Переход потока в турбулентное состояние приводит к сильному возрастанию сопротивления, что связано с увеличением напряжений трения. В турбулентном ядре, где градиенты осредненной скорости невелики, напряжения вязкостного трения играют незначительную роль. Основная часть сопротивления создается так называемыми турбулентными касательными напряжениями, которые возникают из-за непрерывных поперечных перемещений (беспорядочного перемешивания) частиц. Обмен частицами между соседними слоями сопровождается соответствующим увеличением или уменьшением количества движения этих частиц (турбулентный обмен количеством движения). Так как при этом более быстрые слои тормозятся, а более медленные ускоряются, то между ними возникает динамическое взаимодействие, которое проявляется в виде турбулентных касательных напряжений.

Наибольшие турбулентные касательные напряжения возникают вблизи стенок у внешней границы турбулентного ядра. На этом участке наиболее интенсивно образуются вихри, которые затем рассеиваются в турбулентном ядре и гасятся силами вязкостного трения. Энергия вращения вихрей переходит при этом в тепло.

Точной теории турбулентного движения ввиду большой сложности его структуры в настоящее время не существует. Поэтому основную роль при изучении





этого движения и при разработке практических методов расчета играют опытные данные. В результате многочисленных опытных исследований установлено, что свойства турбулентного потока (распределение осредненных скоростей по сечению, коэффициент сопротивления трения и др.) зависят от числа Re и относительной шероховатости стенок трубопровода.

По характеру и степени влияния этих факторов при турбулентном режиме различают зоны *гидравлически гладких* и *гидравлически шероховатых труб*, разделенные *переходной* зоной.

В зоне гидравлически гладких труб (рис. 26.4., а) толщина δ вязкого подслоя значительно больше максимальной высоты бугорков шероховатости ($\delta \gg \Delta_{\max}$) или числа Рейнольдса, которое находится в интервале $2320 < Re \leq Re_{\text{гп}}$:

$$Re_{\text{гп}} = 27 \left(\frac{d}{\Delta_s} \right)^{1,14}, \quad (26.13)$$

или приближенно

$$Re_{\text{г}} = 20d / \Delta_s, \quad (26.14)$$

где Δ_s – эквивалентная величина выступов шероховатости, пояснение которой будет дано ниже.

При этом бугорки утоплены в вязком подслое, плавно обтекаются с очень малыми скоростями и не влияют на распределение скоростей и потерь напора. Гидравлический коэффициент трения является функцией только числа Рейнольдса:

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

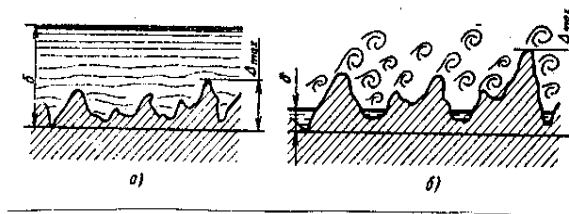


Рис. 26.4. Течение у стенок трубы при турбулентном режиме:
а – гидравлически гладкие трубы; б – гидравлически шероховатые трубы.

Достаточно хорошо совпадают с опытом значения λ , вычисленные по формуле Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}. \quad (26.15)$$





При $Re \leq 10^5$ применима также формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{1/4}}. \quad (26.16)$$

Пользуясь выражением (10.16) можно получить из общей формулы (26.1) следующую зависимость потери напора на трение от кинематической вязкости жидкости ν и средней скорости потока V для гидравлически гладких труб:

$$h_{дл} \sim \nu^{0,25} V_3^{1,75}.$$

Сравнение с ламинарным режимом (для которого $h_{дл} \sim \nu$) показывает, что при переходе к турбулентному режиму влияние вязкости на сопротивление значительно уменьшается, и напротив, значительно возрастает влияние скорости движения жидкости. Это объясняется тем, что в турбулентном потоке вязкостное сопротивление (пропорциональное первой степени скорости) сосредоточено лишь в пределах тонкого слоя у стенок. Основная часть сопротивления создается в результате перемешивания частиц жидкости в переходном участке и турбулентном ядре и связана с рассеиванием кинетической энергии вращения завихренных частиц, которая пропорциональна квадратам скоростей потока. В зоне гидравлически шероховатых труб (рис. 15, б) толщина δ вязкого подслоя значительно меньше высоты бугорков шероховатости ($\delta \ll \langle \Delta_{\text{max}} \rangle$) или числа Рейнольдса, которое находится в соотношении $Re \geq Re_{\text{кн}}$:

$$Re_{\text{кн}} = 21,6C \frac{d}{\Delta_3}, \quad (26.17)$$

или приближенно

$$Re_{\text{кн}} = 500 \frac{d}{\Delta_3}, \quad (26.18)$$

где C – коэффициент Шези, который может определяться по формуле И.И. Агроскина

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \ell g R, \quad (26.19)$$

где n – коэффициент шероховатости стенок трубопровода, который принимается по справочной литературе (табл. 3 приложения); R – гидравлический радиус. В формулу (26.19) подставляется только в метрах. При этом бугорки выступов шероховатости почти целиком оказываются в турбулентном ядре потока. Обтекание бугорков происходит с большими скоростями и сопровождается интенсивными отрывами вихрей, которые попадают





в центральную часть потока и усиливают его турбулентность. Рассеивание кинетической энергии вращения этих вихрей, происходящее в процессе перемешивания частиц и приводящее к переходу этой энергии в тепло, увеличивает потерю напора. Соответственно возрастает также и касательное напряжение на стенке, которое создается в основном в результате перепадов давлений, возникающих на бугорках при их отрывном обтекании.

Поскольку слоистое пристенное течение практически полностью разрушено, влияние сил вязкостного трения на поток становится исчезающе малым и характеристики потока оказываются не зависящими от числа Рейнольдса (зона *турбулентной автомодельности*). Гидравлический коэффициент трения является функцией только относительной шероховатости

$$\lambda = f(\Delta_s / d),$$

возрастая вместе с увеличением Δ_s / d . Потери напора в этой зоне не зависят от вязкости и пропорциональны квадрату средней скорости потока ($h_{\text{дл}} \sim V^2$, квадратичный закон сопротивления).

В этой зоне сопротивления гидравлический коэффициент трения может определяться по формуле Л. Прандтля

$$\lambda = 0,25 / (\ell g 0,27 \frac{\Delta_s}{d})^2; \quad (26.20)$$

по формуле Б.Л. Шифринсона (при $\frac{\Delta_s}{d} < 0,007$)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25}, \quad (26.21)$$

а также по коэффициенту Шези

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (26.22)$$

В переходной зоне по мере возрастания числа Рейнольдса уменьшается толщина вязкого подслоя. При этом бугорки шероховатости начинают все более выступать за пределы вязкого подслоя, вызывая дополнительные вихреобразования и увеличивая потерю напора. Считается, что в этой зоне высота вязкого подслоя δ примерно равна высоте бугорков шероховатости Δ_{max} , т.е. ($\delta \approx \Delta_{\text{max}}$), или числу Рейнольдса, которое находится в интервале

$$Re_{\text{гл}} < Re < Re_{\text{кв}}.$$

Гидравлический коэффициент трения в этой зоне зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок





$$\lambda = f(\text{Re}, \Delta/d)$$

и может определяться по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}; \quad (26.23)$$

по формуле Френкеля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -21g \left[0,27 \frac{\Delta_s}{d} + \left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right]. \quad (26.24)$$

Принятая в гидравлике методика определения Δ учитывает, что естественная шероховатость стенок трубопроводов всегда неоднородна (бугорки шероховатости имеют различные формы, размеры и расположение). Микрорельеф поверхности стенок зависит от нескольких факторов: материала, способа изготовления трубы, физико-химических свойств жидкости и срока эксплуатации (в связи с возможной коррозией стенок и образованием на них отложений). Поскольку естественная шероховатость имеет многообразные нерегулярные формы (рис. 26.5, а), установить каким-либо геометрическим способом осредненное значение высоты бугорков, определяющее влияние шероховатости на потерю напора, оказывается невозможным. Поэтому параметр шероховатости вводится как условная величина, определяемая по специальной шкале искусственной однородной шероховатости (рис. 26.5, б).



Рис. 26.5. Естественная (а) и эквивалентная зернистая (б) шероховатости.

Такая шкала построена с помощью калиброванных зерен песка, наклеиваемых на гладкую поверхность трубы. Набор таких труб при различном диаметре зерен Δ дает ряд значений относительной шероховатости Δ/d , в функции которой получены значения λ (формула Никурадзе):

$$\lambda = \frac{1}{(2lgd/\Delta + 1,14)^2}. \quad (26.25)$$





С помощью такой шкалы за абсолютную шероховатость стенок принимают эквивалентную шероховатость, представляющую собой такой размер зерен песка искусственной шероховатости, который в квадратичной зоне равенцен по гидравлическому сопротивлению данной неоднородной шероховатости. Эквивалентная шероховатость определяется путем испытаний данной трубы в квадратичной зоне сопротивления и вычисления Δ по опытному значению λ из формулы (10.22).

Для металлических труб эквивалентная шероховатость составляет 0,5 – 0,7 максимальной высоты бугорков естественной шероховатости.

26.2. Описание установки

Лабораторная установка. Лабораторная установка (рис. 26.6.) состоит из трубопровода 4 постоянного сечения, напорного резервуара 1, в котором поддерживается постоянный уровень воды. Расход в трубопроводе регулируется задвижкой 5. На прямолинейном горизонтальном участке трубопровода установлены на расстоянии l друг от друга пьезометры 2 и 3.

Проведение опытов.

1. Задвижкой 5 устанавливается постоянный небольшой расход, который измеряется весовым способом (с помощью мерного бака, секундомера и весов).
2. Измеряются температура воды T , расстояние между пьезометрами l , внутренний диаметр d трубопровода, снимаются показания пьезометров (после того, как они станут постоянными).
3. При увеличении расхода проводятся еще два аналогичных опыта. Результаты измерений и обработки опытов записываются в табл. 26.1 журнала лабораторных работ.

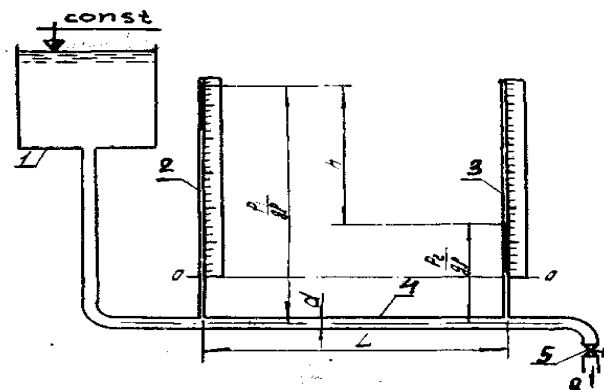


Рис. 26.6. Схема опытной установки.

Таблица 26.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

| № п. п. | Наименование | Единица измерения | Номера опытов | | |
|------------|--------------|-------------------|---------------|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| | | | | | |





| | | | | | |
|----|---|--------------------|--|--|--|
| 1 | Диаметр трубы d | см | | | |
| 2 | Площадь сечения ω | см ² | | | |
| 3 | Объем воды в мерном баке W | см ³ | | | |
| 4 | Время наполнения мерного бака t | с | | | |
| 5 | Расход Q | см ³ /с | | | |
| 6 | Средняя скорость V | см/с | | | |
| 7 | Показание первого пьезометра $\frac{P_1}{\rho g}$ | см | | | |
| 8 | Показание второго пьезометра $\frac{P_2}{\rho g}$ | см | | | |
| 9 | Потеря напора $h_{тр}$ | см | | | |
| 10 | Расстояние между сечениями L | см | | | |
| 11 | Температура воды T | °С | | | |
| 12 | Кинематический коэффициент вязкости ν | Ст | | | |
| 13 | Число Рейнольдса Re | – | | | |
| 14 | Зона сопротивления | – | | | |
| 15 | Коэффициент Дарси: опытный $\lambda_{оп}$ вычисленный λ_p | – | | | |
| | | – | | | |
| 16 | Относительная разность $\Delta\lambda$ | % | | | |

26.3. Порядок выполнения работы

1. Вычисляются площадь сечения трубопровода, расход и средняя скорость потока.
2. Вычисляются потери напора по длине опытного участка трубопровода. Для горизонтального трубопровода постоянного сечения в соответствии с уравнением Бернулли

$$h_{от} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \quad (26.26)$$

3. Из формулы (10.1) определяется опытное значение гидравлического коэффициента трения.
4. С учетом того, что в опыте с самым большим расходом область гидравлического сопротивления квадратичная, из формулы Никурадзе (26.25) вычисляется величина Δ , путем подстановки в нее опытного значения гидравлического коэффициента трения.
5. Далее устанавливаются по вышеизложенным рекомендациям границы зон гидравлического сопротивления.
6. В зависимости от зоны сопротивления применяется расчетная формула для определения расчетной величины гидравлического коэффициента трения λ_p .
7. Вычисляется относительное отклонение λ_p от $\lambda_{оп}$.

Лабораторная работа № 27. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ





Цель работы:

- 1) определить по результатам выполненных опытов коэффициенты расхода, сжатия, скорости при истечении жидкости из круглого отверстия в тонкой стенке, из внешнего цилиндрического и внешнего конического сходящегося насадков;
- 2) сопоставить полученные опытные коэффициенты с приведенными в литературе.

27.1. Общие сведения

При истечении жидкости из малого отверстия в тонкой стенке и насадков при постоянном напоре расход определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (27.1)$$

где μ – коэффициент расхода;

ω – площадь отверстия в тонкой стенке или насадка;

H_0 – расчетный напор.

Если жидкость вытекает из резервуара (рис. 18) при постоянном уровне H и давлении p_1 , то расчетный напор

$$H_0 = H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_0^2}{2g}, \quad (27.2)$$

где V_0 – средняя скорость движения жидкости в сечении 1–1 (рис. 27.1.).

В частном случае, когда $p_1 = p_0$ и $V_0 = 0$, расчетный напор $H_0 = H$.

Коэффициент μ есть величина безразмерная. Он представляет собой отношение действительного расхода к тому расходу, который был бы в случае отсутствия сопротивлений и сжатия струи:

$$\mu = Q / (\omega \sqrt{2gH_0}). \quad (27.3)$$

Коэффициент расхода выражается через коэффициент сжатия струи и коэффициент скорости:

$$\mu = \varepsilon \varphi. \quad (27.4)$$

Коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (27.5)$$





где Ω_c – площадь сжатого сечения струи после выхода ее из отверстия или насадка.

Для цилиндрического и коноидиального насадков $\varepsilon = 1,0$, т.е. струя не имеет сжатия на выходе. В случае конического сходящегося насадка коэффициент сжатия весьма близок к 1,0.

Коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \sum \zeta}}, \quad (27.6)$$

где α_c – коэффициент кинетической энергии в сжатом сечении струи;

$\sum \zeta$ – сумма коэффициентов сопротивлений на пути движения жидкости от резервуара до сжатого сечения.

27.2. Описание установки

Установка (рис. 27.1.) состоит из резервуара 4, сливной воронки 2 для поддержания постоянного уровня H , фланца 5 со шпильками для крепления, исследуемого насадка или диска 6 с отверстием, клапана 7 с рычагом 3 для перекрытия отверстия, пьезометра 1 для измерения H , задвижки 8 для регулировки расхода жидкости, поступающей в резервуар.

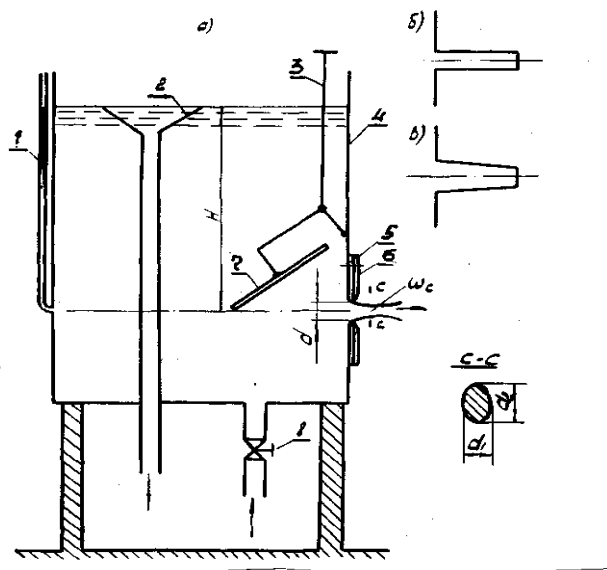


Рис. 27.1. Схема опытной установки:
а – общий вид; б – внешний цилиндрический насадок;
в – внешний конический сходящийся насадок;





27.3. Порядок выполнения работы

1. Резервуар наполняется водой, задвижкой 8 устанавливается такой расход, чтобы уровень в резервуаре был постоянным.
2. Измеряется диаметр отверстия.
3. Рычагом 3 открывается клапан 7.
4. Весовым способом измеряется расход истечения.
5. Штангенциркулем измеряются горизонтальный d_1 и вертикальный d_2 размеры струи в сжатом сечении.
6. По пьезометру 1 определяется геометрический напор H .
7. По мерной линейке определяется дальность L_x полета струи (на уровне пола).

Такие опыты проводятся с внешним цилиндрическим и коническим сходящимися насадками. Результаты измерений и вычислений записываются в табл. 27.1 журнала лабораторных работ.

1. Вычисляются площади отверстий в тонкой стенке и исследуемых насадках.
2. По формуле (27.3) определяется коэффициент расхода.
3. Определяется площадь сжатого сечения струи:

$$\omega_c = \frac{\pi}{4} d_1 d_2 . \quad (27.7)$$

Т а б л и ц а 27.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

| № п. п. | Наименование | Единица измерения | Круглое отверстие в тонкой стенке | Цилиндрический насадок | Конический сходящийся насадок |
|---------|--|--------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 1 | Диаметр отверстия d | см | | | |
| 2 | Площадь отверстия ω | см ² | | | |
| 3 | Объем воды в мерном баке W | см ³ | | | |
| 4 | Время наполнения мерного бака t | с | | | |
| 5 | Расход Q | см ³ /с | | | |
| 6 | Напор над центром отверстия H | см | | | |
| 7 | Коэффициент расхода μ | – | | | |
| 8 | Размеры струи в сжатом сечении d_1 и d_2 | см | | | |
| 9 | Площадь в сжатом сечении ω_c | см ² | | | |
| 10 | Коэффициент сжатия ε | – | | | |
| 11 | Коэффициент скорости ϕ | – | | | |
| 12 | Коэффициент сопротивления ζ | – | | | |
| 13 | Дальность отлета струи L_x | см | | | |

4. По формуле (27.5) находится коэффициент сжатия струи.





5. Определяется коэффициент скорости:

$$\varphi = \mu / \varepsilon . \quad (27.8)$$

6. Определяется сумма коэффициентов сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = 1 / \varphi^2 - \alpha_c . \quad (27.9)$$

7. Полученные опытные коэффициенты сопоставляются с приведенными в литературе (табл. 27.1. приложения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик, П. Н. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений: учебное пособие / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. – Минск: Вышэйшая школа, 2018. – 366 с.
2. Васильева, Н. В. Гидравлика. Гидравлические расчеты открытых потоков и сооружений: учеб. пособие / Н. В. Васильева, Л. И. Мельникова. – Горки: БГСХА, 2022. – 161 с.
3. Волков В. И., Ханов Н. В. Водосливные плотины на нескальном основании: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2019. – 123 с.
4. Герасимов, Ю. Л. Основы рыбного хозяйства: учеб. пособие / Ю. Л. Герасимов. – Самара: Самарский университет, 2003. 108 с.
5. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов: учеб. пособие / П. М. Богославчик [и др.]; под ред. Г. Г. Круглова. – Минск: БНТУ, 2006. 585 с.
6. Гидротехнические сооружения: учеб. пособие для вузов / под ред. Н. П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1985. 432 с.
7. Дрозд, Д. А. Гидравлика: учеб. пособие / Д. А. Дрозд, А. А. Боровиков. – Горки: БГСХА, 2023. – 236 с.
8. Дрозд, Д. А. Гидравлика, гидрология, лимнология и метеорология: учеб. пособие / Д. А. Дрозд, А. А. Боровиков. – Горки: БГСХА, 2023. – 306 с.
9. Круглов Г. Г. Гидротехнические сооружения: лабораторный практикум: учебное пособие / Г. Г. Круглов, Ю. А. Медведева. – Минск: Вышэйшая школа, 2019. – 109 с.
10. Нестеров, М. В. Гидротехнические сооружения и рыбоводные пруды: учеб. пособие / М. В. Нестеров, И. М. Нестерова – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. 682 с.: ил.
11. Мельникова, Л. И. Гидравлика. Практикум: учеб. пособие / Л. И. Мельникова. – Горки: БГСХА, 2020. – 147 с.
12. Хайновский, К. Б. Рыбохозяйственная гидротехника: учеб. методич. пособие по лабораторным работам / К. Б. Хайновский. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 114 с.

