

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

И.Н. Гордеев, О.И. Иванова

ГИДРАВЛИКА ВОДОТОКОВ

Методические указания

Электронное издание

Красноярск 2023

Рецензенты:

*В.Н. Белобородов, кандидат технических наук,
директор ООО НПФ «Изотор»*

*Л.А. Путинцев, кандидат географических наук, начальник отдела
гидрологических прогнозов Гидрометеоцентра
ФГБУ «Среднесибирское УГМС»*

Гордеев, И.Н.

Гидравлика водотоков [Электронный ресурс]: методические указания / И.Н. Гордеев, О.И. Иванова; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2023. – 43 с.

Представлены методические указания к изучению дисциплины «Гидравлика водотоков». Содержат теоретический материал, практические занятия, контрольные вопросы к каждой теме, вопросы для самостоятельной работы студента.

Предназначено для бакалавров Института землеустройства, кадастров и природообустройства, обучающихся по направлению подготовки 20.03.02 «Природообустройство и водопользование», профиль «Водные ресурсы и водопользование», очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

© Гордеев И.Н., Иванова О.И., 2023
© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Модуль 1. Уравнение Бернулли. Равномерное движение жидкости ... | 5 |
| Тема 1. Физические свойства жидкостей | 5 |
| Контрольные вопросы | 9 |
| Тема 2. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля | 9 |
| Контрольные вопросы | 10 |
| Тема 3. Уравнение Бернулли и сопротивление движению жидкости ... | 11 |
| Контрольные вопросы | 12 |
| Практические задания по модулю 1 | 13 |
| Модуль 2. Неравномерное движение жидкости | 14 |
| Тема 4. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Критерий Рейнольдса | 14 |
| Контрольные вопросы | 17 |
| Тема 5. Определение потерь напора. Области сопротивления | 18 |
| Контрольные вопросы | 22 |
| Тема 6. Равномерное движение в открытых руслах..... | 22 |
| Контрольные вопросы | 27 |
| Практические задания по модулю 2..... | 28 |
| Модуль 3. Истечение жидкости..... | 29 |
| Тема 7. Истечение жидкости из отверстий и насадок при постоянном напоре | 29 |
| Контрольные вопросы | 31 |
| Тема 8. Истечение жидкости из отверстий и насадок при переменном напоре | 32 |
| Контрольные вопросы | 34 |
| Тема 9. Гидравлический удар | 34 |
| Контрольные вопросы | 35 |
| Практические задания по модулю 3..... | 36 |
| Перечень вопросов для самостоятельного изучения и самоподготовки к текущему контролю знаний, подготовки презентаций и докладов | 37 |
| Перечень вопросов для осуществления промежуточного контроля .. | 39 |
| Термины и определения | 40 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 41 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 42 |

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Гидравлика водотоков». Освоение дисциплины направлено на приобретение будущими специалистами фундаментальных знаний в области природообустройства и водопользования. Дисциплина посвящена раскрытию раздела специальной гидравлики – гидравлика водотоков – в свете требований ФГОС ВО по направлению подготовки «Природообустройство и водопользование». Бакалавр получает знания и овладевает методами, способами и технологиями изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации объектов природообустройства и водопользования. В учебном курсе изучаются законы равномерного и неравномерного движения воды в открытых естественных руслах и каналах, истечение жидкости через водосливы, виды сопряжения потоков и гасители энергии в нижнем бьефе гидротехнических сооружений, истечение из-под затворов, основы движения грунтовых вод.

Цель дисциплины состоит в получении знаний о законах равновесия и движения жидкостей и о способах применения этих законов при решении практических задач в области комплексного использования и охраны водных ресурсов. В результате изучения дисциплины студент приобретает навыки выполнения инженерных гидравлических расчетов открытых русел и гидротехнических сооружений, соответствующих направлению подготовки. Задачи изучения дисциплины: ознакомить студентов с основными методами гидравлики трубопроводов, рек, каналов, искусственных сооружений по пропуску воды; освоить приемы постановки инженерных задач и методы их решения.

Для каждой темы дан теоретический материал, контрольные вопросы, вопросы для самостоятельного изучения и самоподготовки к текущему контролю знаний, подготовки презентаций и докладов, вопросы для промежуточного контроля, практические задания к темам по каждому модулю, основные термины и определения.

Модуль 1. Уравнение Бернулли. Равномерное движение жидкости

Тема 1. Физические свойства жидкостей

Плотность ρ (кг/м³) – масса единицы объема жидкости:

$$\rho = \frac{m}{W}, \quad (1.1)$$

где m – масса жидкого тела, кг;
 W – объем, м³.

Плотность жидкостей уменьшается с увеличением температуры. Исключение представляет вода в диапазоне температур от 0 до 4 °С, когда ее плотность увеличивается, достигая наибольшего значения при температуре 4 °С, $\rho = 1000$ кг/м³.

Удельный вес жидкости γ (Н/м³) – вес единицы объема этой жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{W}, \quad (1.2)$$

где G – вес жидкого тела, Н;
 W – объем, м³.

Для воды при температуре 4 °С $\gamma = 9810$ Н/м³.

Между плотностью и удельным весом существует связь:

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (1.3)$$

где g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Сопротивление жидкостей изменению своего объема под действием давления и температуры характеризуется коэффициентами объемного сжатия и температурного расширения.

Коэффициент объемного сжатия β_w (Па⁻¹) – это относительное изменение объема жидкости при изменении давления на единицу:

$$\beta_w = -\frac{\Delta W}{W \cdot \Delta p} = \frac{\Delta \rho}{\rho \cdot \Delta p}, \quad (1.4)$$

где ΔW – изменение объема W ;

Δp – изменение плотности ρ , соответствующее изменению давления на величину Δp .

Вода практически несжимаема, величина β_w равна для воды в обычных условиях всего $0,4545 \cdot 10^{-8}$ Па⁻¹.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется *модулем упругости жидкостей* $E_{ж}$ (Па).

$$E_{ж} = 1/\beta_w . \quad (1.5)$$

Значение модуля упругости жидкостей зависит от давления и температуры. Если принять, что приращение давления $\Delta p = p - p_0$, а изменение объема $\Delta W = W - W_0$, то:

$$W = W_0 \left(- \beta_w \cdot \Delta p \right);$$

$$\rho = \rho_0 \left(- \beta_w \cdot \Delta p \right).$$

Коэффициент температурного расширения β_t ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ выражает относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус:

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \cdot \Delta t} , \quad (1.6)$$

где ΔW – изменение объема W , соответствующее изменению температуры на величину Δt .

Коэффициент температурного расширения воды увеличивается с возрастанием температуры и давления; для большинства других капельных жидкостей β_t с увеличением давления уменьшается. Если принять, что приращение температуры $\Delta t = t - t_0$, а изменение объема $\Delta W = W - W_0$, то:

$$W = W_0 \left(+ \beta_t \cdot \Delta t \right);$$

$$\rho = \rho_0 \left(+ \beta_t \cdot \Delta t \right).$$

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

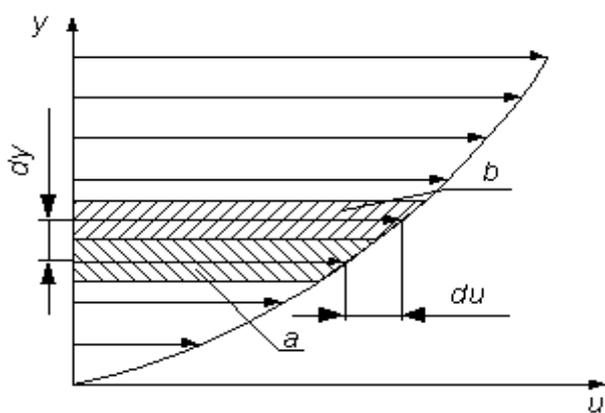


Рис. 1.1. Этюра скоростей

Вязкость проявляется только при движении жидкости и сказывается на распределении скоростей по живому сечению потока.

Согласно гипотезе Ньютона сила внутреннего трения F в жидкостях пропорциональна градиенту изменения скорости $\frac{du}{dy}$, площади

соприкосновения слоев S , зависит от рода жидкости и очень незначительно зависит от давления.

$$F = \mu \cdot S \frac{du}{dy}, \quad (1.7)$$

где S – площадь соприкасающихся слоев, м^2 ;

du – скорость смещения слоя "b" относительно слоя "a", м/с ;

dy – расстояние, на котором скорость движения слоев изменилась на du , м ;

$\frac{du}{dy}$ – градиент скорости, изменение скорости по нормали к направлению движения (с^{-1});

μ – коэффициент динамической вязкости ($\text{Па}\cdot\text{с}$).

Если силу трения F отнести к единице площади соприкасающихся слоев, то получим величину касательного напряжения τ , и тогда (1.7) примет вид:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}. \quad (1.8)$$

Из (1.8) следует, что коэффициент динамической вязкости может быть определен как

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}. \quad (1.9)$$

Из (1.9) нетрудно установить физический смысл коэффициента динамической вязкости. При градиенте скорости $\frac{du}{dy} = 1$; $\mu = \tau$, и выражает силу внутреннего трения, приходящуюся на единицу площади поверхности соприкасающихся слоев жидкости.

В практике, для характеристики вязкости жидкости, чаще применяют не коэффициент динамической вязкости, а коэффициент кинематической вязкости ν ($\text{м}^2/\text{с}$). Коэффициентом кинематической вязкости называется отношение коэффициента динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.10)$$

Вязкость жидкости зависит от рода жидкости, температуры и от давления.

Зависимость вязкости минеральных масел, применяемых в гидросистемах, от давления p при возрастании его до 50 МПа, можно определять с помощью приближенной эмпирической формулы:

$$\nu_p = \nu \left(1 + K \cdot p \right), \quad (1.11)$$

где μ_p и μ – кинематическая вязкость соответственно при давлении p и 0,1 МПа;

K – опытный коэффициент, зависящий от марки масла: для легких масел ($\mu_{50} < 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) $K = 0,02$, для тяжелых масел ($\mu_{50} > 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) $K = 0,03$.

При незначительных давлениях изменением вязкости пренебрегают. С повышением температуры вязкость жидкости уменьшается. Зависимость коэффициента кинематической вязкости от температуры определяется по эмпирической формуле

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}. \quad (1.12)$$

Для смазочных масел, применяемых в машинах и гидросистемах, рекомендуется следующая зависимость:

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n, \quad (1.13)$$

где ν_t – кинематическая вязкость при температуре t °С;

ν_{50} – кинематическая вязкость при температуре 50 °С;

n – показатель степени, зависящий от ν_{50} , определяемый по формуле

$$n = \lg \left(\nu_{50} \right) + 2,7. \quad (1.14)$$

Вязкость жидкости определяют при помощи вискозиметра Энглера и выражают в градусах Энглера ($^{\circ}E$). Градус Энглера есть отношение времени истечения испытуемой жидкости ко времени истечения дистиллированной воды. Для перехода от вязкости в градусах Энглера к коэффициенту кинематической вязкости ν применяется формула Убеллоде:

$$\nu = \left(0,731 \cdot E - \frac{0,0631}{E} \right) 10^{-4}. \quad (1.15)$$

Вязкость также определяют капиллярным вискозиметром Оствальда. Коэффициент кинематической вязкости в этом случае определяют по формуле

$$\nu = c \cdot T_{ж} \cdot 10^{-4}, \quad (1.16)$$

где c – постоянная прибора;

$T_{ж}$ – время истечения жидкости, с.

| T (°C) | ρ (кг/м ³) | T (°C) | ρ (кг/м ³) |
|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|
| 0 | 999,8 | 50 | 988,07 |
| 4 | 1000 | 60 | 983,24 |
| 10 | 999,73 | 70 | 977,81 |
| 20 | 998,23 | 80 | 971,83 |
| 30 | 995,67 | 90 | 965,34 |
| 40 | 992,24 | 100 | 958,38 |

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные физические свойства жидкости.
2. В чем основное различие между жидким и твердым состоянием вещества?
3. Что называется удельным весом и плотностью жидкости, какая между ними связь и каковы их размерности?
4. Определение вязкости жидкости. От чего зависит вязкость? Какими величинами она характеризуется?
5. Коэффициенты объемного сжатия и температурного расширения. Единицы их измерения. Сжимаема ли вода?
6. Что такое плотность жидкости? Единицы измерения. Чему равна плотность воды?

Тема 2. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля

Основным понятием гидростатики является понятие *гидростатического давления* в точке покоящейся жидкости. Гидростатическое давление обладает следующими свойствами:

1. Гидростатическое давление всегда нормально к площадке, воспринимающей его, и направлено по внутренней нормали, т.е. изнутри жидкости.
2. Гидростатическое давление в точке одинаково по всем направлениям.

Основное уравнение гидростатики:

$$p = p_0 + \gamma h, \quad (2.1)$$

где p – гидростатическое давление в любой точке жидкости;
 p_0 – давление на свободной поверхности;
 h – глубина погружения точки под свободной поверхностью;
 γ – объемный вес жидкости (для воды $\gamma = 0,001 \text{ г/см}^3$).

Величина p_0 на свободной поверхности жидкости равна обычно атмосферному давлению. Если на поверхность действует добавочное давление (например давление поршня), то основное уравнение гидростатики приобретает вид:

$$p = p_a + p_{доб} + \gamma h, \quad (2.2)$$

где p – внешнее единичное давление;
 p_a – атмосферное давление на поверхности;
 $p_{доб}$ – добавочное давление на поверхности жидкости.

Это выражение является *законом Паскаля*.

На использовании закона Паскаля основано устройство некоторых гидравлических машин. Простейшей такой машиной является гидравлический пресс, состоящий из двух сообщающихся сосудов.



Рис. 2.1. Гидравлический пресс

Малый сосуд имеет площадь сечения ω , большой – Ω . Если на поверхность жидкости в малом сосуде произвести с помощью поршня давление P_1 , то давление на поршень во втором сосуде будет:

$$P_2 = p_{доб}\Omega = P_1(\Omega/\omega). \quad (2.3)$$

Контрольные вопросы

1. Основное уравнение гидростатики. Для чего оно используется?
2. Физический смысл основного уравнения гидростатики.
3. Единицы измерения гидростатического давления. Два главных свойства гидростатического давления в точке.
4. Сформулируйте закон Паскаля.

Тема 3. Уравнение Бернулли и сопротивление движению жидкости

Основным уравнением динамики является уравнение Бернулли, которое для установившегося плавно изменяющегося потока реальной жидкости имеет вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2}{2g} + h_{mp}, \quad (3.1)$$

где Z – геометрическая высота, т.е. расстояние от произвольной горизонтальной плоскости сравнения до рассматриваемой точки в сечении (рис. 3.1);

индексы относятся к номерам сечений, проведенным нормально линиям тока;

P/γ – пьезометрическая высота, соответствующая полному или манометрическому давлению; является высотой столба жидкости в пьезометре в данном сечении;

$\alpha v/2g$ – скоростной напор; представляет собой высоту в трубке Пито, у которой нижний конец направлен так, чтобы скорость была направлена во входное отверстие трубки;

h_{mp} – потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений между сечениями.

Все члены уравнения (3.1) имеют линейную размерность. Сумма трех членов $\left(Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v}{2g} \right)$ называется гидродинамическим напором и обозначается H .

С энергетической точки зрения эта сумма выражает суммарную (потенциальную $Z + \frac{p}{\gamma}$ и кинетическую $\frac{\alpha v}{2g}$) удельную энергию потока, т. е. энергию, отнесенную к единице веса протекающей жидкости; h_{mp} – та часть удельной энергии, которая затрачивается на преодоление сопротивлений между сечениями.

Средняя скорость в сечении v определяется из уравнения неразрывности, которое при установившемся движении записывается в виде:

$$Q = \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 = \dots = const \quad (3.2)$$

где Q – расход потока, м³/с;

ω – площадь живого сечения, м².

Коэффициент Кориолиса α принимают в практических расчетах равным 1,0–1,1.

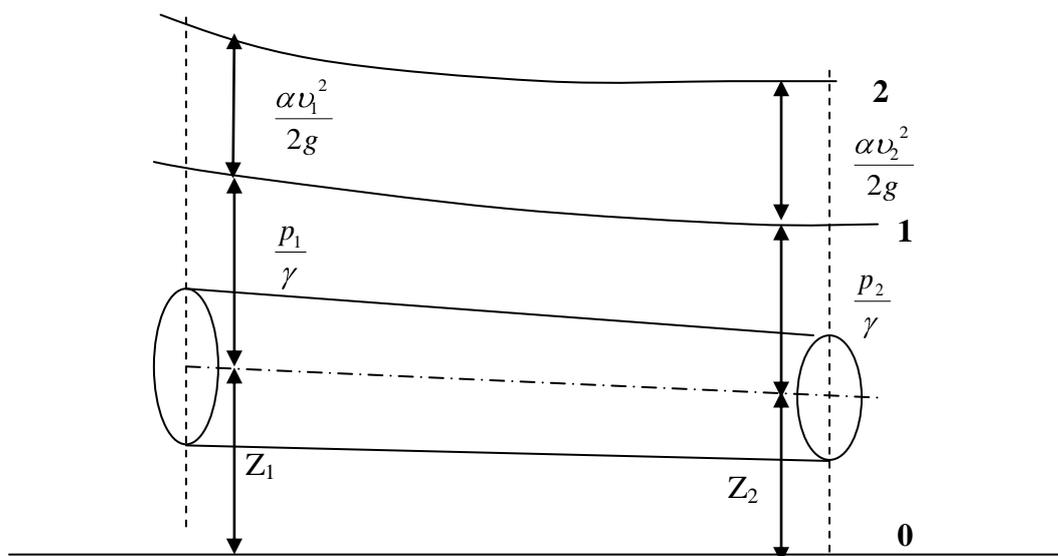


Рис. 3.1. К уравнению Бернулли:
0 – плоскость сравнения; 1 – пьезометрическая линия; 2 – напорная линия

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий линии тока и траектории движения частиц жидкости.
2. Что называется элементарной струйкой жидкости и какими свойствами она обладает?
3. Что называется живым сечением потока жидкости?
4. Что такое расход жидкости?
5. Что такое удельная энергия?
6. Могут ли оставаться постоянными (увеличиваться, уменьшаться) вдоль течения пьезометрический и гидродинамические напоры при движении вязкой жидкости?
7. Каков энергетический смысл величин z , p/γ , $z + p/\gamma$, $\alpha v^2/(2g)$, $z + p/\gamma + \alpha v^2/(2g)$, h_f . Какова их геометрическая интерпретация?
8. Каково аналитическое выражение, геометрический и энергетический смысл уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной и реальной жидкости?
9. Что называется гидравлическим и пьезометрическим уклоном?
10. Чем отличается уравнение Бернулли для потока реальной жидкости от уравнения элементарной струйки реальной жидкости?
11. Докажите, что все члены уравнения Бернулли имеют линейную размерность.

Практические задания по модулю 1

Практическое задание № 1

Решить задачи.

Задача 1. Вода движется полным сечением по трубопроводу переменного сечения. Площадь трубы: в первом сечении $0,01 \text{ м}^2$, во втором сечении: $0,05 \text{ м}^2$. Скорость движения жидкости в первом сечении 1 м/с . Определить скорость во втором сечении.

Задача 2. Вода движется полным сечением по насадку с постоянным расходом воды. Определить, во сколько раз диаметр на выходе насадка должен быть меньше диаметра на входе, чтобы добиться четырехкратного увеличения скорости на выходе?

Практическое задание № 2

Решить задачу.

Задача 1. Для канала трапецеидального сечения известны уклон i , ширина канала по дну b , глубина потока h , коэффициент заложения откосов m и коэффициент шероховатости n . Требуется определить уклон расхода воды в канале Q (коэффициент Шези определять по формуле Павловского).

| Показатель | Вариант | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| i | 0.00010 | 0.00015 | 0.00020 | 0.00025 | 0.00010 | 0.00015 | 0.00020 | 0.00025 | 0.00010 | 0.00015 | 0.00020 |
| $b, \text{ м}$ | 5.0 | 4.5 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 5.5 | 5.0 | 4.5 | 4.0 | 5.5 | 6.0 |
| $h, \text{ м}$ | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 2.5 | 3.0 | 2.2 | 2.4 |
| m | 2 | 1.5 | 1 | 2 | 1.5 | 1 | 2 | 1.5 | 1 | 2 | 1.5 |
| n | 0.033 | 0.025 | 0.027 | 0.029 | 0.031 | 0.033 | 0.038 | 0.035 | 0.029 | 0.031 | 0.033 |

Модуль 2. Неравномерное движение жидкости

Тема 4. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Критерий Рейнольдса

В первой половине XIX в. было установлено существование двух разных режимов движения жидкости. Условия перехода от одного режима к другому исследованы английским физиком и инженером О. Рейнольдсом, выполнены в 1881–1883 гг.

Рейнольдс провел свои наблюдения на специальной установке (рис. 4.1). Тонкая трубочка с темной краской подводится к входному сечению стеклянной трубки, имеющей на конце кран. Открывая или закрывая этот кран, изменяем расход воды в трубке, а, следовательно, и среднюю скорость движения воды v .

В результате таких опытов было установлено следующее:

1) при скоростях в трубке v , меньших некоторой критической скорости v_k , краска, попадающая в трубку, окрашивает только одну струйку потока (рис. 4.1, а);

2) при скоростях $v > v_k$ струйка с краской сначала теряет свою форму, а затем при дальнейшем увеличении скорости вся жидкость, находящаяся в трубке, окрашивается по всему своему объему.

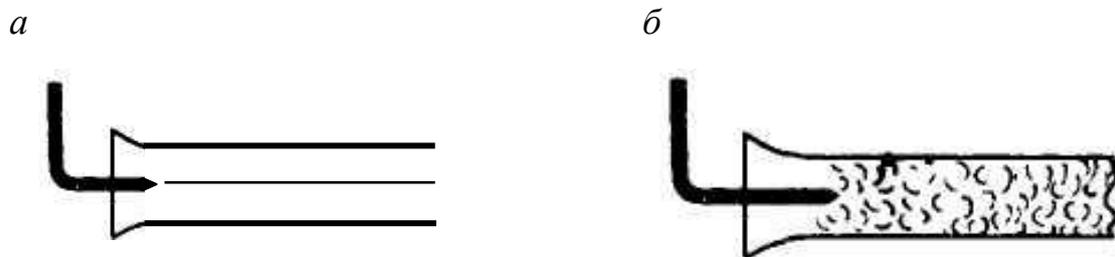


Рис. 4.1. Ламинарный (а) и турбулентный (б) режимы движения

Жидкость в целом имеет поступательное движение слева направо, вместе с тем, все составляющие ее частицы перемещаются по случайным траекториям; данное движение носит беспорядочный хаотический характер и сопровождается постоянным перемешиванием жидкости.

Опытные исследования Рейнольдса показали, что разным режимам движения отвечают и различные зависимости сопротивления трения от средней скорости. При ламинарном режиме сопротивление потока связано только с преодолением сил внутреннего трения между

движущимися с различной скоростью соседними слоями жидкости; при турбулентном же режиме, кроме этого, значительная доля энергии потока затрачивается на процесс перемешивания, вызывающий в жидкости дополнительные касательные напряжения. Из сказанного следует, что движение жидкости при турбулентном режиме всегда происходит со значительно большей затратой энергии, чем при ламинарном режиме.

Дальнейшие исследования показали, что зависимость потерь напора от скорости движения при ламинарном режиме имеет линейный характер

$$h_f = k_l v, \quad (4.1)$$

где k_l – коэффициент пропорциональности, зависящий от физической вязкости жидкости.

При турбулентном режиме зависимость потерь напора от скорости движения близка к квадрату

$$h_f = k_t v^2, \quad (4.2)$$

где k_t – коэффициент пропорциональности, в общем случае являющийся величиной переменной и зависящий от целого ряда факторов.

Существует также переходная область, где первая зависимость переходит во вторую.

Рейнольдс предложил безразмерное характерное число, получившее впоследствии название числа Рейнольдса

$$Re = vd/\nu, \quad (4.3)$$

где v – скорость;

d – диаметр трубы;

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Подставляя размерности величин, входящих в (4.3), легко убедиться в том, что Re является безразмерным. Числу Рейнольдса можно придать весьма простой смысл. Оно может рассматриваться как мера отношения кинетической энергии данного элемента жидкости к работе сил вязкости. Чем меньше число Re , тем большую роль играют силы вязкости в движущейся жидкости, а чем больше число Re , тем больше силы инерции.

Для выяснения режима движения необходимо вычислить число Рейнольдса Re и сравнить его с величиной так называемого критического числа Рейнольдса $Re_{кр}$.

При движении жидкости в напорной круглой трубе число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{vd}{\nu}. \quad (4.4)$$

Для безнапорных потоков:

$$Re_{(R)} = \frac{vR}{\nu}. \quad (4.5)$$

В формуле (4.4) в качестве характерного геометрического размера русла принят диаметр d (см), а в формуле (4.5) – гидравлический радиус R (см), равный отношению площади живого сечения w к смоченному периметру κ , т.е. $R = w/\kappa$ (для круглой трубы при напорном движении $R = d/4$).

Скорость v подставляется в формулу в см/с.

Значения ν – кинематического коэффициента вязкости жидкости (см²/с), зависящего от температуры, приведены в таблице 4.1. Если $Re < Re_{кр}$, при этом

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр}d}{\nu} = 2328, \quad (4.6)$$

или $Re < Re(R)_{кр}$, при этом

$$Re_{Rкр} = \frac{v_{кр}R}{\nu} = 580, \quad (4.7)$$

то режим движения будет устойчиво *ламинарным*.

Диаметр (d) подставляется в см, а $v_{кр}$ – в см/с.

Таблица 4.1 – Значение кинематического коэффициента вязкости воды (см²/с (стоксы), в зависимости от температуры

| T^0 | ν | T^0 | ν | T^0 | ν |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| 1 | 0.017321 | 12 | 0.012396 | 26 | 0.008774 |
| 2 | 0.016740 | 13 | 0.012067 | 28 | 0.008394 |
| 3 | 0.016193 | 14 | 0.011756 | 30 | 0.008032 |
| 4 | 0.015676 | 15 | 0.011463 | 35 | 0.007251 |
| 5 | 0.015188 | 16 | 0.011177 | 40 | 0.006587 |
| 6 | 0.014726 | 17 | 0.010888 | 45 | 0.006029 |
| 7 | 0.014289 | 18 | 0.010617 | 50 | 0.005558 |
| 8 | 0.013873 | 19 | 0.010356 | 55 | 0.005147 |
| 9 | 0.013479 | 20 | 0.010105 | 60 | 0.004779 |
| 10 | 0.013101 | 22 | 0.009892 | | |
| 11 | 0.012740 | 24 | 0.009186 | | |

Ламинарный режим наблюдается обычно в потоках, характеризующихся очень малыми линейными размерами, а поэтому сфера его распространения в естественных условиях ограничена. Он обычно имеет место в тонких капиллярных трубках, например, при движении (фильтрации) воды в порах грунта, при движении крови в кровеносных сосудах. Ламинарный режим может быть и в некапиллярных трубках при движении особенно вязких жидкостей (масел, сиропов, нефти, мазута и т. п.). Все эти жидкости обладают значительно большей вязкостью, чем вода.

Турбулентный режим значительно шире распространен в природе. Движение воды в каналах и реках, как правило, является турбулентным. В трубопроводах систем отопления, водоснабжения, вентиляции, газоснабжения – движение также является турбулентным, так как движущаяся среда (вода, воздух, газ) является маловязкой.

Контрольные вопросы

1. Что такое ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости? Каковы основные особенности механизма движения при этих режимах?
2. Какие физические свойства жидкости и характеристики потока влияют на режим движения жидкости?
3. Как зависят потери от скорости при ламинарном и турбулентном режимах?
4. Какой критерий для определения режима движения жидкости вы знаете и как им пользоваться для труб и открытого русла?
5. Что такое верхняя и нижняя критические скорости, числа Рейнольдса? При каких значениях последних возможен ламинарный режим и турбулентный режимы жидкости?
6. Приведите примеры ламинарного и турбулентного режимов, встречающихся в практике.
7. Может ли ламинарный режим движения масла перейти турбулентный и изменится его расход в системе смазки двигателя автомобиля при его разогреве?

Тема 5. Определение потерь напора. Области сопротивления

В уравнении Бернулли для потока реальной жидкости

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{mp} \quad (5.1)$$

слагаемое h_{mp} учитывает потери напора на преодоление различных гидравлических сопротивлений движению жидкости.

$$h_{mp} = \sum h_{дл} + \sum h_{мест}, \quad (5.2)$$

где $\sum h_{дл}$ – сумма потерь напора по длине отдельных участков трубопроводов или русла потока, м;

$\sum h_{мест}$ – сумма всех местных сопротивлений на рассматриваемом участке, м.

Потери по длине потока делятся на два вида: потери по длине (обусловлены силами трения частиц жидкости друг о друга и о стенки, ограничивающие поток) и местные потери (связаны с различными местными препятствиями в потоке: сужение/расширение потока, поворот и др.).

Местные потери напора вычисляются по формуле, которая в общем виде записывается так:

$$h_{мест} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.3)$$

где ζ – коэффициент потерь;

v – средняя скорость движения жидкости за местным сопротивлением.

Таблица 5.1 – Вид местного сопротивления

| Вид местного сопротивления | Значение коэффициента местного сопротивления ζ |
|---|--|
| Вход в трубу без закругления входных кромок | 0,5 |
| То же, при хорошо закругленных кромках | 0,10 |
| Выход трубы в резервуар | 1,00 |
| Плавный поворот трубы на 90° | 0,5 |
| Резкий поворот трубы на 90° | 1,25–1,50 |
| Задвижка при полном открытии | 0,11–0,12 |
| Задвижка при среднем открытии | 2,00 |
| Различные краны | 5,00–7,00 |
| Клапан с сеткой на всасывающей трубе насоса | 5,00–10,00 |

Величина сил трения зависит от ряда факторов и в первую очередь от режима движения жидкости.

Потери по длине при ламинарном режиме считают по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (5.4)$$

где λ – коэффициент Дарси.

При ламинарном движении коэффициент λ является функцией числа Рейнольдса и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{16}{\text{Re}_{(R)}}. \quad (5.5)$$

В гидротехнической практике движение жидкости обычно характеризуется числами Рейнольдса, значительно превышающими критические значения, а поэтому имеет место *турбулентный режим движения*.

Уравнение Дарси-Вейсбаха (5.4) является универсальным уравнением, с помощью которого можно определять потери напора и при турбулентном режиме, но коэффициент λ при турбулентном режиме зависит не только от числа Рейнольдса, но и от шероховатости стенок труб или русла.

При турбулентном движении возможны следующие основные области сопротивления:

1. *Область гидравлически гладких стенок*, характеризуемая следующим условием: $\delta_{\text{нл}} \gg \Delta$, где $\delta_{\text{нл}}$ – толщина ламинарного слоя, расположенного в непосредственной близости от стенки, условно называемая ламинарной пленкой, мм; Δ – средняя высота выступов шероховатости стенки или абсолютная шероховатость, зависящая от материала стенки и характера его обработки, мм.

Для круглых напорных труб толщина ламинарного слоя определяется по формуле

$$\delta_{\text{нл}} = 30 \frac{d}{\text{Re} \sqrt{\lambda}}, \quad (5.6)$$

где λ – коэффициент Дарси.

Если режим турбулентный и вычисленное число Рейнольдса удовлетворяет условию

$$2320 < Re < 20 \frac{d}{\Delta}, \quad (5.7)$$

то имеет место *область гидравлически гладких труб*.

Для гидравлически гладких труб коэффициент λ не зависит от шероховатости стенок и его можно вычислить по формуле Блазиуса или Конакова.

2. *Переходная область сопротивления*, когда высота выступов шероховатости Δ имеет тот же порядок, что и толщина δ_{nl} . Коэффициент в этой области зависит как от числа Рейнольдса, так и от шероховатости труб.

Если вычисленное число Re находится в интервале

$$20 \frac{d}{\Delta} < Re < 500 \frac{d}{\Delta}, \quad (5.8)$$

то имеем переходную область сопротивления.

3. *Область гидравлически шероховатых стенок, или область квадратичного сопротивления*, характеризуется условием

$$\delta_{nl} \ll \Delta.$$

Если число Рейнольдса удовлетворяет условию

$$Re > 500 \frac{d}{\Delta}, \quad (5.9)$$

то область сопротивления будет квадратичной.

Таблица 5.2 – Характер сопротивления

| Характер сопротивления | Расчетные формулы, их автор | Область применения формул |
|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| Гидравлически гладкие поверхности | $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$ Г. Блазиус; $\lambda = (1.8 \lg Re - 1.5)^{-2}$ П.К. Конаков | $2320 < Re < 20d/\Delta$ |
| Переходная область сопротивления | $\lambda = 0.11(1.46\Delta/d + 100/Re)^{0.25}$ А.Д. Альтшуль | $20d/\Delta < Re < 500d/\Delta$ |
| Гидравлически шероховатые поверхности | $\lambda = 0.11(\Delta/d)^{0.25}$ Б.Л. Шифринсон; $\lambda = (1.74 + 2 \lg(r/\Delta))^{-2}$ И. Никурадзе | $Re > 500d/\Delta$ |

Коэффициент λ в квадратичной области сопротивления можно определить через коэффициент Шези C , т.е.

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (5.10)$$

В технических условиях в качестве расчетных формул для C в квадратичной области сопротивления принимают следующие формулы:

1) *Павловского*

$$C = (1/n) R^y, \text{ м}^{0.5}/\text{с}, \quad (5.11)$$

где n – коэффициент шероховатости, определяемый по таблицам;

R – гидравлический радиус, м ($0,1\text{ м} < R < 3\text{ м}$);

Y – показатель степени, который можно приблизительно определить по формулам: 1) при $R < 1\text{ м}$ $y \approx 1.5\sqrt{n}$, 2) при $R > 1\text{ м}$ $y \approx 1.3\sqrt{n}$.

2) *Агроскина*

$$C = 17.72 (k + \lg R), \text{ м}^{0.5}/\text{с}, \quad (5.12)$$

где k – параметр гладкости.

Формула Агроскина может быть применена (с некоторой погрешностью в коэффициенте k) в несколько ином виде:

$$C = 1/n + 17.72 \lg R. \quad (5.13)$$

При расчетах напорных труб в квадратичной области сопротивления применима также *формула Маннинга*:

$$C = (1/n) R^{1/6}, \text{ м}^{0.5}/\text{с}, \quad (5.14)$$

а для открытых земляных русел *формула Форхгеймера*:

$$C = (1/n) R^{0.2}, \text{ м}^{0.5}/\text{с}. \quad (5.15)$$

В формулах (5.11) – (5.15) гидравлический радиус R подставляется также в метрах.

В целях упрощения расчета и избежания вычисления коэффициента λ формулу (5.4) в квадратичной области сопротивления удобно представить в виде

$$h_{\text{от}} = \frac{v^2 l}{C^2 R}. \quad (5.16)$$

Из формулы (5.16) следует, что для гидравлически шероховатых труб потери напора по длине прямо пропорциональны скорости во второй степени, поэтому эта область и носит название *квадратичной области сопротивления*.

Контрольные вопросы

1. Как зависят потери от скорости при ламинарном и турбулентном режимах?
2. От каких факторов и как зависят потери энергии, коэффициент Дарси и сопротивления по длине при ламинарном режиме? При турбулентном режиме?
3. Что такое местное сопротивление и на что тратится энергия потока при его преодолении?
4. Чем отличаются местные потери напора от потерь по длине водопровода?
5. Перечислите все известные вам виды местных сопротивлений.

Тема 6. Равномерное движение в открытых руслах

Равномерное движение в открытых руслах характеризуется постоянством по длине потока: расхода Q , уклона дна i , глубины наполнения h , размеров сечения ω и его формы; коэффициента шероховатости стенок n .

Основная формула равномерного движения имеет вид:

$$Q = \omega C \sqrt{RI}, \quad (6.1)$$

где I – гидравлический уклон, в случае равномерного движения – уклон дна i ;

R – гидравлический радиус, равный ω/χ , м;

ω – площадь живого сечения потока, м²;

χ – длина смоченного периметра, м;

C – коэффициент Шези.

Величину гидравлического радиуса R в формулы следует подставлять обязательно в метрах.

Величина коэффициента Шези C зависит от ряда факторов, и в первую очередь от шероховатости русла и гидравлического радиуса сечения. Определяется C по формуле Н.Н. Павловского или по формуле И.И. Агроскина.

В формулы для C входит коэффициент шероховатости n , который устанавливается по таблицам на основании, как правило, описательных (а не количественных) характеристик поверхности русла. Наиболее применяемые таблицы Н.Н. Павловского, М.Ф. Срибного, Дж. Бредли, В.Т. Чоу и др.

При назначении коэффициента шероховатости n по таблицам необходимо учитывать, что его значение носит условный характер, и результаты расчетов будут отличаться от фактических данных. Известно, что значения коэффициента шероховатости весьма изменчивы и зависят от большого числа факторов, которые далеко не всегда учитываются в таблицах. Это шероховатость поверхности, растительность, препятствия, неоднородность размеров и формы русла по длине, а также уровень и расход, взвешенные и донные наносы, ледяной покров.

Форма живого сечения, гидравлически наивыгоднейший профиль

Равномерное движение имеет место в искусственных водотоках – каналах, напорных и безнапорных трубах правильной формы.

Обычно каналы строят трапецеидального, параболического или сегментного поперечного сечения.

Трапецеидальное сечение. Введем следующие обозначения (рис. 6.1): b – ширина по дну, м; h – глубина наполнения, м; $m = \text{ctg } \Theta$ – коэффициент заложения откоса.

Величина m назначается в зависимости от свойств грунта или из конструктивных соображений. Для основных элементов сечения имеют место следующие соотношения:

$$\omega = bh + mh^2. \quad (6.2)$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}. \quad (6.3)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{bh + mh^2}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}. \quad (6.4)$$

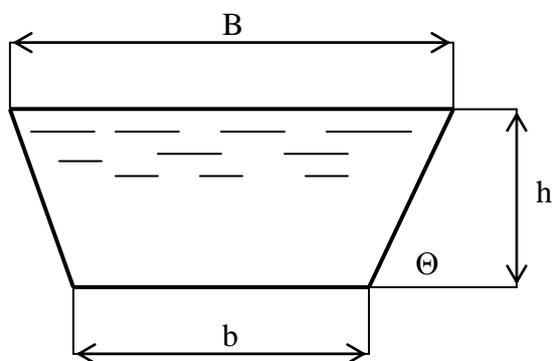


Рис. 6.1. Трапецеидальное сечение

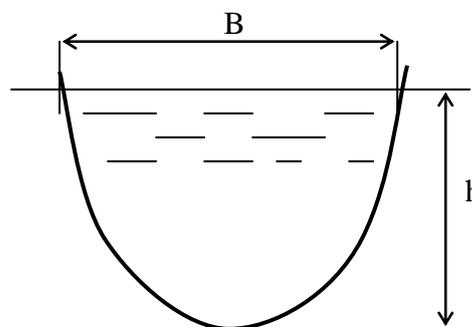


Рис. 6.2. Параболическое сечение

Параболическое сечение. Для русел, смоченный периметр которых очерчен по квадратичной параболе с уравнением $y = 2px^2$ (рис. 6.2), имеем: p – параметр параболы; h – глубина наполнения, м; B – ширина по верху сечения, м; $\tau = h/p$ – относительная глубина.

Для основных элементов сечения имеем следующие соотношения:

$$\omega = \frac{2}{3} Bh = \frac{1.8856}{\sqrt{\tau}} h^2. \quad (6.5)$$

$$\chi = p \left[\sqrt{2\tau(1+2\tau)} + \ln \left(\sqrt{2\tau} + \sqrt{1+2\tau} \right) \right] pN, \quad (6.6)$$

где N – выражение в квадратных скобках.

$$B = 2\sqrt{2p}\sqrt{h} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\tau}} h. \quad (6.7)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\tau\sqrt{\tau}}{N} p. \quad (6.8)$$

При определении χ можно пользоваться вспомогательной таблицей 6.1.

Таблица 6.1 – Значения величины $N = \sqrt{2\tau(1+2\tau)} + \ln(\sqrt{2\tau} + \sqrt{1+2\tau})$ в зависимости от τ

| τ | N | τ | N | τ | N | τ | N |
|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| 0.001 | 0.09 | 0.15 | 0.15 | 0.55 | 2.44 | 0.95 | 3.48 |
| 0.005 | 0.2 | 0.20 | 0.34 | 0.6 | 2.58 | 1 | 3.61 |
| 0.01 | 0.28 | 0.25 | 1.54 | 0.65 | 2.71 | 1.05 | 3.72 |
| 0.02 | 0.4 | 0.3 | 1.71 | 0.7 | 2.83 | 1.1 | 3.84 |
| 0.04 | 0.57 | 0.35 | 1.85 | 0.75 | 2.97 | 1.15 | 3.97 |
| 0.06 | 0.71 | 0.4 | 2.02 | 0.8 | 3.1 | 1.2 | 4.08 |
| 0.08 | 0.82 | 0.45 | 2.16 | 0.85 | 3.23 | 1.25 | 4.19 |
| 0.1 | 0.93 | 0.5 | 2.3 | 0.9 | 3.34 | | |

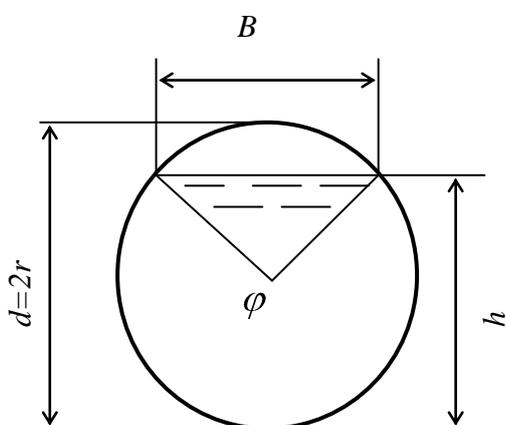


Рис. 6.3. Сегментное сечение

Сегментное сечение. Живое сечение представляет собой сегмент с центральным углом φ при радиусе r с глубиной $h \leq r$ и шириной $B \leq 2r$ (рис. 6.3).

$$h = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{4} r = r \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right). \quad (6.9)$$

Имеем следующие соотношения:

$$\omega = \frac{\pi\varphi - 180 \sin \varphi}{360} r^2 = (\varphi - \sin \varphi) \frac{r^2}{2}. \quad (6.10)$$

$$\chi = \frac{\pi\varphi}{180} r = \varphi r. \quad (6.11)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\varphi - \sin \varphi}{2\varphi} r. \quad (6.12)$$

$$B = 2 \sin \frac{\varphi}{2} r. \quad (6.13)$$

Безнапорные трубы. Основные обозначения те же, что и для сегментных сечений. Основной характеристикой является степень наполнения $a = h/N$, где $N = d$ – полная возможная глубина. Для круглых труб при $a \leq 0,5$ получается сегментное сечение.

Гидравлически наивыгоднейшее сечение. Для пропуски заданного расхода Q русло канала с уклоном дна I должно иметь строго определенную площадь живого сечения ω . Однако отдельные размеры такого живого сечения могут иметь самые различные соотношения (рис. 6.4).

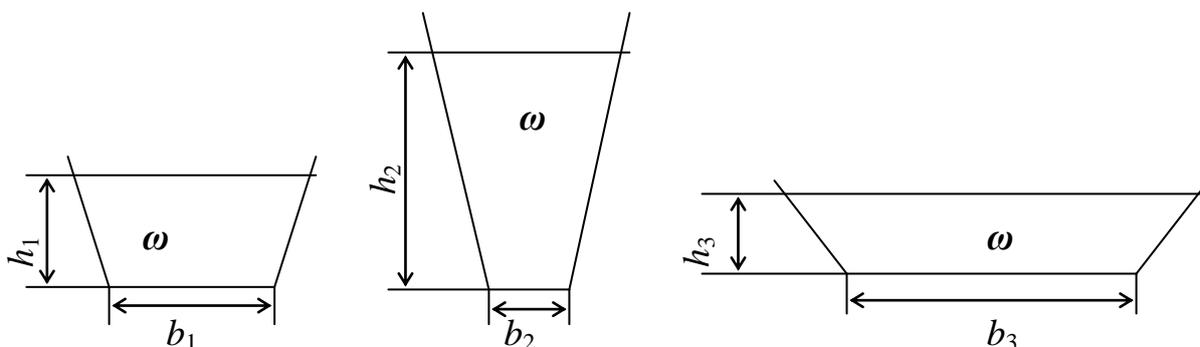


Рис. 6.4. Схемы к определению гидравлически наивыгоднейших размеров сечения

Из формулы для расчета расхода при равномерном движении (6.1) видно, что при заданной площади ω и уклоне I наибольший расход пропустит то сечение, которое имеет наибольший гидравлический радиус R (наименьший смоченный периметр χ и, следовательно, минимальную поверхность трения). Такое поперечное сечение русла, которое при заданной площади ω , уклоне I и коэффициенте шероховатости n имеет наибольшую пропускную способность, называется *гидравлически наивыгоднейшим*.

Основные задачи гидравлического расчета при равномерном движении жидкости сводятся к определению:

- а) Q и i , если заданы все элементы живого сечения;
- б) одного или двух неизвестных элементов живого сечения, если заданы Q и i .

При этом во всех случаях величина n полагается заданной. Если требуется найти среднюю скорость потока, то она находится из равенства:

$$v = \frac{Q}{\omega} = C\sqrt{RI} . \quad (6.14)$$

При решении задач, связанных с равномерным движением жидкости в безнапорных трубах, целесообразно пользоваться зависимостью

$$Q = AK_n \sqrt{i} , \quad (6.15)$$

где A – коэффициент, зависящий от формы трубы и степени наполнения a ;

$K_n = \omega_n C_n \sqrt{R_n}$ – расходная характеристика при полном наполнении.

Соответственно, средняя скорость определяется по формуле

$$v = BW_n \sqrt{i} , \quad (6.16)$$

где B – коэффициент, зависящий от формы трубы и ее наполнения;

$W_n = C_n \sqrt{R_n}$ – скоростная характеристика при полном наполнении.

Значения характеристик A и B приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Значения коэффициентов A и B при различных степенях наполнения a

| a | Круговое сечение | | a | Круговое сечение | |
|------|------------------|-------|------|------------------|-------|
| | A | B | | A | B |
| 0.05 | 0.004 | 0.184 | 0.55 | 0.589 | 1.045 |
| 0.1 | 0.017 | 0.333 | 0.6 | 0.678 | 1.084 |
| 0.15 | 0.043 | 0.457 | 0.65 | 0.766 | 1.113 |
| 0.2 | 0.08 | 0.565 | 0.7 | 0.85 | 1.137 |
| 0.25 | 0.129 | 0.661 | 0.75 | 0.927 | 1.152 |
| 0.3 | 0.138 | 0.748 | 0.8 | 0.994 | 1.159 |
| 0.35 | 0.256 | 0.821 | 0.85 | 1.048 | 1.157 |
| 0.4 | 0.332 | 0.889 | 0.9 | 1.082 | 1.142 |
| 0.45 | 0.414 | 0.948 | 0.95 | 1.087 | 1.108 |
| 0.5 | 0.5 | 1.000 | 1 | 1.00 | 1 |

Некоторые значения величин K_{Π} в зависимости от d и n даны в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Значение K для русел сегментных сечений
(для метрических мер)

| Диаметр d , м | Площадь поперечного сечения ω , м ² | Значение расходной характеристики K , м ² /с при различных коэффициентах шероховатости n | | | |
|-----------------|---|---|----------|----------|----------|
| | | 0.011 | 0.02 | 0.03 | 0.04 |
| 1.00 | 0.7854 | 29.806 | 14.707 | 8.934 | 6.185 |
| 1.50 | 1.7672 | 86.664 | 44.307 | 27.638 | 19.716 |
| 2.0 | 6.1416 | 184.573 | 96.618 | 61.747 | 44.644 |
| 2.5 | 4.9087 | 323.123 | 174.196 | 112.663 | 82.338 |
| 3.0 | 7.069 | 535.31 | 288.90 | 188.636 | 140.02 |
| 3.5 | 9.624 | 801.7 | 436.92 | 288.762 | 215.18 |
| 4.0 | 12.566 | 1140.0 | 628.32 | 418.67 | 314.16 |
| 5.0 | 19.635 | 2049.87 | 1142.71 | 707.21 | 582.86 |
| 6.0 | 28.274 | 3311.98 | 1965.37 | 1270.11 | 969.02 |
| 7.0 | 38.784 | 4961.79 | 2913.88 | 1926.76 | 1479.38 |
| 8.0 | 50.266 | 7062.81 | 4025.73 | 2766.80 | 2133.78 |
| 9.0 | 63.617 | 9609.39 | 5501.31 | 3795.18 | 2935.30 |
| 10.0 | 78.54 | 12702.26 | 7302.86 | 5051.05 | 3918.91 |
| 12.0 | 113.097 | 20427.94 | 11798.90 | 8198.57 | 6359.27 |
| 14.0 | 153.938 | 30628.30 | 17703.39 | 12320.40 | 9585.74 |
| 16.0 | 201.062 | 43469.17 | 25132.43 | 17532.43 | 13632.00 |

Примечание: Значение расходной характеристики K для иных, не указанных в таблице коэффициентов шероховатости, могут быть получены с достаточной для ориентировочных расчетов точностью по ближайшему табличному значению путем умножения его на отношение табличного коэффициента шероховатости к заданному.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов и как зависят потери энергии, коэффициент Дарси и сопротивления по длине при ламинарном режиме? При турбулентном режиме?
2. Что такое местное сопротивление и на что тратится энергия потока при его преодолении?
3. В чем заключаются отличия призматических русел от непризматических?
4. Каковы условия существования равномерного движения потока в открытом русле?
5. В каких пределах может изменяться величина коэффициента шероховатости для каналов и естественных русел?
6. Что такое гидравлически наивыгоднейшее сечение канала?

Практические задания по модулю 2

Практическое задание № 1

Решить задачу.

Задача 1. Для трапецеидального русла с коэффициентом заложения откосов $m = 1,0$, шероховатостью $n = 0,022$, шириной по дну $b = 10$ м, уклоном русла $i = 0,0003$, пропускающим расходом $Q = 9,8$ м³/с найти критическую глубину и критический уклон.

Практическое задание №2

Решить задачи.

Задача 1. Дано: $Q = 40$ м³/с, канал трапецеидального сечения: $b = 10$ м, $m = 1,5$, $i = 0,0003$, $n = 0,025$. Перегораживающее сооружение создает в канале глубину $h = 4$ м. Требуется построить кривую подпора по длине канала.

Задача 2. Имеем бетонный сбросный канал прямоугольного сечения, шириной $b = 5$ м, $Q = 20$ м³/с, $i = 0,001$, $n = 0,014$. Требуется построить кривую свободной поверхности в канале при наличии в нем вертикального уступа (переката).

Задача 3. Определить сопряженную глубину h'' и длину прыжка, возникающие в прямоугольном русле шириной $b = 5$ м, если перед прыжком глубина $h' = 0,60$ м. Расход канала $Q = 25$ м³/с.

Модуль 3. Истечение жидкости

Тема 7. Истечение жидкости из отверстий и насадок при постоянном напоре

Основная формула расхода жидкости из отверстий и насадков при постоянном напоре

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (7.1)$$

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

$\varphi = \sqrt{\alpha + \sum \zeta}$ – коэффициент скорости (рис. 7.1);

ζ – коэффициент сопротивлений;

$\varepsilon = \omega_c / \omega$ – коэффициент сжатия;

ω_c – площадь струи в сжатом сечении;

ω – площадь отверстия;

$H_0 = H + \alpha v_0^2 / 2g$ – напор с учетом скорости подхода жидкости v_0 к отверстию;

α – коэффициент Кориолиса.

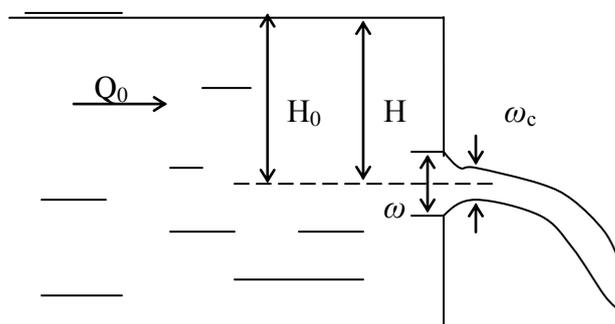


Рис. 7.1

Коэффициент расхода μ при истечении через отверстия обычно равен 0.6–0.62. При увеличении размеров отверстия и напора величина μ уменьшается.

При истечении из отверстий сжатие считается совершенным, если отверстие достаточно удалено от направляющих стенок резервуара. Условие совершенного сжатия: $l_1 > 3a$, где a – ширина отверстия, и $l_2 > 3b$, где b – высота отверстия (рис. 7.2).

Если отверстие расположено к боковым стенкам или дну ближе, чем указано выше, то сжатие считается несовершенным.

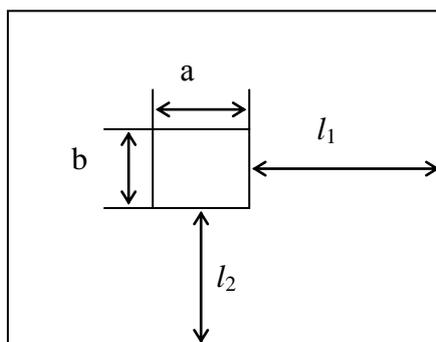


Рис. 7.2

Для увеличения коэффициента расхода μ применяются специальные приспособления, называемые насадками. Типы насадков: а) внешний цилиндрический насадок; б) внутренний цилиндрический насадок; в) конически сходящийся насадок; г) конически расходящийся насадок; д) коноидальный насадок (рис. 7.3).

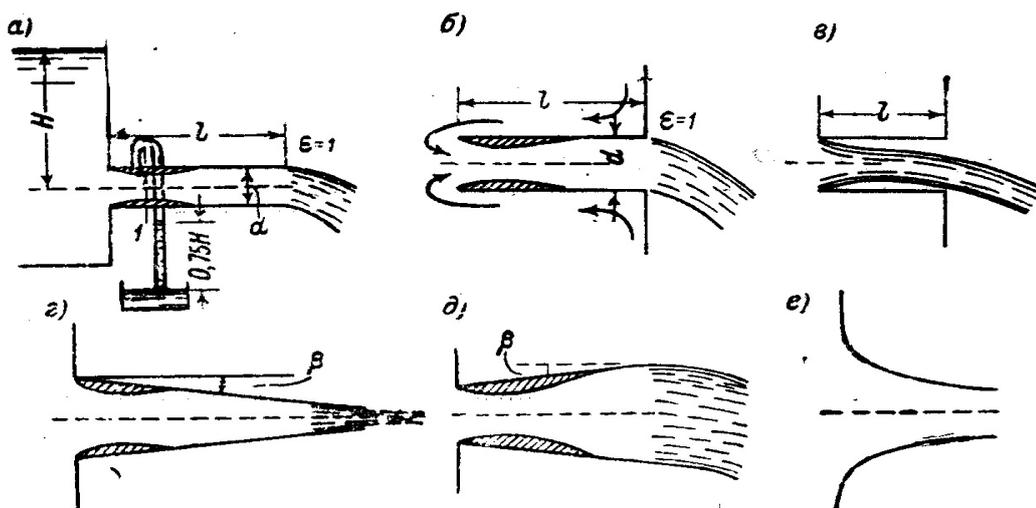


Рис. 7.3

В местах сжатия струи у стенок насадка образуются отжимы потока, заполненные жидкостью, находящейся в вихреобразном движении. В этих отжимах образуется пониженное давление (вакуум), что может быть обнаружено с помощью трубки, поставленной в область отжима, в которой жидкость поднимется до определенной высоты, соответствующей величине вакуума.

Для малых отверстий, размер которых по высоте меньше, чем $0,1 H$, численные значения коэффициентов расходов приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Численные значения коэффициентов расходов для малых отверстий

| Вид отверстия | φ | ε | μ | Примечания |
|-----------------------------------|-----------|---------------|-------|---|
| Отверстие с острой кромкой | 0,97 | 0,64 | 0,62 | При полном совершенном сжатии |
| Внешний цилиндрический насадок | 0,82 | 1 | 0,82 | При длине насадка $l = 3 - 4d$ |
| Внутренний цилиндрический насадок | 0,71 | 1 | 0,71 | – |
| Конический сходящийся насадок | 0,96 | 0,98 | 0,94 | При $\beta = 13^\circ$ |
| Конический расходящийся насадок | 0,45 | 1 | 0,45 | При $\beta = 6^\circ$ коэффициент μ отнесен к выходному сечению |
| Конический насадок | 0,97 | 1 | 0,97 | – |

При истечении из затопленного отверстия или насадка, т.е. когда свободная поверхность жидкости за отверстием находится выше его центра (рис. 7.4), практические значения всех приведенных коэффициентов находятся так же, как и для незатопленного отверстия. Напор при этом принимается равным:

$$H = H_1 - H_2. \quad (7.1)$$

Расход определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H_1 - H_2)}. \quad (7.2)$$

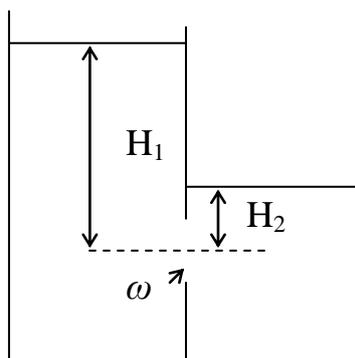


Рис. 7.4

Контрольные вопросы

1. Что такое малое отверстие в тонкой стенке?
2. Что такое коэффициент сжатия и сжатое сечение?
3. Что такое полное и неполное, совершенное и несовершенное сжатие?

4. Как зависит коэффициент расхода малого отверстия в толстой стенке от типа сжатия? При равных площадях отверстия и действующих напорах в каком соотношении будут расходы отверстий при полном и неполном, совершенном и несовершенном сжатии?

5. От каких факторов и каким образом зависят коэффициенты скорости и расхода малого отверстия в тонкой стенке?

Тема 8. Истечение жидкости из отверстий и насадок при переменном напоре

Истечение жидкости при переменном напоре является неустановившимся движением, так как расход, скорость и напор изменяются во времени.

Если из резервуара с постоянной по высоте площадью сечения Ω через отверстие ω вытекает жидкость с расходом Q (рис. 8.1) и одновременно в резервуар поступает постоянное количество жидкости Q_0 , то за время dt объем жидкости в резервуаре изменится на ΩdH за счет разности притока $Q_0 dt$ и расхода $\mu\omega\sqrt{2gH}dt$, то равенство

$$\Omega d = (Q_0 - \mu\omega\sqrt{2gH})dt \quad (8.1)$$

является основным *дифференциальным уравнением истечения из отверстий при переменном напоре.*

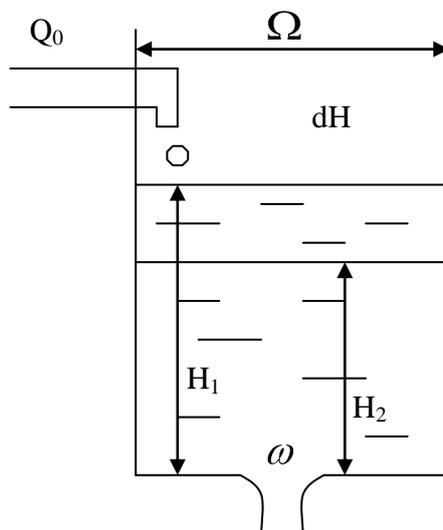


Рис. 8.1

Рассмотрим случаи, когда уравнение (8.1) интегрируется, и получаются простые расчетные формулы.

1. Истечение при переменном напоре при наличии постоянного притока (рис. 8.1).

Время t изменения напора от H_1 до H_2 в случае призматического резервуара определяется формулой

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left[\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_0} \ln \frac{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_2}} \right], \quad (8.2)$$

где H_0 – напор при установившемся движении, когда расход из отверстия равняется притоку, т.е. $H_0 = Q_0^2 / (\mu\omega\sqrt{2g})$. Остальные обозначения даны выше. Формула (8.2) справедлива для случаев, когда $Q_0 > Q$ и $Q_0 < Q$. Пределом изменения напора является H_0 .

2. Истечение при переменном напоре при отсутствии притока ($Q_0 = 0$, следовательно $H_0 = 0$).

В этом случае время изменения напора от H_1 до H_2 определяется как

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}). \quad (8.3)$$

3. Истечение при переменном напоре под переменный уровень.

Время изменения напора от H_1 до H_2 при $\Omega_1 = \text{const}$ и $\Omega_2 = \text{const}$ (рис. 8.2) определяется по формуле

$$t = \frac{\Omega_1\Omega_2}{(\Omega_1 + \Omega_2)\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}). \quad (8.4)$$

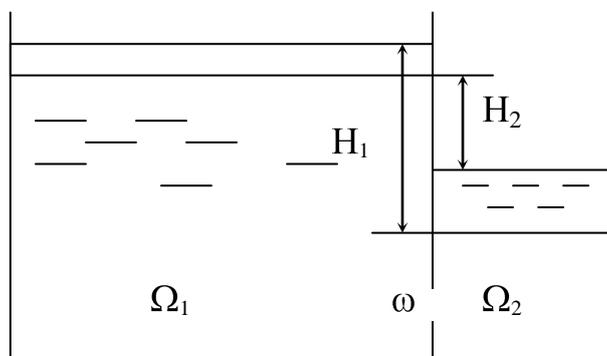


Рис. 8.2

При одинаковых площадях резервуаров получим:

$$t = \frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}). \quad (8.5)$$

Для определения времени выравнивания горизонтов в смежных резервуарах можно получить формулы, подставив в (8.4) и (8.5) $H_0 = 0$.

Если аналитической связи между Ω и H нет, то уравнение решается приближенными методами.

Контрольные вопросы

1. Истечение при переменном напоре при наличии постоянного притока.
2. Истечение при переменном напоре при отсутствии притока.
3. Истечение при переменном напоре под переменный уровень.

Тема 9. Гидравлический удар

При резком изменении скорости движения жидкости в напорном трубопроводе (например, при быстром закрытии или открытии задвижки) происходит гидравлический удар. Гидравлический удар – это резкое изменение давления, распространяющееся с большой скоростью по трубопроводу. Он характерен колебаниями давления с высокой амплитудой, в десятки, а иногда и сотни раз превышающей нормальное рабочее давление. Гидравлический удар может грозить разрушением трубопровода.

При мгновенном закрытии затвора повышение давления в трубопроводе определяется по формуле Жуковского:

$$\Delta p_{\max} = \rho c v_0, \quad (9.1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

v_0 – средняя скорость течения в трубопроводе до закрытия затвора, м/с;

c – скорость распространения ударной волны, м/с.

Скорость распространения ударной волны определяется по формуле

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho} \frac{1}{1 + \frac{k D}{E e}}}, \quad (9.2)$$

где k – модуль упругости жидкости, кг/м²;

E – модуль упругости материала стенок трубопровода, кг/м²;

D – внутренний диаметр, мм;

e – толщина стенок трубопровода, мм.

Для воды в нормальных условиях:

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$k = 2.07 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^2.$$

Таким образом, $\sqrt{\frac{k}{\rho}} = 1425 \text{ м/с}$.

Значения величин κ и E для различных жидкостей и материалов приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Отношение модулей упругости материала и труб (κ/E)

| Материал | Модуль упругости κ , кг/м ² | Модуль упругости E , кг/м ² | κ/E |
|-----------------------------|--|---|------------|
| Вода | $2.07 \cdot 10^8$ | | 1 |
| Нефть, минеральное масло | $1.35 \cdot 10^8$ | | |
| Керосин | $1.4 \cdot 10^8$ | | |
| Ртуть | $3.3 \cdot 10^9$ | | |
| Свинцовые трубы | | $5 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^5$ | 0.4–10.0 |
| Деревянные трубы | | $1 \cdot 10^9$ | 0.2 |
| Бетонные трубы | | $2 \cdot 10^9$ | 0.1 |
| Чугунные трубы | | $1 \cdot 10^{10}$ | 0.02 |
| Стальные трубы | | $2 \cdot 10^{10}$ | 0.01 |

Повышенное давление Δp_{\max} , возникшее у затвора при мгновенном его закрытии, будет распространяться по трубопроводу со скоростью (c) и за время $t = l / c$ достигнет начала трубопровода, т.е. напорного резервуара, в котором давление нормальное и равно p_0 . За время t вся жидкость в трубе остановится, т.е. $v_0 = 0$. В следующий после t момент времени жидкость начнет двигаться в сторону резервуара со скоростью v_0 и давление p_0 будет распространяться от резервуара к затвору. Через время $\tau_0 = 2l / c$, называемое фазой, волна с давлением достигнет затвора, а так как к тому времени вся масса жидкости в трубе движется от затвора к резервуару со скоростью v_0 , то у затвора давление понизится.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидравлический удар и какие силы его вызывают?
2. Что такое ударное давление, от каких факторов и как оно зависит?
3. Какое физическое свойство, не учитываемое в других темах, приходится учитывать при гидравлическом ударе?
4. Каковы меры борьбы с ударом?

Практические задания по модулю 3

Практическое задание № 1

Решить задачи.

Задача 1. Из бака при постоянном напоре вытекает вода через внешнюю цилиндрическую насадку диаметром $d = 0,02$ м. Вакуум в насадке $h_{\text{вак}} = 2,5$ м. Определить расход q , считая движение установившимся.

Задача 2. Определить расход через прямоугольный неподтопленный водослив с тонкой стенкой без бокового сжатия, если ширина водослива $b = 0,8$ м напор $H = 0,5$ м, а высота водослива $P = 0,4$ м.

Задача 3. Определить ширину прямоугольного водослива с тонкой стенкой без бокового сжатия, если его расход $Q = 340$ л/с, высота водослива $P = 0,5$ м, $H = 0,4$ м, глубина воды в нижнем бьефе $h_0 = 0,68$ м.

Практическое задание №2

Решить задачу.

Задача 1. Определить величину отверстия V трубы прямоугольного сечения, уложенной в теле земляного полотна дороги, а также напор перед трубой, если наибольший расход, который может проходить через трубу $Q = 12,50$ м³/с. Предельная допустимая скорость равна $3,5$ м/с и бытовая глубина $h_0 = 1,10$ м.

Практическое задание №3

Решить задачу.

Задача 1. Для осушения строительной площадки от грунтовых вод прорыта до водоупора траншея на глубину Hb длиной l .

В результате откачки воды из траншеи в количестве Q уровень грунтовых вод понизился с глубины H_21 до глубины H_22 , а длина дренирования оказалась равной L .

Коэффициент фильтрации грунта водоносного пласта равен k .

Известно, что $l = 150$ м; $Hb = 6$ м; $H_21 = 1$ м; $H_22 = 5$ м; $L = 200$ м; $k = 0,008$ см/с. Определить расход воды Q , откачиваемый насосами из траншеи.

Основное уравнение задачи: $Q = k \cdot l \cdot (H^2 - h_0^2) / L$, где H – мощность водоносного пласта, м; h_0 – глубина воды в траншее при откачке, м. Ответ получить в л/с.

**Перечень вопросов для самостоятельного изучения
и самоподготовки к текущему контролю знаний,
подготовки презентаций и докладов**

**Модуль 1. Уравнение Бернулли.
Равномерное движение жидкости**

Модульная единица 1.1

1. Дайте определение понятий линии тока и траектории движения частиц жидкости.
2. Что называется элементарной струйкой жидкости и какими свойствами она обладает?
3. Что называется живым сечением потока жидкости?
4. Что такое расход жидкости?
5. Что такое удельная энергия?
6. Могут ли оставаться постоянными (увеличиваться, уменьшаться) вдоль течения пьезометрический и гидродинамические напоры при движении вязкой жидкости?
7. Каков энергетический смысл величин z , p/γ , $z + p/\gamma$, $\alpha v^2/(2g)$, $z + p/\gamma + \alpha v^2/(2g)$, h_f . Какова их геометрическая интерпретация?
8. Каково аналитическое выражение, геометрический и энергетический смысл уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной и реальной жидкости?
9. Что называется гидравлическим и пьезометрическим уклоном?
10. Чем отличается уравнение Бернулли для потока реальной жидкости от уравнения элементарной струйки реальной жидкости?

Модульная единица 1.2

1. От каких факторов и как зависят потери энергии, коэффициент Дарси и сопротивления по длине при ламинарном режиме? При турбулентном режиме?
2. Что такое местное сопротивление и на что тратится энергия потока при его преодолении?
3. В чем заключаются отличия призматических русел от непризматических?
4. Каковы условия существования равномерного движения потока в открытом русле?
5. В каких пределах может изменяться величина коэффициента шероховатости для каналов и естественных русел?
6. Что такое гидравлически наивыгоднейшее сечение канала?

Модуль 2. Неравномерное движение жидкости

Модульная единица 2.1

1. Определение свободной поверхности при неравномерном движении.
2. Понятие удельной энергии сечения.
3. Понятие критической и нормальной глубины.
4. Критический уклон. Понятие.
5. Основное уравнение неравномерного движения.

Модульная единица 2.2

1. Понятие гидравлического показателя русла.
2. Формы кривых свободной поверхности.
3. Построение различных форм кривых свободной поверхности.

Модульная единица 2.3

1. Понятие гидравлического прыжка.
2. Виды сопряжений бьефов.
3. Расчет водобойного колодца.
4. Расчет водобойной стенки.
5. Понятие быстротока и расчет быстротоков.

Модуль 3. Истечение жидкости

Модульная единица 3.1

1. Что такое малое отверстие в тонкой стенке?
2. Что такое коэффициент сжатия и сжатое сечение?
3. Что такое полное и неполное, совершенное и несовершенное сжатие?
4. Как зависит коэффициент расхода малого отверстия в толстой стенке от типа сжатия? При равных площадях отверстия и действующих напорах в каком соотношении будут расходы отверстий при полном и неполном, совершенном и несовершенном сжатии?
5. От каких факторов и каким образом зависят коэффициенты скорости и расхода малого отверстия в тонкой стенке?

Модульная единица 3.2

1. Понятия трубопроводов, насадок.
2. Коэффициент сопротивления и скорости системы.
3. Классификация трубопроводов.

Модульная единица 3.3

1. Состояния грунтовых вод.
2. Основной закон фильтрации.
3. Понятия гидравлического уклона, скорости фильтрации, коэффициента порозности грунта.
4. Определение коэффициента фильтрации.
5. Уравнения движение грунтовых вод.

Перечень вопросов для осуществления промежуточного контроля

1. Основные понятия общей гидравлики. Статика жидкости (гидростатическое давление, напор).
2. Динамика жидкости (скорость течения, скоростной напор, силы сопротивления).
3. Ламинарное движение подземных вод. Турбулентное движение.
4. Уравнение Бернулли для реальной жидкости. Потери напора на трение.
5. Гидравлическое сопротивление при ламинарном и турбулентном движении жидкости.
6. Опыты Никурадзе-Зегжда.
7. Учет сопротивлений в гидравлических расчетах.
8. Гидравлические расчеты равномерного движения в напорных трубопроводах.
9. Понятие гидравлического удара.
10. Равномерное движение в открытом русле. Формула Шези.
11. Гидравлический расчет каналов и рек.
12. Истечение из отверстий и насадков.
13. Классификация водосливов. Основное уравнение для расчета водосливов.
14. Элементы расчета водосливов различных типов.
15. Неравномерное движение жидкости в каналах и реках. Энергия сечения. Критическая глубина.
16. Нормальная глубина. Основное дифференциальное уравнение неравномерного движения жидкости.
17. Кривые свободной поверхности.
18. Методы расчета неравномерного движения жидкости в каналах и реках.
19. Понятия сопряжения бьефов.
20. Понятие гидравлический прыжок.

Термины и определения

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Геометрическая высота – расстояние от произвольной горизонтальной плоскости сравнения до рассматриваемой точки в сечении.

Гидравлический удар – это резкое изменение давления, распространяющееся с большой скоростью по трубопроводу.

Гидростатическое давление – давление столба жидкости над условным уровнем.

Коэффициент объемного сжатия – относительное изменение объема жидкости при изменении давления на единицу.

Коэффициент температурного расширения – выражает относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус.

Ламинарный режим движения жидкости – упорядоченное слоистое движение жидкости без поперечного перемешивания и пульсаций скорости и давления.

Линия тока – линия, направление касательной к которой в каждой точке совпадает с направлением скорости частицы жидкости в этой точке (другими словами, в каждый момент времени частица движется вдоль линии тока).

Модуль упругости жидкостей – величина, обратная коэффициенту объемного сжатия.

Плотность – масса единицы объема жидкости.

Площадь живого сечения – площадь поперечного сечения потока, ограниченная внизу руслом, а сверху поверхностью воды и расположенная перпендикулярно к направлению течения (поперечное сечение канала, канавы, трубы).

Пьезометрическая высота – высота столба жидкости в пьезометре в данном сечении.

Расход потока – количество жидкости, протекающей через живое сечение потока в единицу времени.

Турбулентный режим движения жидкости – хаотичное, крайне нерегулярное движение жидкости.

Удельный вес жидкости – вес единицы объема этой жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания помогут бакалаврам направления подготовки 20.03.02 «Природообустройство и водопользование», профиль «Водные ресурсы и водопользование» сформировать систему знаний, умений и навыков законов равномерного и неравномерного движения воды в открытых естественных руслах и каналах, истечение жидкости через водосливы, виды сопряжения потоков и гасители энергии в нижнем бьефе гидротехнических сооружений, истечение из-под затворов, основы движения грунтовых вод.

Знать: основные термины и определения в области гидравлики; цели и задачи гидравлических расчетов; законы равномерного и неравномерного движения воды в открытых естественных руслах и каналах; виды сопряжения потоков и гасители энергии в нижнем бьефе гидротехнических сооружений.

Владеть методами: определения гидравлических параметров водотока; расчета равномерного движения рек и каналов; расчета движения воды через водосливы, пороги и другие сооружения; построения кривой свободной поверхности; расчёта гидравлического прыжка.

Приобрести навыки: построения зависимости расхода воды от уровня и уровня от расхода на основе уравнения Шези; расчета движения воды через водосливы, пороги и другие сооружения; расчета кривой свободной поверхности водотока и водохранилища; иметь представление о расчетах неразмывающих и незаиляющих скоростей потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидравлика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов ; под редакцией В. А. Кудинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2022. – 386 с.
2. Гусев, А. А. Механика жидкости и газа : учебник для академического бакалавриата / А. А. Гусев. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2018. – 232 с.
3. Спицын, И.П. Общая и речная гидравлика / И.П. Спицын, В.А. Соколова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. – 358 с.

ГИДРАВЛИКА ВОДОТОКОВ

Методические указания

Гордеев Иван Николаевич

Иванова Ольга Игоревна

Электронное издание

Редактор И.Н. Крицына

Подписано в свет 11.01.2023. Регистрационный номер 154
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117
e-mail: rio@kgau.ru