

~~30.1~~  
А-81



АРИФЖАНОВ А.М., АПАКХУЖАЕВА Т.У.

# ГИДРАВЛИКА

ТАШКЕНТ

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ И  
МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

**АРИФЖАНОВ А.М.  
АПАХУЖАЕВА Т.У.**

**ГИДРАВЛИКА**

Рекомендовано Министерством высшего и среднего специального  
образования Республики Узбекистан в качестве учебника  
для студентов

31878

**ТАШКЕНТ-2020**

№ 31878  
2020  
TASHKENT-2020

27991  
2008.21

УДК: 629.064.3(075.8)

ББК 30.123я73

А 81

**А81** Арифжанов А.М. Апахужаева Т.У. Гидравлика: (Учебное пособие) – Т.: «Инновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи», 2020. 168 с.

ISBN 978-9943-6600-2-1

Рассматриваются вопросы гидравлического расчета напорных и безнапорных систем. Освещается современное состояние гидравлического расчета трубопроводов, проектирование и расчета каналов.

Приводятся зависимости для определения величины потери напора в гидравлических системах. Дается гидравлический расчет трубопроводов, каналов и гидротехнических сооружений.

Учебное пособие рассчитано для студентов технического направления бакалавриата и специальностей магистратуры.

УДК: 629.064.3(075.8)

ББК 30.123я73

**Рецензенты:**

Э.Ж.Махмудов – д.т.н., проф.;

Х.Файзиев. – к.т.н., доц.

ISBN 978-9943-6600-2-1

© «Инновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи», 2020

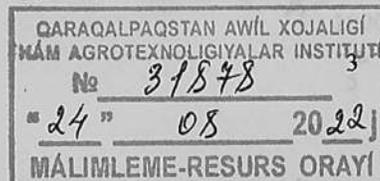
## ВВЕДЕНИЕ

Гидравлика – наука, изучающая законы равновесия и механического движения жидкостей и разрабатывающая методы применения этих законов для решения различных прикладных задач. В настоящее время почти во всех областях техники применяются различные гидравлические устройства, основанные на использовании гидравлических законов. Главнейшие области применения гидравлики – гидротехника, мелиорация и водное хозяйство, гидроэнергетика, водоснабжение и канализация, водный транспорт, машиностроение, авиация и т.д.

В данном учебном пособии изложены основные понятия гидравлики, описываются гидравлические явления и приводятся основные сведения о методах и способах различных гидравлических расчетов. Рассматриваются вопросы гидравлического расчета напорных и безнапорных систем. Освещается современное состояние гидравлического расчета трубопроводов, проектирование и расчета каналов.

Приводятся зависимости для определения величины потери напора в гидравлических системах. Дается гидравлический расчет трубопроводов, каналов и гидротехнических сооружений.

Учебное пособие составлено в соответствии с программами предмета Гидравлика для направления бакалавриата «Водное хозяйство и мелиорация», «Гидротехническое строительство» и Гидрология (водохранилищ). Широкое развитие мелиорации и водного хозяйства в нашей стране приводит к созданию новых технически совершенных мелиоративных систем. Для обеспечения надежной работы этих систем проводятся гидравлические расчеты, которые являются важной частью комплекса инженерных расчетов объектов и сооружений, входящих в состав систем. Поэтому в учебном пособии уделено большое внимание гидравлическим условиям работы мелиоративных каналов, гидротехнических сооружений и трубопроводов.



27451  
2022.21

В учебное пособие включены примеры и задачи, которые недостаточно подробно изложены в учебниках по гидравлике.

В некоторых разделах учебного пособия студентам рекомендуется обращаться к гидравлическим справочникам и нормативной литературе.

Предлагаемое учебное пособие обладает определенной методической и научной преемственностью по отношению к другим подобным учебным пособиям.

## 1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

### 1.1. Основные физические свойства реальной жидкости и её характеристики

Капельные жидкости обладают двумя свойствами:

1. **Текучесть** – слабое сопротивление изменению своей формы (в отличие от твердых тел), что обуславливается пренебрежимо малой величиной внутренних касательных напряжений в покоящейся жидкости  $\tau \approx 0$ .

2. Малое изменение объема жидкости при изменении давления и температуры (в отличие от газов).

Это свойство жидкости характеризуется коэффициентами объёмного сжатия  $\beta_v$  и температурного расширения  $\beta_t$ .

**Коэффициент объёмного сжатия**  $\beta_v$  – это относительное изменение объёма жидкости на единицу изменения давления.

$$\beta_v = \frac{\Delta V}{V \Delta P}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta V$  – изменение объёма;  $V$  – объем соответствующей изменению давления на величину  $\Delta P$ .

В системе СИ величина  $\beta_v$  выражается в  $\text{Па}^{-1}$  и для воды при давлении до 500 ат. и температуре до 20°C

$$\beta_v \approx \frac{1}{2 \cdot 10^9} \text{Па}^{-1}, \quad \left( \beta_v \approx \frac{1}{20000} \text{см}^2/\text{кгс} \right),$$

здесь  $\text{Па}$  – давление, выраженное в Паскалях (см. пункт 2.4)

**Коэффициент температурного расширения**  $\beta_t$  выражает относительное изменение объёма жидкости при изменении температуры на 1 градус:

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V \Delta t}. \quad (1.2)$$

Для воды в нормальных условиях можно принимать:

$$\beta_t = \frac{1}{10000} \text{C}^{-1}.$$

Жидкости между собой различаются плотностью и удельным весом.

**Плотность**  $\rho$  - это распределение массы жидкости в единице объёма.

$$\rho = \frac{M}{W}. \quad (1.3)$$

Плотность пресной воды при температуре  $4^\circ\text{C}$ ,  $\rho_4 = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

**Удельный вес**  $\gamma$  - это вес единицы объёма жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{W}. \quad (1.4)$$

Удельный вес пресной воды при температуре  $4^\circ\text{C}$ ,  $9810 \text{ н/м}^3$

$$\gamma_4 = 1000 \text{ кгс/м}^3 = 1 \text{ тс/м}^3.$$

Между плотностью и удельным весом существует связь:

$$\gamma = g\rho, \quad (1.5)$$

где:  $g$  - ускорение свободного падения.

Для выражения величин в системах СИ и МКГСС следует привести следующие данные:

Система

Ед. изм. L F M T 1н = 1кг · 1м/с<sup>2</sup>

СИ M N кг с 1кгс = 1кг · 9.81м/с<sup>2</sup>

## 1.2. Примерный состав задач по теме 1

**Цель решения задач** - закрепить знания основных физических свойств жидкостей, научить студентов свободно пользоваться основными зависимостями для определения величин  $\rho$  и  $\gamma$ , показать связь между этими величинами, научить студентов выражению величин в системе единиц измерения.

### Пример 1.1

Сосуд наполнен жидкостью, занимающей объём  $V = 3 \text{ м}^3$ . На сколько уменьшится этот объём при увеличении давления на величину  $\Delta P = 300 \text{ кгс/см}^2$

**Решение:**

**Коэффициент объёмного сжатия**  $\beta_v = 10^4 \text{ см}^2/\text{кгс}$ .

Изменение объёма при увеличении давления определим из выражения:

$$\beta_v = \frac{\Delta V}{V \Delta P}, \quad \Delta V = \beta_v \cdot V \cdot \Delta P = 3 \cdot 100^3 \cdot 300 = \frac{900}{2} = 0,045 \text{ см}^3.$$

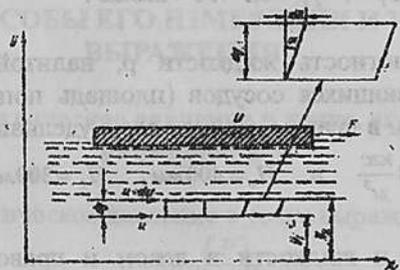


Рис.1.1. К примеру 1.1.

### Пример 1.2

В отопительной системе (котёл, радиаторы, трубопроводы) небольшого дома содержится  $V = 0.5 \text{ м}^3$  воды. Сколько воды дополнительно войдет в расширительный сосуд при нагревании от  $20^\circ\text{C}$  до  $90^\circ\text{C}$  Коэффициент объёмного расширения  $\beta_t = 0.0004^\circ\text{C}^{-1}$

**Решение:**

Изменение объёма воды  $\Delta V$  при нагревании определим из уравнения

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V \Delta t}, \quad \Delta V = \beta_t V \Delta t = 0,0004 \cdot 0,5 \cdot (90^\circ - 20^\circ) = 0,0002 \cdot 70 = 0,014 \text{ м}^3.$$

### Пример 1.3

Резервуар объёмом  $300 \text{ л}$  заполнен жидкостью, плотность которой  $\rho_{cu} = 0,75 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ . Определить удельный вес жидкости.

**Решение:**

1. Плотность в единицах системы СИ

$$\rho_{cu} = 0,75 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = \frac{0,75 \cdot 100^3}{1000} = 750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

2. Удельный вес жидкости в единицах системы:

а) СИ:  $\gamma_{cu} = \rho_{cu} \cdot g = 750 \cdot 9,81 = 7360 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ ;

б) МКГСС:  $\gamma_T = \frac{\gamma_{св}}{9,81} = \frac{7360}{9,81} = 750 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3}$

3. Вес жидкости в единицах систем:

а) СИ:  $G_{св} = V \cdot \gamma_{св} = 0,3 \cdot 7360 = 2207 \text{ н}$  ;

б) МКГСС:  $G_T = V \cdot \gamma_T = 0,3 \cdot 750 = 225 \text{ кгс}$  .

**Пример 1.4**

Определить плотность жидкости  $\rho$ , налитой в левую часть открытых сообщающихся сосудов (площадь поперечного сечения их одинакова), если в правом колене вода с удельным весом

$$\gamma = 1000 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3} \text{ и } H_1 = 400 \text{ мм}, \quad H_2 = 300 \text{ мм} \quad (\text{рис. 1.1})$$

**Решение:**

Объём воды и жидкости в левом и правом сосудах выше плоскости О-О имеют одинаковый вес, поэтому:

$$\gamma \cdot H_2 \cdot \omega = \gamma_{ж} \cdot H_1 \cdot \omega \quad \text{или} \quad \gamma \cdot H_2 = \gamma_{ж} \cdot H_1$$

получим:

$$\gamma_{ж} = \frac{\gamma \cdot H_2}{H_1}$$

Удельный вес жидкости в единицах:

а) системы СИ:  $j_{ж(св)} = 750 \cdot 9,81 = 7360 \frac{\text{н}}{\text{м}^3}$ ,

б) системы МКГСС:  $j_{ж(св)} = \frac{\gamma_T \cdot H_1}{H_2} = \frac{1000 \cdot 300}{400} = 750 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3}$  .

3. Плотность жидкости, выраженная единицами измерения:

а) Системы СИ:  $\rho_{ж(св)} = \frac{\gamma_{ж}}{9,81} = \frac{7360}{9,81} = 750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,

б) Системы МКГСС:  $\rho_{ж(г)} = \frac{\gamma_{ж(г)}}{g} = \frac{750}{9,81} = 76,4 \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$  .

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТОЧКЕ, СПОСОБЫ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ И ЧИСЛОВОГО ВЫРАЖЕНИЯ

### 2.1. Гидростатическое давление в точке, его свойства и размерность

Гидростатическое давление в точке выражается как:

$$p = \lim_{\Delta \omega \rightarrow 0} \left( \frac{P}{\omega} \right), \quad (2.1)$$

где  $P$  – сила действующая на рассматриваемую площадь  $\omega$ .

Гидростатическое давление имеет два свойства:

1. Гидростатическое давление действует нормально к площадке действия и направленно по внутренней нормали.
2. Величина гидростатического давления в данной точке по всем направлениям одинакова (этот закон демонстрируется на приборе Гартля).

### 2.2. Основное уравнение гидростатики в случае действия на жидкость только силы тяжести и его следствия

Основное уравнение гидростатического давления в дифференциальной форме имеет вид:

$$dp = \rho ( Xdx + Ydy + Zdz )$$

Дифференциальное уравнение для рассматриваемого случая имеет следующий вид:

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dz = -\gamma dz, \quad (2.2)$$

$$\frac{dp}{\gamma} + dz = 0. \quad (2.3)$$

Рассматриваем покоящуюся жидкость, внутри которой намечаем точку  $A$  с ординатой  $Z$ .

На поверхности жидкости действует поверхностное давление  $P_0$ . Ордината точки на поверхности жидкости  $Z_0$  (рис. 2.1)

После интегрирования выражения (2.3) получим:

$$\frac{P}{\gamma} + Z = \frac{P_0}{\gamma} + Z_0 = const. \quad (2.4)$$

Это уравнение называется основным уравнением гидростатики. Из этого уравнения вытекают следующие следствия:

**А) Формула для определения гидростатического давления в точке**

В покоящейся жидкости с удельным весом  $\gamma$  проведём оси координат и возьмём 2 точки; одну на поверхности жидкости, где давление  $P_0$ , другую точку  $A$  на глубине  $h$ , давление в которой требуется определить (рис.2.1). Применяя к этим точкам уравнение (2.4) после преобразования получим:

$$P = P_0 + \gamma h. \quad (2.5)$$

Это и есть формула для определения давления в покоящейся жидкости.

**Б) Поверхность равного давления. Плоскость сравнения**

Поверхность, проведённая в покоящейся жидкости таким образом, показывает, что давление во всех её точках будет одинаковым и называется поверхностью равного давления.

В случае, когда объёмные силы  $F$  представлены только силами тяжести, т.е

$$F = G.$$

Дифференциальное уравнение равновесия жидкости будет иметь вид:

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dz = 0, \quad (2.6)$$

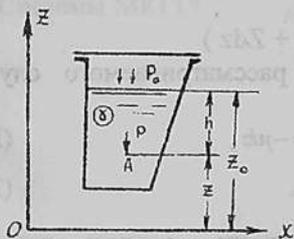


Рис. 2.1. Давление для «тяжелой жидкости»

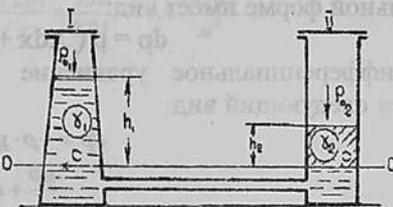


Рис. 2.2. К закону сообщающихся сосудов

т.к  $g \neq 0$  и  $\rho \neq 0$ , то для выполнения равенства должно быть  $dz = 0$ , т.е  $Z = const$

Таким образом, когда на жидкость действуют только силы тяжести, поверхность равного давления будет горизонтальная плоскость. Свободная поверхность жидкости является частным случаем поверхности равного давления.

Для определения координаты  $Z$  отдельных точек жидкости используется горизонтальная плоскость, проводимая на произвольной высоте. Эта плоскость называется плоскостью сравнения и обозначается  $O-O$  (рис. 2.2).

**В) Закон Паскаля.**

Из основного уравнения гидростатики, записанного в виде (2.5) видно, что в случае изменения поверхностного (внешнего) давления на некоторую величину  $\Delta P_0$  и на такую же величину изменится давление  $P$  во всех точках жидкости.

Согласно закону Паскаля, изменение поверхностного давления в любой точке покоящейся жидкости, не нарушающее ее равновесия, передается во все точки без изменения (пример 2.2).

**Г) Сообщающиеся сосуды.**

Для анализа условий равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах (рис.2.2) применяется основное уравнение гидростатики.

Сообщающиеся сосуды 1 и 2 закрыты и наполнены различными жидкостями, не смешивающимися между собой, давления на поверхности жидкости  $P_{01}$  и  $P_{02}$

Как видно из рис. 2.2, давление в точках «С»:

$$\text{в первом сосуде } P_{c1} = P_{01} + \gamma_1 h_1,$$

$$\text{во втором сосуде } P_{c2} = P_{02} + \gamma_2 h_2,$$

$$\text{но } P_{c1} = P_{c2},$$

т.к точки «С» лежат на одной горизонтальной поверхности  $O-O$ , являющейся плоскостью равных давлений, поэтому будет:

$$P_{01} + \gamma_1 h_1 = P_{02} + \gamma_2 h_2,$$

или

$$P_{01} - P_{02} = \gamma_2 h_2 - \gamma_1 h_1.$$

Последняя зависимость позволяет решить ряд разных задач.

**Случай 1:** В сосуды налита одинаковая жидкость при одинаковых давлениях на ее поверхности. Т.к  $\gamma_1 = \gamma_2$  и  $P_{01} = P_{02}$  то  $h_1 = h_2$ .

**Случай 2:** В сосуды налита одинаковая жидкость но давления на ее поверхности различны. При равенстве  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$

$$\Delta p = p_{01} - p_{02} = \gamma(h_2 - h_1).$$

**Случай 3:** В сосуды налиты различные несмешивающиеся жидкости, но давления на их поверхности одинаковы, т.е.  $p_{01} = p_{02}$ , тогда будет равенство  $\gamma_1 h_1 = \gamma_2 h_2$ .

Следовательно:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}.$$

На принципе действия сообщающихся сосудов основано устройство водомерных стекол (случай 1), приборов для измерения давления (случай 2) и определения удельного веса жидкости (случай 3).

### 2.3. Техническая характеристика гидростатического давления и формулы для его определения

На любую точку в жидкости действует абсолютное давление:

$$p_A = p_0 + \gamma h. \quad (2.7)$$

Если свободная поверхность жидкости открыта, то поверхностное (внешнее) давление равно атмосферному  $p_0 = p_a$ .

Если свободная поверхность закрыта, то  $P_0$  может быть больше или меньше  $P_a$

Если абсолютное давление в точке больше атмосферного  $p_A > p_a$ , то избыток абсолютного давления над атмосферным называется манометрическим:

$$p_m = p_A - p_a. \quad (2.8)$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного  $p_A < p_a$ , недостаток до атмосферного называется вакуумметрическим давлением, величина которого равна:

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_A. \quad (2.9)$$

Весовое давление зависит от глубины погружения точки и объёмного веса жидкости

$$p_g = \gamma \cdot h. \quad (2.10)$$

В случае когда на свободную поверхность жидкости действует

атмосферное давление, весовое давление равно манометрическому.

$$\gamma h = p_A - p_0 = p_m. \quad (2.11)$$

### 2.4. Способы числового выражения величины гидростатического давления

В системе СИ давление выражается в Паскалях (Па).

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$$

$$1 \text{ Па} = 0.0000102 \text{ ат. (техническая атмосфера)}$$

$$1 \text{ кгс} / \text{см}^2 = 1 \text{ ат} = 98100 \text{ Па} \approx 100 \text{ кПа (кило Паскаль)}$$

Для воды манометрическое давление на глубине  $h = 10 \text{ м}$  равно  $98.10 \text{ кПа}$  или  $\approx 100 \text{ кПа}$ , или  $1$ , ат или  $10000 \text{ кгс} / \text{м}^2 = 10 \text{ тс} / \text{м}^2$

Один миллиметр ртутного столба создаёт давление, равное  $132.2 \text{ Па} \approx 133 \text{ Па}$

Столбик ртути высотой  $735 \text{ мм}$  создает давление в  $1 \text{ ат}$ .

### 2.5. Определение давления в точке по показаниям приборов

Все приборы для измерения давления делятся на две основные группы: жидкостные (трубные) и механические.

К жидкостным приборам относят пьезометры (рис. 2.3), U-образные манометры (рис. 2.4) и вакуумметры (рис. 2.5, рис. 2.6), ртутно-чашечные манометры (рис. 2.7), дифференциальные манометры (рис. 2.8) и др.

Основной частью жидкостных приборов является стеклянная трубка диаметром от  $10$  до  $20 \text{ мм}$  по отметке уровня жидкости в которой производится измерение давления. Жидкость в трубке может быть та же что и в сосуде или другая: ртуть, спирт и т.д.

Если в измерительном приборе жидкость та же что и в сосуде, то при измерении давления необходимо определить пьезометрическую  $h_p$  или вакуумметрическую  $h_{\text{вак}}$  высоту.

$h_p$  – высота столба жидкости в открытом пьезометре или U-образном манометре над рассматриваемой точкой (рис. 2.3). Пьезометрическая высота отвечает манометрическому давлению

$$p_m = \gamma \cdot h_p.$$

Если в точке известно абсолютное давление  $p_A$  то  $h_p$  определяется по зависимости:

$$h_p = \frac{p_A - p_a}{\gamma} \quad (2.12)$$

Из этой зависимости по известной  $h_p$  легко определяется  $p_A$ . В жидкости, находящейся в состоянии покоя, давление в точке  $A$  (рис. 2.3) как со стороны пьезометра, так и со стороны сосуда одинаково

$$p_a + \gamma h_p = p_0 + \gamma h \quad (2.13)$$

Откуда получаем выражение для определения пьезометрической высоты:

$$h_p = \frac{p_0 - p_a}{\gamma} + h \quad (2.14)$$

В открытом сосуде когда  $p_0 = p_a$ ,  $h_p = h$ .

Если абсолютное давление в точке меньше атмосферного, то в данной точке измеряется вакуум или вакуумметрическое давление  $p_{\text{вак}}$ , выражаемое вакуумметрической высотой  $h_{\text{вак}}$ :

$$p_{\text{вак}} = \gamma h_{\text{вак}}$$

где  $h_{\text{вак}}$  — определяется как разница отметок точки, в которой измеряется давление и свободной поверхности жидкости в  $U$ -образном вакуумметре (рис. 2.5).

Дифференциальные манометры (рис. 2.8) используются для измерения разности давления в двух точках. Наиболее часто применяются дифференциальные ртутные манометры. Разница давления определяется по зависимости:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta h (\gamma_{\text{рт}} - \gamma) \quad (2.15)$$

где:  $\gamma_{\text{рт}}$  — удельный вес ртути;  
 $\gamma$  — удельный вес жидкости в сосудах, где измеряется давление;

$\Delta h$  — разность отметок уровня жидкости в дифференциальном манометре.

К механическим приборам относятся пружинные (рис.2.9) и мембранные (рис.2.10) манометры и вакуумметры, а также мембранный мановакуумметры (рис.2.11).

Манометрические давление или вакуум с помощью механических приборов измеряется непосредственно по показаниям приборов.

## 2.6. Примерный состав задач по теме 2

### Пример 2.1

Определить давление на свободной поверхности в закрытом резервуаре с бензином если уровень бензина в открытом пьезометре выше уровня бензина в резервуаре на  $h=2$  м, а удельный вес бензина  $\gamma_{\text{б}} = 0.75 \text{ гс/см}^3$  (рис.2.12)

#### Решение:

1. Проведём плоскость равного давления  $O-O$  по свободной поверхности в резервуаре. Давление на свободной поверхности в резервуаре и в точке  $S$  пьезометра равны между собой  $p_0 = p_S$ .

Абсолютное давление на поверхности бензина будет:

$$p_{a(0)} = p + \gamma_{\text{б}} h = 1 \text{ кгс/см}^2 + 0.75 \text{ гс/см}^3 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \text{ м} \cdot 10^2 = 1.15 \text{ кгс/см}^2 = 1.15 \text{ ат} = 112800 \text{ н/м}^2 \approx 115 \text{ кПа}$$

2. Манометрическое давление на поверхности определится так:

$$p_m = p_{a(0)} - p_a = \gamma_{\text{б}} h = 0.75 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^2 = 0.15 \text{ кгс/см}^2 = 15 \text{ кПа}$$

### Пример 2.2

Определить силу, с которой гидравлический пресс будет сжимать образец (рис.2.13), если известно:

$$q = 5 \text{ н}; \quad a = 0.2 \text{ м}; \quad b = 0.05 \text{ м}; \quad d = 10 \text{ мм}; \\ D = 100 \text{ мм};$$

#### Решение:

1. Давление манометрическое под малым поршнем будет:

$$p_m = q(a+b) / b \cdot 0.785 d^2 = 5 \cdot (0.8 + 0.05) / 0.05 \cdot 0.785 \cdot 0.01^2 = 318000 \text{ Па} = 318 \text{ кПа}$$

2. Давление под большим поршнем считаем таким же как и под малым, и сила, сжимающая образец, будет:

$$P = \Omega p_m = 0.785 \cdot 0.1^2 \cdot 318000 = 2500 \text{ н} = 253 \text{ кгс}$$

### Пример 2.3

Два  $U$ -образных моновакуумметра (водяной и ртутный) подключены к резервуару, заполненному водой (рис.2.14) Определить: А) давление на поверхности воды в резервуаре  $p_0$ , если  $h_p = 1$  м. Б) высоту ртутного столба  $h_{\text{рт}}$ , если:  $\gamma_{\text{рт}} = 13.6 \text{ гс/см}^3$ ,  $H = 3$  м.

#### Решение:

А) 1. Манометрическое давление на поверхности воды в резервуаре определится как:

$$p_{\text{мо}} = \gamma h_p = 0.001 \cdot 100 = 0.1 \text{ кгс/см}^2 = 10 \text{ кПа}$$

2. Абсолютное давление на поверхности жидкости будет:

$$p_A = p_a + p_{mo} = 0.1 + 1 = 1.1 \text{ кгс/см}^2 = 110 \text{ кПа.}$$

Б) 1. Манометрическое давление в точке S на уровне раздела воды и ртути в u-образном мановакуумметре:

$$p_{M(S)} = p_{M(O)} + \gamma \cdot H = 0.1 + 0.001 \cdot 300 = 0.4 \text{ кгс/см}^2 = 40 \text{ кПа.}$$

2. Высота столба ртути:

$$h_{рт} = p_{M(S)} / \gamma_{рт} = 0.4 / 0.0136 = 294 \text{ мм.}$$

### Пример 2.4

Определить вакуум на поверхности воды в резервуаре (рис.2.15) если  $h=1\text{м}$ ,  $h_{рт}=147\text{мм}$ ,  $\gamma_{рт}=13.6\text{гс/см}^3$ .

**Решение:**

1. На уровне раздела воды и ртути в u-образном моновакуумметре (точка S) абсолютное давление будет:

$$p_{A(S)} = p_a - \gamma_{рт} \cdot h_{рт} = 1 - 0.0136 \cdot 14.7 = 0.8 \text{ кгс/см}^2 = 80 \text{ кПа.}$$

2. На поверхности воды в резервуаре абсолютное давление получим:

$$p_{A(O)} = p_{A(S)} - \gamma \cdot h = 0.8 - 0.001 \cdot 100 = 0.7 \text{ кгс/см}^2 = 70 \text{ кПа.}$$

3. Вакуум на поверхности будет:

$$p_{\text{вак}} = 1 - 0.7 = 0.3 \text{ кгс/см}^2 = 30 \text{ кПа.}$$

### Пример 2.5

Определить разность давлений в резервуарах A и B (рис.2.16) заполненных бензином, если показание дифференциального ртутного манометра

$$h_{рт} = 100 \text{ мм, } \gamma_{\sigma} = 0.8 \text{ г/см}^3$$

**Решение:**

Составим уравнение равновесия относительно плоскости равного давления O-O:

$$p_1 + \gamma_{\sigma} (h + h_{рт}) = p_2 + \gamma_{\sigma} \cdot h + \gamma_{рт} \cdot h_{рт}.$$

Из уравнения найдем разность давлений в резервуарах

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma_{рт} \cdot h_{рт} - \gamma_{\sigma} \cdot h_{рт} = h_{рт} (\gamma_{рт} - \gamma_{\sigma}),$$

$$\Delta p = 10(0.0136 - 0.0008) = 0.128 \text{ кгс/см}^2 = 12.8 \text{ кПа.}$$



Рис. 2.3. Пьезометр

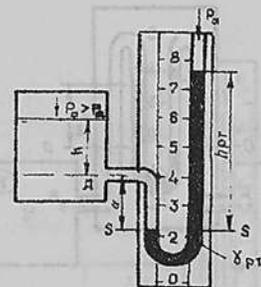


Рис. 2.4. U-образный ртутный манометр

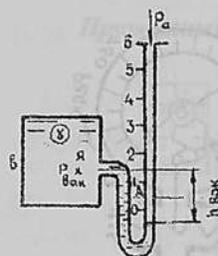


Рис. 2.5. U-образный вакуумметр

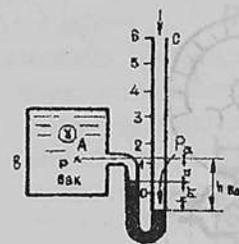


Рис. 2.6. U-образный ртутный вакуумметр

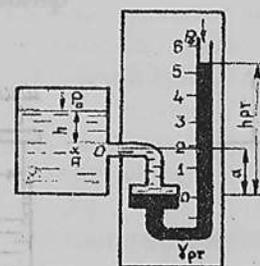
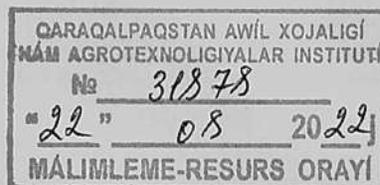


Рис. 2.7. Чашечный мановакуумметр



27451  
20.08.22

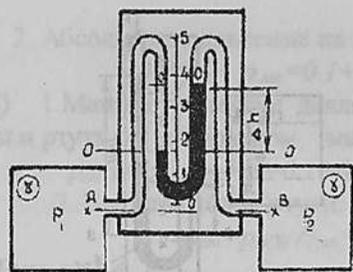


Рис. 2.8. Дифференциальный манометр



Рис. 2.9. Пружинный манометр



Рис. 2.10. Мембранный манометр

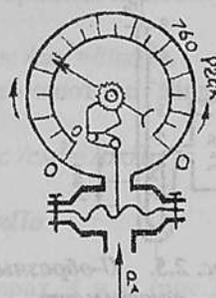


Рис. 2.11. Мембранный мановакуумметр

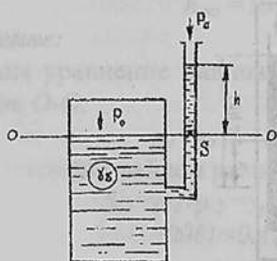


Рис. 2.12. К примеру 2.1

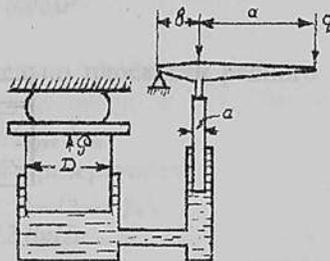
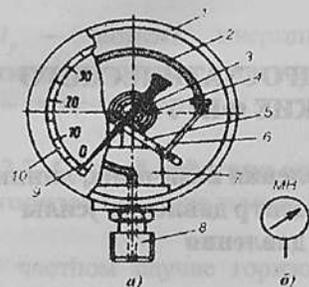
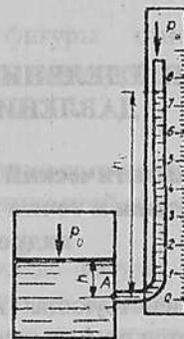


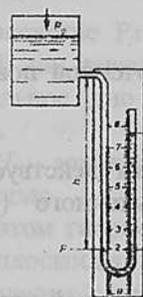
Рис. 2.13. К примеру 2.2



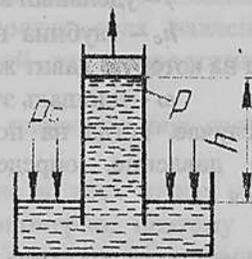
Пружинный манометр



Пьезометр



U-образный пьезометр



Вакуум

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ ФИГУРЫ

#### 3.1. Аналитический способ определения величины, линии действия и точки приложения (центр давления) силы гидростатического давления

Сила, действующая на плоскую фигуру произвольной формы определяется по формуле:

$$P = (p_0 + \gamma h_c) \omega, \quad (3.1)$$

где  $p_0$  – поверхностное давление;  
 $\gamma$  – удельный вес жидкости;  
 $h_c$  – глубина центра тяжести смоченной поверхности фигуры на которую давит жидкость;  
 $\omega$  – площадь этой фигуры.

В случае, когда на поверхности жидкости действует атмосферное давление, определяется сила избыточного (весового) давления

$$P = \gamma \cdot h_c \cdot \omega. \quad (3.2)$$

Сила весового давления равна площади смоченной поверхности фигуры, умноженной на величину давления в центре тяжести этой фигуры. Направление линии действия силы гидростатического давления перпендикулярно к плоскости рассматриваемой фигуры.

Положение центра давления (точки приложения силы избыточного давления) определяется по формуле (рис.3.1):

$$Y_d = Y_c + \frac{I_c}{\omega Y_c}, \quad (3.3)$$

где  $Y_d$  – координата центра давления;

$Y_c$  – координата центра тяжести рассматриваемой фигуры;

Здесь необходимо обратить внимание студентов на положение оси OY: ось OY представляет собой линию пересечения плоскости рассматриваемой фигуры с вертикальной плоскостью.

Начало координат лежит на поверхности жидкости, где действует атмосферное давление:

$$e = \frac{I_c}{Y_c \omega} \quad (3.4)$$

$I_c$  – момент инерции плоской фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести фигуры;

$e$  – эксцентриситет.

#### 3.2. Случай действия силы гидростатического давления на горизонтальную плоскость. Гидростатический парадокс.

В частном случае горизонтальной плоской фигуры, когда на свободной поверхности действует атмосферное давление  $p_0 = p_a$ , величина силы избыточного (весового) давления определяется по формуле:

$$P = \gamma H \omega, \quad (3.5)$$

При равенстве  $P_0$ , плотностей  $\rho$ , площадей основания  $\omega$  и глубин  $H$  не зависимо от формы сосуда сила давления на горизонтальное дно будет одной и той же (гидростатический парадокс).

Здесь  $H$  – глубина рассматриваемой плоскости под свободной поверхностью.

При этом гидростатическое давление во всех точках горизонтальной плоскости распределяется равномерно, поэтому  $e=0$  и центр давления совпадает с центром тяжести рассматриваемой плоскости.

#### 3.3. Эпюра гидростатического давления

Эпюра гидростатического давления – это графическое изображение распределения давления на поверхности, ограничивающей жидкость.

Формула для определения абсолютного гидростатического давления в точке:

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

Изменение гидростатического давления по глубине подчиняется линейному закону.

Для построения эпюры гидростатического давления, действующего на плоскую прямоугольную фигуру, необходимо определить

значения  $p$  в верхней и нижней точках рассматриваемой фигуры и отложить значение вектора  $p$  перпендикулярно к её плоскости. Концы отрезков, выражающих величину  $p$  соединить прямой линией (рис. 3.1 а, б, в, г).

При построении эпюры давления удобно принимать масштабы: линейный  $M_L$  в 1 см -  $N_m$ ; - масштаб давления  $M_p$  в 1 см -  $N_{mc}/m^2$ ;

### 3.4. Графоаналитический способ определения величины силы гидростатического давления, действующей на плоские прямоугольные фигуры с горизонтальным основанием и положения центра давления

Для графоаналитического решения задачи надо построить эпюру гидростатического давления на рассматриваемую плоскость, как указано в пункте 3.3, при этом величина силы определится по формуле:

$$P = \Omega \cdot B, \quad (3.6)$$

где  $\Omega$  - площадь эпюры гидростатического давления;

$B$  - ширина рассматриваемой плоскости в направлении перпендикулярном к чертежу.

Величина силы определяется объёмом эпюры гидростатического давления. Поэтому линия действия силы, проходит через центр тяжести эпюры и направлена перпендикулярно к рассматриваемой плоскости (рис. 3.4)

В случае действия жидкости на стенку с двух сторон, объём эпюры, выражающей величину силы, определяется путем алгебраического сложения эпюр слева и справа.

### 3.5. Примерный состав задач по теме 3

#### Пример 3.1

Определить силу давления на горизонтальное дно резервуара, заполненного бензином, удельный вес которого  $\gamma_b = 0,8 \text{ тс/м}^3$ . Размеры резервуара:  $h_2 = 1 \text{ м}$ ;  $a = 1 \text{ м}$ ;  $b = 3 \text{ м}$ ; К резервуару подсоединена трубка, в которой бензин поднялся на высоту  $h_1 = 2 \text{ м}$  (рис. 3).

**Решение:**

1. Величина силы :

$$P = \gamma \cdot h_c \cdot \omega = \gamma \cdot H \cdot \omega = \gamma (h_1 + h_2) \omega = 0,8 \cdot (2+1) \cdot 3 \cdot 1 = 7,2 \text{ тс}.$$

2. Направлена сила вертикально вниз, приложена в центре дна.

#### Пример 3.2

Определить величину и точку приложения силы гидростатического давления воды на вертикальный щит шириной  $b = 2 \text{ м}$ , если глубина воды перед щитом  $H = 3 \text{ м}$  (рис. 3.4).

**Решение:**

1. Сила давления воды на щит :

$$P = \gamma h_c \omega = \gamma \frac{H}{2} b H = 1,0 \cdot \frac{3,0^2}{2} \cdot 2,0 = 9,0 \text{ тс}.$$

2. Координата центра давления

$$y_0 = y_c + \frac{J_c}{y_c \cdot \omega} = \frac{H}{2} + \frac{b \cdot H^3 \cdot 2}{12 \cdot H b H} = \frac{2}{3} H = \frac{2}{3} \cdot 3 = 2,0 \text{ м}.$$

#### Пример 3.3

Определить силу давления воды и положение центра давления графоаналитическим способом для условий, приведенных в примере 3.2.

**Решение:**

1. Величина силы определяется по формуле (3.6). Построение эпюры гидростатического давления пояснена в пункте 3.3. В рассматриваемом случае площадь эпюры будет иметь треугольную форму :

$$\Omega = \frac{H^2}{2} = \frac{1,0 \cdot 3,0^2}{2} = 4,5 \text{ м}^2.$$

Сила давления :

$$P = \Omega \cdot b = 4,5 \cdot 2,0 = 9,0 \text{ тс}.$$

2. Положение центра давления

В случае треугольной эпюры центр тяжести её находится на  $1/3$  от основания, или координата центра давления будет :

$$y_0 = \frac{2}{3} H = \frac{2}{3} \cdot 3,0 = 2,0 \text{ м}.$$

#### Пример 3.4

Определить силу давления воды на затвор донного водовыпуска эллиптической формы, оси которого равны  $a = 2 \text{ м}$ ,  $b = 1,5 \text{ м}$  (рис. 3.5), и точку приложения силы. Глубина воды перед плотиной  $H = 4 \text{ м}$ .

**Решение:**

1. Сила давления на затвор

$$P = \gamma h_c \omega = \gamma \left( H - \frac{a \cdot \sin 45^\circ}{2} \right) \cdot 0,785ba = 1,0 \left( 4 - \frac{2,0 \cdot 0,707}{2} \right) \cdot 0,785 \cdot 2,0 \cdot 1,5 = 7,77 \text{ тс.}$$

2. Координата центра давления:

$$y_c = y_c + \frac{J_c}{y_c \omega} = \left( H - \frac{a \cdot \sin 45^\circ}{2} \right) \frac{1}{\sin 45^\circ} + \frac{\sin 45^\circ}{\left( H - \frac{a \cdot \sin 45^\circ}{2} \right)} \cdot \frac{\pi \cdot a^3 b}{64} \cdot \frac{4}{\pi \cdot a \cdot b} = \left( 4,0 - \frac{2,0 \cdot 0,707}{2} \right) \frac{1}{0,707} + \frac{2,0^2}{16} = 4,67 + 0,05 = 4,72 \text{ м.}$$

### Пример 3.5

Щит, перекрывающий канал, расположен под углом  $45^\circ$  к горизонту и закреплен шарнирно к опоре над водой. Определить необходимое усилие  $T$  для открытия щита, если ширина его  $B=2\text{ м}$ ; глубина воды перед щитом  $H=2,5\text{ м}$  и за щитом  $h=1\text{ м}$ . Шарнир расположен выше воды верхнего бьефа на  $S=0,5\text{ м}$ . Весом щита и трением в шарнире пренебречь.

**Решение:**

1. Величина силы давления воды на щит:

$$\text{слева } P_1 = \gamma h_{c1} \omega = \gamma \frac{H}{2} \frac{H}{\sin 45^\circ} b = 1,0 \frac{2,5^2 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,707} = 8,8 \text{ тс,}$$

$$\text{справа } P_2 = \gamma h_{c2} \omega = \gamma \frac{h^2 b}{2 \sin 45^\circ} = 1,0 \frac{1,0^2 \cdot 2,0}{2 \cdot 0,707} = 1,42 \text{ тс.}$$

2. Расстояние от шарнира до центра давления сил:

$$\text{слева } l_1 = \frac{S}{\sin 45^\circ} + \frac{2H}{3 \sin 45^\circ} = \frac{0,5}{0,707} + \frac{2 \cdot 2,5}{3 \cdot 0,707} = 2,93 \text{ м.}$$

$$\text{справа } l_2 = \frac{S+H}{\sin 45^\circ} - \frac{h}{3 \sin 45^\circ} = \frac{3,0}{0,707} - \frac{1,0}{3 \cdot 0,707} = 3,77 \text{ м}$$

3. Уравнение моментов сил относительно шарнира 0:

$$P_1 \cdot l_1 - P_2 \cdot l_2 - T \cdot t = 0$$

$$\text{откуда } T = \frac{P_1 \cdot l_1 - P_2 \cdot l_2}{t} = \frac{8,8 \cdot 2,93 - 1,42 \cdot 3,77}{3,0} = 6,78 \text{ тс.}$$

### Пример 3.6

Резервуар заполнен водой на глубину  $H=3,0\text{ м}$ . На поверхности воды действует манометрическое давление  $p_c=20\text{ кПа}=0,2\text{ кг/см}^2$ . Определить силу, действующую на стенку  $CD$  шириной  $B=3,0\text{ м}$ .

**Решение:**

1. Для построения эпюры давления вычислим манометрическое давление в точках  $C$  и  $D$ :

$$p_c = 0,2 \text{ кг/см}^2 = 20 \text{ кПа,}$$

$$p_D = p_c + \gamma H = 0,2 + 0,001 \cdot 300 = 0,5 \text{ кгс/см}^2 = 50 \text{ кПа.}$$

По вычисленным давлениям в точках  $C$  и  $D$  строим эпюру гидростатического давления  $NKCD$  площадью  $\Omega$ .

2. Сила гидростатического давления

$$P = \Omega \cdot b = \frac{p_c + p_D + \gamma H}{2} \cdot Hb = \frac{0,2 + 0,2 + 0,3}{2} \cdot 3,0 \cdot 2,0 = 2,1 \text{ тс.}$$

### Пример 3.7

На наклонную стенку  $AC$  действует вода с двух сторон. Слева глубина воды  $H=3,0\text{ м}$ , справа  $h=2,0\text{ м}$ . Ширина стенки  $b=2,0\text{ м}$ . Определить равнодействующую силу весового давления и центр ее приложения.

**Решение:**

1. Выполнив вычисления давления в точках  $A$  и  $B$  с левой стороны и  $B$  и  $C$  с правой стороны стенки, построим эпюры давления. Сложим площади эпюр и определим величину равнодействующей силы:

$$P = \frac{\gamma(H^2 - h^2)}{2 \sin 45^\circ} \cdot b = \frac{1(3,0^2 - 2,0^2)}{2 \cdot 0,707} \cdot 2,0 = 7,07 \text{ тс.}$$

2. Определив центр тяжести эпюры  $ACDE$ , как указывалось выше, проведем вектор силы  $P$  до пересечения со стенкой  $AC$  в точке  $d$ .

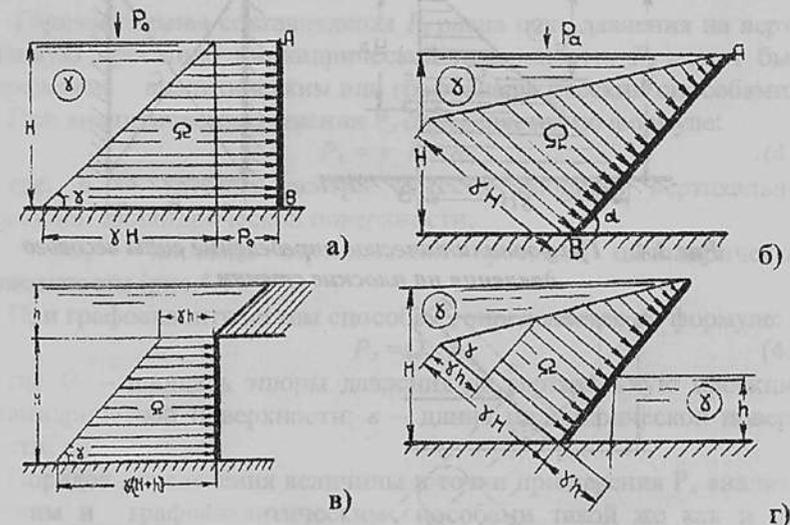


Рис. 3.1. Эпюра гидростатического давления

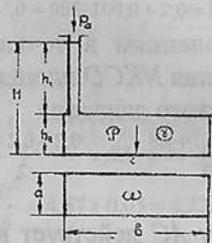


Рис. 3.2. К примеру 3.1

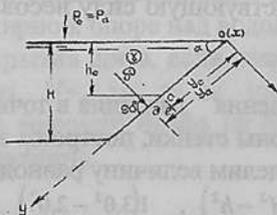


Рис. 3.3. К определению «Сила весового давления»

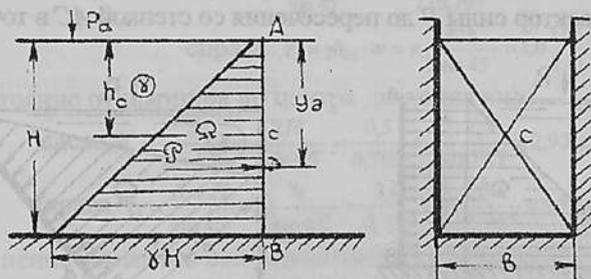


Рис. 3.4. Графоаналитическое определение силы весового давления на плоские стенки

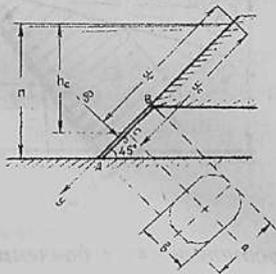


Рис. 3.5. К примеру 3.4

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

### 4.1. Величина силы, действующей на цилиндрические поверхности

Рассмотрим частный случай действия силы избыточного (весового) давления на цилиндрическую поверхность.

Сила давления  $P$ , действующая на цилиндрическую поверхность  $ABC$  (рис.4.1) с горизонтальными образующими, определяется по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}, \quad (4.1)$$

где  $P_x$  – горизонтальная составляющая;  
 $P_z$  – вертикальная составляющая силы.

#### 4.1.1. Определение горизонтальной составляющей силы

Горизонтальная составляющая  $P_x$  равна силе давления на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности.  $P_x$  может быть определена аналитическим или графоаналитическим способами.

При аналитическом решении  $P_x$  определяется по формуле:

$$P_x = \gamma \cdot h_c \cdot \omega_z, \quad (4.2)$$

где:  $h_c$  – глубина центра тяжести площади вертикальной проекции цилиндрической поверхности;

$\omega_z$  – площадь вертикальной проекции цилиндрической поверхности (рис.4.1).

При графоаналитическом способе  $P_x$  определяется по формуле:

$$P_x = \Omega_x \cdot \sigma, \quad (4.3)$$

где  $\Omega_x$  – площадь эпюры давления на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности;  $\sigma$  – длина цилиндрической поверхности.

Порядок определения величины и точки приложения  $P_x$  аналитическим и графоаналитическим способами такой же как и при

определении силы гидростатического давления  $P$  на прямоугольную вертикальную стенку с горизонтальным основанием.

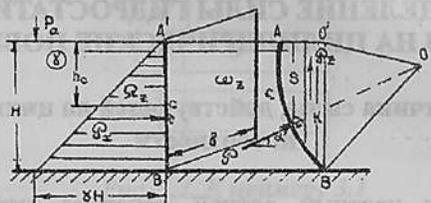


Рис. 4.1. Эпюра давления на цилиндрическую поверхность ABC

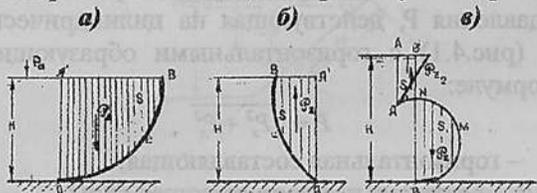


Рис. 4.2. Примеры построения тела давления

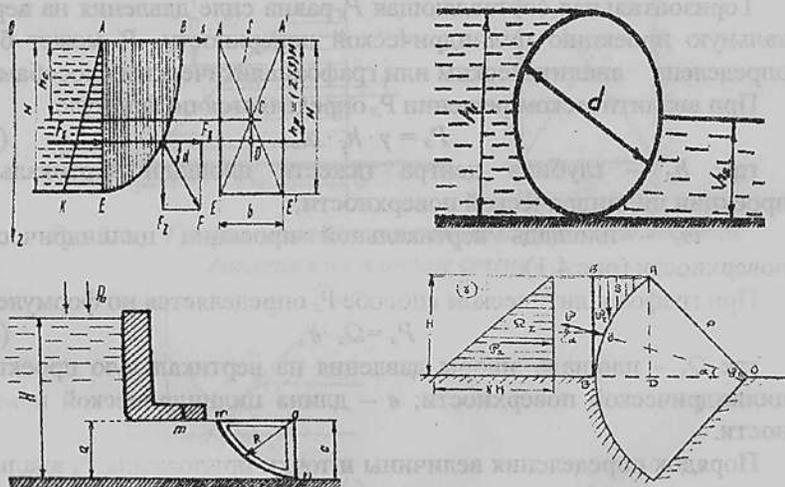


Рис. 4.3. Сила давления на круговую поверхность

#### 4.1.2. Определение вертикальной составляющей силы

Вертикальная составляющая  $P_z$  определяется графоаналитическим способом по формуле:

$$P_z = \gamma \cdot V, \quad (4.4)$$

где:  $V$  – объём тела давления  $V = S \cdot \sigma$ ;

$S$  – площадь сечения тела давления (рис.4.1;4.2, а,б,в).

Для построения тела давления необходимо из крайних образующих рассматриваемой цилиндрической поверхности, на которую действует жидкость, провести вертикальные плоскости до пересечения со свободной поверхностью жидкости или её продолжением.

Тело давления ограничивается цилиндрической поверхностью, её проекцией на свободную поверхность и вертикальными проектирующими плоскостями, проведенными через крайние образующие рассматриваемой цилиндрической поверхности.

Тело давления может быть заполнено жидкостью (рис.4.2.а), тогда вертикальная составляющая  $P_z$  направлена вниз и проходит через центр тяжести фигуры AA'B.

Построенное тело давления для случая, показанного на рис.4.2. б находится вне жидкости, сила  $P_z$ , проходящая через центр тяжести фигуры ABA' направлена вертикально вверх.

Если цилиндрическая поверхность AMB (рис.4.2.в) испытывает одновременно действие вертикальных сил, направленных вверх и вниз, то результирующая сила  $P_z$  определяется как алгебраическая сумма весов тел давления на каждую часть поверхности и направлена в сторону большей силы:

$$P_z = P_{z_1} - P_{z_2} = \gamma(V_{MAB} - V_{AA'B'N}). \quad (4.5)$$

#### 4.2. Направление силы $P$ и точки её приложения

Линия действия силы давления на цилиндрическую поверхность приходит под углом  $\alpha$  к горизонту, определяемом по формуле:

$$\arctg \alpha = \frac{P_x}{P_y}. \quad (4.6)$$

В общем случае равнодействующая  $P$  проходит через точку пересечения линий действия составляющих  $P_x$  и  $P_z$  под углом  $\alpha$  к горизонту.

Если цилиндрическая поверхность представляет собой круговой цилиндр, то сила  $P$  должна пройти через центр окружности (рис.4.3., точка  $O$ ).

Выполнив, в масштабе соответствующие графические построения найдём точку приложения силы  $P$  - точку  $\partial$ .

#### 4.3. Примерный состав задач по теме 4

##### Пример 4.1

Определить силу давления на секторный затвор, её направление и точку приложения. Глубина воды перед затвором  $H=3,0$  м., длина затвора  $b=5,0$  м.,  $\varphi=60^\circ$  (рис.4.3.)

**Решение:**

1. Горизонтальная составляющая силы давления:

$$P_x = \gamma h_c \omega_z = \gamma \frac{H}{2} H b = \gamma \frac{H^2}{2} \cdot b = 1,0 \cdot \frac{3,0^2}{2} \cdot 5,0 = 22,5 \text{ тс}$$

или

$$P_x = \Omega_z b = \gamma \frac{H^2}{2} \cdot b = 1,0 \cdot \frac{3,0^2}{2} \cdot 5,0 = 22,5 \text{ тс},$$

$P_x$  проходит через центр тяжести эшоры  $\Omega_x$ .

2. Вертикальная составляющая  $P_z$  определяется по формуле  $P_z = \gamma \cdot V = \gamma \cdot S \cdot b$ , где площадь поперечного сечения тела давления

$$S = \omega_{B'A'O} - \omega_{BAO}$$

радиус затвора :

$$R = \frac{H}{\sin \varphi} = \frac{3,0}{\sin 60^\circ} = \frac{3,0}{0,866} = 3,46 \text{ м}$$

$$OD = R \cdot \cos \varphi = 3,46 \cdot 0,5 = 1,73 \text{ м}$$

$$BD = R - OD = 3,46 - 1,73 = 1,73 \text{ м}$$

$$\omega_{B'A'O} = \frac{B'A + R}{2} H = \frac{1,73 + 3,46}{2} \cdot 3,0 = 7,79 \text{ м}^2$$

$$\omega_{BAO} = \pi R^2 \frac{\varphi}{360} = 3,14 \cdot 3,46^2 \cdot \frac{1}{6} = 6,28 \text{ м}^2$$

Площадь тела давления:

$$S = 7,79 - 6,28 = 1,51 \text{ м}^2$$

Вертикальная составляющая:

$$P_z = 1,0 \cdot 1,51 \cdot 5,0 = 7,55 \text{ тс}$$

Сила действующая на секторный затвор :

$$P = \sqrt{22,5^2 + 7,55^2} = 23,8 \text{ тс}$$

Направление линии действия силы определяется углом  $\alpha$  к горизонту

$$\text{tg } \alpha = \frac{P_z}{P_x} = \frac{7,55}{22,5} = 0,335 \quad \text{и } \alpha < 19,5^\circ$$

##### Пример 4.3

Определить силу давления воды на ее цилиндрическую поверхность  $ABC$ , направление ее и центр давления при следующих заданных величинах:  $H=3,0$  м.;  $d=1,0$  м, длина затвора  $b=5,0$  м (рис 4.4).

**Решение:**

1. Горизонтальная составляющая силы:

$$P_x = \gamma \left( H - \frac{d}{2} \right) db = 1,0 \left( 3,0 - \frac{1,0}{2} \right) \cdot 1,0 \cdot 5,0 = 12,5 \text{ тс}$$

2. Вертикальная составляющая силы:

$$P_z = \gamma \frac{\pi d^2}{4 \cdot 2} \cdot b = 1,0 \cdot 0,785 \frac{1,0^2}{2} \cdot 5,0 = 1,96 \text{ тс}.$$

3. Сила на затвор будет:

$$P = \sqrt{12,5^2 + 1,96^2} = 12,7 \text{ тс}.$$

4. Угол наклона к горизонту вектора силы  $F$ :

$$\angle \alpha = \text{arctg} \frac{1,96}{12,5} = 9^\circ.$$

5. Центр давления определяем графически, как в примере 4.2.

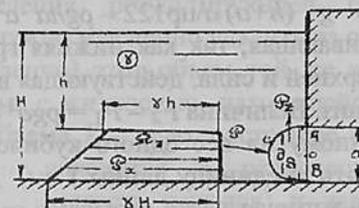


Рис. 4.4. К примеру 4.3

#### 4.4. Закон Архимеда. Плавание тел.

**Закон Архимеда** – закон статики жидкостей и газов, согласно которому на погруженное в жидкость (или газ) тело действует выталкивающая сила, равная весу жидкости в объеме тела.

Кубик с ребром  $a$  погружен в воду, причем и вода, и кубик неподвижны. Известно, что давление в тяжелой жидкости увеличивается пропорционально глубине – очевидно, что более высокий столбик жидкости более сильно давит на основание. Гораздо менее очевидно (или совсем не очевидно), что это давление действует не только вниз, но и в стороны, и вверх с той же интенсивностью – это закон Паскаля.

Если рассмотреть силы, действующие на кубик, то в силу очевидной симметрии силы, действующие на противоположные боковые грани, равны и противоположно направлены – они стараются сжать кубик, но не могут влиять на его равновесие или движение. Остаются силы, действующие на верхнюю и на нижнюю грани. Пусть  $h$  – глубина погружения верхней грани,  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение силы тяжести; тогда давление на верхнюю грань равно :

$$p_1 = \rho \cdot g \cdot h$$

а на нижнюю :

$$p_2 = \rho \cdot g(h+a)$$

Сила давления равна давлению, умноженному на площадь, т.е. :

$$F_1 = p_1 \cdot a^2, F_2 = p_2 \cdot a^2,$$

где  $a$  – ребро кубика, причем сила  $F_1$  направлена вниз, а сила  $F_2$  – вверх. Таким образом, действие жидкости на кубик сводится к двум силам –  $F_1$  и  $F_2$  и определяется их разностью, которая и является выталкивающей силой:

$$F_2 - F_1 = \rho \cdot g \cdot (h+a) a^2 - \rho g h a^2 = \rho g a^3$$

Сила – выталкивающая, так как нижняя грань, естественно, расположена ниже верхней и сила, действующая вверх, больше, чем сила, действующая вниз. Величина  $F_2 - F_1 = \rho g a^3$  равна объему тела (кубика)  $a^3$ , умноженному на вес одного кубического сантиметра жидкости (если принять за единицу длины 1 см). Другими словами, выталкивающая сила, которую часто называют архимедовой силой, равна весу жидкости в объеме тела и направлена вверх. Этот закон

установил античный греческий ученый Архимед, один из величайших ученых Земли.

Если тело произвольной формы занимает внутри жидкости объем  $V$ , то действие жидкости на тело полностью определяется давлением, распределенным по поверхности тела, причем заметим, что это давление совершенно не зависит от материала тела – («жидкости все равно на что давить»).

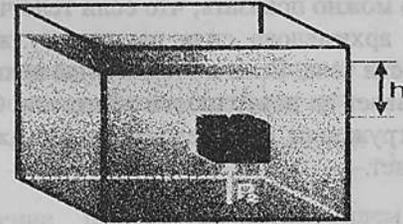


Рис. 4.5

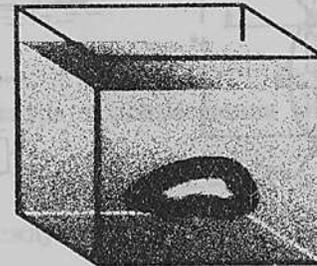


Рис. 4.6

Для определения результирующей силы давления на поверхность тела нужно мысленно удалить из объема  $V$  данное тело и заполнить (мысленно) этот объем той же жидкостью. С одной стороны, есть сосуд с жидкостью, находящейся в покое, с другой стороны внутри объема  $V$  – тело, состоящее из данной жидкости, причем это тело находится в равновесии под действием собственного веса (жидкость тяжелая) и давления жидкости на поверхность объема  $V$ . Так как вес жидкости в объеме тела равен

$\rho g V$  и уравновешивается равнодействующей сил давления, то величина ее равна весу жидкости в объеме  $V$ , т.е.  $\rho g V$ .

Сделав мысленно обратную замену – поместив в объеме  $V$  данное тело и отметив, что эта замена никак не скажется на распределении сил давления на поверхность объема  $V$ , можно сделать вывод: на погруженное в покоящуюся тяжелую жидкость тело действуют направленная вверх сила (архимедова сила), равная весу жидкости в объеме данного тела.

Аналогично можно показать, что если тело частично погружено в жидкость, то архимедова сила равна весу жидкости в объеме погруженной части тела. Если в этом случае архимедова сила равна весу, то тело плавает на поверхности жидкости. Очевидно, что если при полном погружении архимедова сила окажется меньше веса тела, то оно утонет.

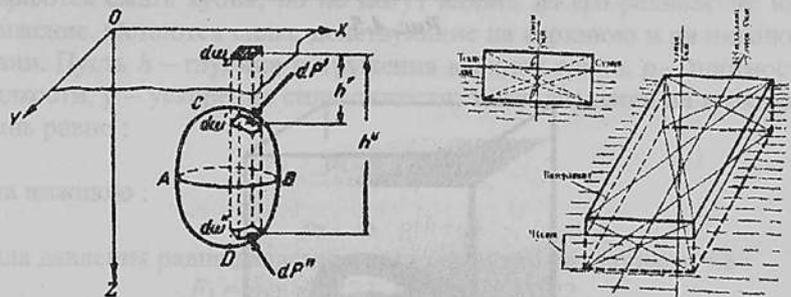


Рис. 4.7

Архимед ввел понятие «удельного веса»  $\gamma$ , т.е. веса единицы объема вещества:  $\gamma = \rho g$ ; если принять, что для воды  $\gamma = 1$ , то сплошное тело из вещества, у которого  $\gamma > 1$  утонет, а при  $\gamma < 1$  будет плавать на поверхности; при  $\gamma = 1$  тело может плавать (зависать) внутри жидкости. В заключение заметим, что закон Архимеда описывает поведение аэростатов в воздухе (в покое при малых скоростях движения).

### Примерный состав задач по теме

#### Задача.

Автомобиль весом  $G_a = 30 \text{ кН}$  установлен на паром размерами  $L = 8 \text{ м}$ ,  $B = 4 \text{ м}$ ,  $H = 1 \text{ м}$ . Проверить устойчивость парома, если его вес  $G_n = 50 \text{ кН}$  приложен на половине его высоты, а центр тяжести автомобиля находится на высоте  $h_a = 1 \text{ м}$  от верхней плоскости парома. Установить, как изменится метацентрическая высота  $h_m$ , если на автомобиль будет уложен груз  $h_1 = 2 \text{ м}$  от верхней плоскости парома.

#### Решение.

1. Найдем положение центра части парома с автомобилем (без груза) относительно нижней плоскости парома:

$$h_{ц.т.} = \frac{G \cdot \frac{H}{2} + G_a (h_a + H)}{G_n + G_a} = \frac{50 \cdot \frac{1}{2} + 30(1+1)}{50+30} = 1,063 \text{ м.}$$

2. Водоизмещение парома с автомобилем (объем воды, вытесненной паром):

$$W = \frac{G_n + G_a}{\rho g} = \frac{50000 + 30000}{1000 \cdot 9,81} = 8,15 \text{ м}^3.$$

3. Осадка парома:

$$h = \frac{W}{BL} = \frac{8,15}{4 \cdot 8} = 0,255 \text{ м.}$$

4. Расстояние центра водоизмещения от нижней плоскости парома:

$$h_{ц.т.} = \frac{h}{2} = \frac{0,255}{2} = 0,127 \text{ м.}$$

5. Расстояние между центром тяжести и центром водоизмещения:

$$e = h_{ц.т.} - h_{ц.в.} = 1,063 - 0,127 = 0,936 \text{ м.}$$

6. Момент инерции площади плоскости плавания:

$$I_0 = \frac{BL^3}{12} = \frac{8 \cdot 4^3}{12} = 42,7 \text{ м}^4$$

7. Метацентрическая высота:

$$h_m = \frac{I_0}{W} - e = \frac{42,7}{8,15} - 0,936 \approx 4,3 \text{ м.}$$

Так как метацентрическая высота положительна, то паром или о устойчив. Для случая наружного автомобиля аналогично находим:

$$h_{ц.т.} = \frac{G_n \frac{H}{2} + G_a(h_a + H) + G_r(h_r + H)}{G_n + G_a + G_r} = \frac{50 \cdot \frac{1}{2} + 30(1+1) + 30(2+1)}{50 + 30 + 30} = 1,59 \text{ м};$$

$$W' = \frac{G_n + G_a + G_r}{\rho g} = \frac{50000 + 30000 + 30000}{1000 \cdot 9,81} = 11,21 \text{ м}^3;$$

$$h' = \frac{W'}{BL} = \frac{11,21}{8 \cdot 4} = 0,35 \text{ м};$$

$$h_{ц.в.} = \frac{h'}{2} = \frac{0,35}{2} = 0,175 \text{ м};$$

$$e = h_{ц.т.} - h_{ц.в.} = 1,59 - 0,175 = 1,415 \text{ м};$$

$$h_m = \frac{I_0}{W'} - e' = \frac{42,7}{11,21} - 1,415 = 2,39 \text{ м}.$$

Следовательно, при наличии груза на автомобиле метацентрическая высота уменьшится на

$$\Delta h = h_m - h'_m = 4,3 - 2,39 = 1,91 \text{ м}.$$

Но паром и при наличии груза будет или устойчив.

## ГИДРОДИНАМИКА

### 5. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ. СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЖИДКОСТИ.

#### 5.1. Гидравлические элементы живого сечения потока. Расход и средняя скорость.

**Классификация потоков по характеру границ.** Поток жидкости в гидравлике называют движущуюся массу жидкости, ограниченную направляющими твердыми поверхностями, поверхностями раздела жидкостей или свободными поверхностями. В зависимости от характера и сочетания ограничивающих поток поверхностей потоки делятся на безнапорные, напорные потоки и гидравлические струи.

**Безнапорные потоки.** ограничены частично твердой, частично свободной поверхностью. Примером таких потоков может служить поток в реке или в канале, а также в трубе, работающей неполным сечением.

**Напорные потоки** ограничены твердыми поверхностями, например поток в трубе, все сечения которого заполнено движущейся жидкостью и при этом стенки трубы испытывают давление со стороны потока, отличающееся от давления окружающей среды (в таких случаях говорят, что труба работает полным сечением под напором).

**Гидравлические струи** ограничены только жидкостью или газовой средой, например струя, вытекающая из сосуда через отверстие в атмосферу, или струя воды, выбрасываемая гидромонитором при подводной разработке грунта.

**Живое сечение, гидравлический радиус.** Сечение потока, во всех точках которого линии тока, пересекающие эту поверхность, нормальны к ней, называется *живым сечением потока*. Разбив поток на элементарные струйки, получим, что площадь живого сечения

потока равна сумме площадей  $d\omega$  живых сечений элементарных струек:

$$\omega = \int d\omega.$$

*Смоченный периметр* представляет собой длину линии, по которой жидкость в живом сечении соприкасается с твердыми поверхностями, ограничивающими поток. При напорных потоках длина смоченного периметра  $\chi$  равна длине всего периметра живого сечения, а в безнапорных потоках смоченный периметр составляет некоторую часть полного периметра. *Гидравлическим радиусом* называется отношение площади живого сечения к смоченному периметру в этом сечении:

$$R = \frac{\omega}{\chi}.$$

В напорном потоке для круглого живого сечения имеем

$$R = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}.$$

Объемное количество жидкости, проходящей через живое сечение потока в единицу времени, называется *расходом потока* в данном сечении или просто *расходом*.

Расход жидкости  $Q$ —объем жидкости, проходящей в единицу времени через живое сечение. Размерность  $[Q] = \frac{L^3}{t}$ ; измеряется расход в  $m^3/c$ , л/с и т.д.

Важной характеристикой потока является *средняя скорость потока* в данном сечении, представляющая собой частное от деления расхода  $Q$  на площадь живого сечения  $\omega$  потока:  $v = \frac{Q}{\omega}$ .

## 5.2. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости.

### Значение слагаемых уравнения.

В случае идеальной жидкости уравнение Бернулли имеет вид:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}. \quad (5.1)$$

Для пояснения слагаемых уравнения приводится следующая таблица 5.1.

Таблица 5.1

### Геометрическая и энергетическая интерпретация уравнения Бернулли.

Слагаемые уравнения	Геометрический смысл		Энергетический смысл	
	Обозначение	Название	Положение на чертеже	Обозначение
$Z$	Ордината точки рассматриваемого сечения	Расстояние от плоскости $O-O$ до точки по вертикали	$\varepsilon_n(z)$	Удельная потенциальная энергия положения
$p/\gamma$	Пьезометрическая высота	Расстояние от точки до линии $P-P$ по вертикали	$\varepsilon_n(p)$	Удельная потенциальная энергия давления
$H_p = Z + P/\gamma$	Потенциальный напор	Расстояние от плоскости $O-O$ до линии $P-P$ по вертикали	$\varepsilon_n$	Удельная потенциальная энергия
$u^2/2g$	Скоростной напор	Расстояние от линии $P-P$ до $\varepsilon-\varepsilon$ по вертикали	$\varepsilon_k$	Удельная кинетическая энергия
$H_t = Z + P/\gamma + u^2/2g$	Полный напор	Расстояние от плоскости $O-O$ до линии $\varepsilon-\varepsilon$ по вертикали	$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_k$	Полная удельная энергия

Слагаемые уравнения Бернулли имеют линейную размерность и могут быть изображены геометрически, как это показано на рисунке 5.1. На этом рисунке студентам надо будет пояснить, как откладываются величины  $Z$ ,  $P/\gamma$  и  $u^2/2g$ .

Проведя линию по горизонтам жидкости в пьезометрах получим пьезометрическую линию  $P-P$ .

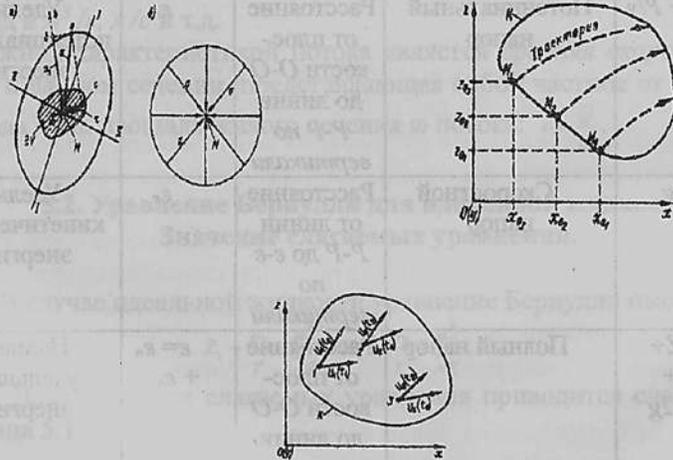
Эта линия будет проходить на расстоянии  $H_p$  от плоскости  $O-O$ . Линия  $P-P$  может снижаться или повышаться по течению. При этом линия  $P-P$  будет иметь положительный или отрицательный уклон  $I_p$ , называемый пьезометрическим уклоном.

В гидродинамических трубках горизонты жидкости надо показывать на одной отметке. Линия, проведенная по горизонтам жидкости в этих трубках называется напорной линией  $\epsilon-\epsilon$ . В случае идеальной жидкости линия  $\epsilon-\epsilon$  будет горизонтальной линией, параллельной плоскости  $O-O$ .

Гидравлический уклон в случае идеальной жидкости  $I_e = 0$ .

Линия  $\epsilon-\epsilon$  будет проходить выше линии  $P-P$  на величину скоростного напора  $u^2/2g$ .

Все слагаемые уравнения Бернулли выражают также и удельную энергию, принадлежащую единице веса жидкости.



### 5.3. Общая схема применения уравнения Бернулли

Уравнение Бернулли может быть применено к потоку, если выполняются два основных условия:

1. Движение жидкости должно быть установившимся.

2. Движение жидкости в сечениях, соединяемых уравнением Бернулли должно быть параллельно струйным или плавно изменяющимся. Между указанными сечениями движение может быть резко изменяющимся.

Порядок применения уравнения Бернулли при решении задач надо рассматривать в начале на простой схеме, как изображено на рис. 5.2

Схема применения уравнения Бернулли следующая:

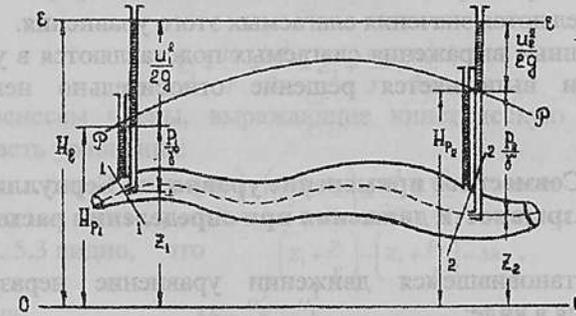


Рис. 5.1. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для идеальной жидкости

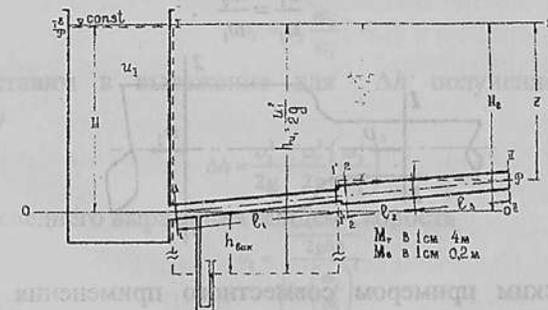


Рис. 5.2. К уравнению Бернулли для идеальной жидкости

1. Рассматриваемая гидравлическая система разбивается сечениями на участки с разными площадями поперечного сечения (при рассмотрении идеальной жидкости).

2. Проводится горизонтальная плоскость сравнения  $O-O$  так, чтобы величина  $Z$  для назначенных сечений легко определялась или обращалась в ноль (особенно для начального и конечного сечений).

3. Намечаются два сечения таким образом, чтобы в составленном уравнении была только одна неизвестная величина. Остальные слагаемые должны быть известны или могли быть выражены известными величинами. Уравнение Бернулли записывается в общем виде.

4. Определяются значения слагаемых этого уравнения.

5. Найденные выражения слагаемых подставляются в уравнение Бернулли и выполняется решение относительно неизвестной величины.

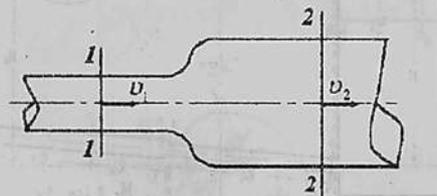
#### 5.4. Совместное применение уравнения Бернулли и неразрывности движения при определении расхода

При установившемся движении уравнение неразрывности записывается в виде:

$$Q = \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 = \dots \quad \omega v = const, \quad (5.2)$$

откуда получаем:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (5.3)$$



Классическим примером совместного применения уравнения Бернулли и уравнения неразрывности движения является решение по определению расхода с помощью расходомера Вентури.

#### Пример 5.1.

На трубопроводе установлен расходомер Вентури. Диаметр трубопровода  $d_1 = 15.0$  см диаметр горловины расходомера  $d_2 = 7,0$  см.

Определить расход воды, протекающий по трубопроводу, если разность показаний пьезометров  $\Delta h = 25$  см. При расчете потерями напора и сжатием струи в пределах расходомера пренебречь.

**Решение:**

1. Площадь поперечного сечения:

а) трубопровода  $\omega_1 = 0.785 d_1^2 = 0.785 \cdot 15^2 = 177 \text{ см}^2$ ,

б) горловины расходомера  $\omega_2 = 0.785 d_2^2 = 0.785 \cdot 7^2 = 38.5 \text{ см}^2$ .

6. Назначив произвольно плоскость сравнения  $O-O$ , запишем уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2; пренебрегая потерями напора:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

3. Перенесем члены, выражающие кинетическую энергию в первую часть уравнения:

$$\left( Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left( Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

На рис. 5.3 видно, что  $\left( Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left( Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) = \Delta h$ ,

тогда 
$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

4. Применяя уравнение неразрывности, выразим скорость в трубопроводе  $v_1$  через скорость в водомере  $v_2$

$$v_1 = v_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

5. Подставим в выражение для  $\Delta h$  полученное значение скорости  $v_1$

$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2.$$

6. Из последнего выражения найдем скорость

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2}}.$$

7. Теоретический расход, без учета потерь напора

$$Q_T = \omega_1 v_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}$$

Для данного расходомера значение  $\omega_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}$  выражает постоянную величину. Обозначив ее через  $A$  — постоянную расходомера, получим:

$$Q = A\sqrt{\Delta h}.$$

8. Подставив заданные значения в выражение для  $A$ , будем иметь:

$$A = 38,5 \sqrt{\frac{1962}{1 - \left(\frac{38,5}{177}\right)^2}} = 1730 \text{ см}^{2,5} / \text{с}$$

9. Величина теоретического расхода будет:

$$Q_T = 1730 \cdot \sqrt{25} = 8650 \text{ см}^3 / \text{с} = 8,65 \text{ л} / \text{с} = 0,00865 \text{ м}^3 / \text{с}$$

При движении реальной жидкости необходимо учитывать потери напора, тогда фактический расход будет меньше теоретического:

$$Q = \mu A \sqrt{\Delta h},$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода расходомера  $\mu < 1,0$  определяется опытным путем.

### 5.5. Построение напорной $E-E$ и пьезометрической $P-P$ линий для потока идеальной жидкости

Для наглядности этот вопрос следует пояснить на примере построения линий  $e-e$  и  $P-P$  для трубопровода с расширяющимся и сужающимся поперечным сечением аналогично изображенному на рис. 5.2.

**Пример 5.2**

Дано:  $d_1 = 15 \text{ см}$ ;  $d_2 = 20 \text{ см}$ ;  $\ell_1 = 20 \text{ м}$ ;  $\ell_2 = \ell_3 = 10 \text{ м}$ ;  $H = 1,2 \text{ м}$ ;  $Z = 1,0 \text{ м}$

Принимаем скорость в резервуаре  $v_1 = 0$

**Решение:** 1. Назначаем сечения и плоскость сравнения  $O-O$  как показано на рис. 5.2 2. Составляем уравнение Бернулли для сечений 1-1, где все слагаемые известны и 2-2, где неизвестна скорость  $v_2$

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

3. Определяем значения слагаемых уравнения и вычисляем скорость  $v_2$  которая будет скоростью во второй трубе  $v_2 = v_1$

$$Z_1 = H = 1,2 \text{ м}$$

$$p_1 = p_2 = p_a; v_1 = 0, Z_2 = H - Z = 1,2 - 1,0 = 0,20 \text{ м}$$

$$\frac{v_2^2}{2g} = H - (H - Z) = Z = 1,0 \text{ м}$$

$$\text{И } v_2 = \sqrt{2gZ} = 4,43 \cdot 1 = 4,43 \text{ м} / \text{с}$$

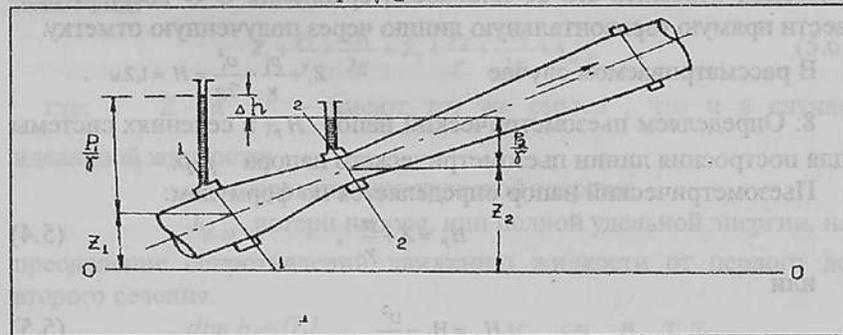


Рис. 5.3. К уравнению Бернулли для идеальной жидкости

$$d_2^2 = 4,43 \cdot 0,00314 = 0,139 \text{ м}^2 / \text{с} = 139 \text{ л} / \text{с}$$

4. Расход системы будет:

$$Q = v_2 \omega_2 = v_2 \cdot 0,785$$

5. Используя уравнение неразрывности движения определим скорость в первой трубе:

$$v_1 = v_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = v_2 \frac{d_2^2}{d_1^2} = 4,43 \cdot 1,78 = 7,9 \text{ м} / \text{с}$$

6. Вычисляем скоростные напоры:

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{7,9^2}{19,62} = 3,18 \text{ м}$$

$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{4,43^2}{19,62} = 1,0 \text{ м}$$

7. Определяем величины гидродинамического напора (полной удельной энергии) в сечениях системы для построения линии  $E-E$ .

Так как силы трения в идеальной жидкости отсутствуют, то удельная энергия потока остается постоянной  $H_e = const$ , и линия  $E-E$  представляет собой прямую горизонтальную линию. Для построения этой линии следует определить значение  $H_e$  в любом сечении системы, отложить его от плоскости сравнения  $O-O$  вверх и провести прямую горизонтальную линию через полученную отметку.

В рассматриваемом случае 
$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = H = 1,2 \text{ м}$$

8. Определяем пьезометрический напор  $H_p$  в сечениях системы для построения линии пьезометрического напора  $p-p$ .

Пьезометрический напор определяется по формулам:

$$H_p = Z + \frac{p}{\gamma}, \quad (5.4)$$

или

$$H_p = H_e - \frac{v^2}{2g}. \quad (5.5)$$

Расчеты по построению линий  $E-E$  и  $P-P$  лучше выполнить в таблице следующего вида:

#### Расчетные величины к примеру 5.2

№ сечений	$d(\text{м})$	$\omega(\text{м}^2)$	$v(\text{м/с})$	$v^2/2g(\text{м})$	$H_e(\text{м})$	$H_p(\text{м})$
1	-	-	0	0	1,2	1,2
1	0,15	0,0177	7,90	3,18	1,2	-1,98
2	1,5	0,0177	7,90	3,18	1,2	-1,98
3	0,20	0,0314	4,43	1,00	1,2	0,20
11	0,20	0,0314	4,43	1,00	1,2	0,20

При построении линии  $P-P$  значения  $H_p$  во всех сечениях системы откладываются от плоскости сравнения  $O-O$ : положительные значения вверх, отрицательные – вниз. Соединив полученные отметки прямыми линиями (на участках трубопровода с постоянным

диаметром) или кривыми (на участках с плавно изменяющимся диаметром), получим линию  $P-P$ .

#### 5.6. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости

Уравнение Бернулли составляется для двух сечений, где движение параллельно струйное или плавно изменяющееся, относительно плоскости сравнения  $O-O$  и для потока реальной жидкости имеет вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{f(1-2)}, \quad (5.6)$$

где:  $Z$  и  $\frac{p}{\gamma}$  – имеют тот же смысл, что и в случае идеальной жидкости;

$\alpha$  – корректив кинетической энергии;

$h_{f(1-2)}$  – потери напора, или полной удельной энергии, на преодоление сопротивлений движению жидкости от первого до второго сечения.

$$\dim h_f = [L] \quad \text{м: см и т.д.}$$

Следует обратить внимание студентов на то, что при движении жидкости удельная энергия (напор) вниз по течению потока уменьшается и  $H_{e1} > H_{e2}$  на величину  $h_f$ .

#### 5.7. Виды потерь напора при движении реальной жидкости и формулы для их определения

Потери напора бывают двух видов:

$h_e$  – потери напора на трение по длине и  $h_m$  – местные потери напора

Таким образом, в общем случае имеем:

$$h_f = \Sigma h_e + \Sigma h_m \quad (5.7)$$

Потеря напора по длине при установившемся равномерном движении жидкости определяется по формуле Вейсбаха – Дарси:

$$h_e = \frac{\lambda}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;

$l$  – длина потока;

$R$  – гидравлический радиус.

Для круглых труб  $R=d$  и формула записывается в ином виде:

$$h_e = \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (5.9)$$

или, обозначив  $\frac{\lambda}{d} = \varphi_2$  — коэффициент сопротивления по длине, будем иметь:

$$h_e = \varphi_2 \frac{v^2}{2g}. \quad (5.10)$$

В общем случае  $\lambda = f(\overline{Re}, \Delta)$

где  $\Delta = \Delta/d$  — относительная шероховатость;

$\Delta$  — высота выступов шероховатости, зависит от материала труб, способа их изготовления и эксплуатационного состояния.

Величина  $\Delta$  принимается по гидравлическому справочнику: ([1], стр. 138, таблица 4-2, [2] стр. 32, таблица 4-1 или таблица 2, приложение):

$Re$  — число Рейнольдса (безразмерная величина), определяется по формуле:

$$Re = \frac{v \cdot 4R}{\nu}, \quad (5.11)$$

где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, его значение принимается по справочным данным ([1], стр. 112 [2] стр. 13).  $dim \nu = L^2 T^{-1}; m^2/c; cm^2/c; (сток)$ .

Затем кратко напомним о существовании двух режимов движения жидкостей: ламинарного при  $Re_a < Re_k$ , и турбулентного при  $Re_a > Re_k$ . При этом следует указать, что в случае напорного движения всех жидкостей при любой температуре критическое число Рейнольдса  $Re_k = 2320$ .

Исследования И.Никурадзе и других учёных позволили выделить три основных зоны и три области сопротивления.

Зона I — вязкого сопротивления, движение ламинарное:

$$Re \leq 2320; \lambda = f(Re)$$

Из закона Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re_a} \quad (5.12)$$

Зона II — зона неустойчивого (переходного) режима, характеризующаяся:  $2320 < Re_d < 4000; \lambda = f(Re)$

Коэффициент гидравлического трения может быть определен по формуле А.Д.Альтшуля:

$$\lambda = 0,1 \left( 1,46 \overline{\Delta} + \frac{100}{Re_d} \right)^{0,25} = 0,1 \left( \overline{\Delta} + \frac{68}{Re_d} \right)^{0,25} \quad (5.13)$$

Зона III — зона турбулентного режима. Эта зона делится на три области.

Первая область — область гладких русел. Эта область характеризуется показателями:

$$4000 < Re_d < \frac{10}{\Delta}; \quad \lambda = f(Re); \quad h_e : v^{1,75};$$

Значение  $\lambda$  вычисляется по формуле А.Д.Альтшуля (5.13)

Вторая область — область до квадратичного сопротивления шероховатых русел. В этой области:

$$\frac{10}{\Delta} < Re_d < \frac{560}{\Delta}; \quad \lambda = f(Re_d, \overline{\Delta})$$

Значение  $\lambda$  вычисляется по формуле А.Д.Альтшуля (5.13)

Третья область — область квадратичного сопротивления. В этой области  $Re_d > \frac{560}{\Delta}$ ,  $\lambda = f(\overline{\Delta})$ ,  $h_e : v^2$ . Значения коэффициента  $\lambda$  можно определить также по графику, составленному на основе формулы Кольбука-Уайта.

**Местные потери напора.** Потери напора на местные сопротивления определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_M = \varphi_M \frac{v^2}{2g}, \quad (5.14)$$

где  $\varphi_M$  — коэффициент местных сопротивлений, принимается по гидравлическому справочнику [1], [2].

Приводимые в гидравлических справочниках значения коэффициентов местных сопротивлений отнесены к скорости за сопротивлением  $v_2$ .

Следует обратить внимание на то, что теряемый напор в каждом рассматриваемом местном сопротивлении может быть выражен в долях скоростного напора перед сопротивлением  $\left( \frac{v_1^2}{2g} \right)$  или за ним  $\left( \frac{v_2^2}{2g} \right)$

Например, в случае резкого расширения, коэффициент сопротивления может быть определен по формулам:

$$\varphi_{PP}^{\alpha} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2, \quad (5.15)$$

или

$$\varphi_{PP}^{\alpha} = \left( 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2. \quad (5.16)$$

При истечении из трубы в бассейн больших размеров, когда  $\omega_2 \approx \infty$  потеря напора равна:

$$h_{PP} = \int_{PP}^u \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g}$$

поскольку, как следует из формулы (5.16),  $\varphi_{PP} = 1.0$

Часто встречающиеся значения коэффициентов местного сопротивления  $\varphi_m$  приведены в [1] (таблица №1, приложение).

### 5.8. Построение напорной E-E и пьезометрической P-P линий для потока реальной жидкости

Построение линий E-E и P-P следует выполнять для той же системы, которая рассматривалась в случае идеальной жидкости. Здесь рассмотрим построение линий E-E и P-P для системы изображенной на рис. 5.5.

#### Пример 5.3.

Дано:  $Q = 1.39 \text{ л/с}$ ;  $d_1 = 15 \text{ см}$ ;  $d_2 = 20 \text{ см}$ ;  
 $\ell_1 = 20 \text{ м}$ ;  $\ell_2 = \ell_3 = 10 \text{ м}$ ;  $a = 0.20 \text{ м}$ ;

На середине второй трубы установлена простая задвижка. Трубы стальные цельносварные  $\Delta = 0.10 \text{ мм}$ . Температура воды  $t = 10^\circ$ ,  $\nu = 0.013 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Требуется определить необходимый напор в начале системы, приняв скорость в резервуаре  $v \approx 0$  и построить линии E-E и P-P.

#### Решение:

Вначале поясняется принцип назначения сечений: между двумя соседними сечениями должен быть один вид сопротивления.

Затем проводится плоскость сравнения O-O так, чтобы удобно было отсчитывать величину Z для сечений системы и записывается уравнение Бернулли для начального и конечного сечений системы:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_f.$$

Рассматривая слагаемые уравнения, надо подчеркнуть, что в сосуде на свободной поверхности действует атмосферное давление. При истечении в атмосферу давление в конечном сечении:

$$P_2 = p_a.$$

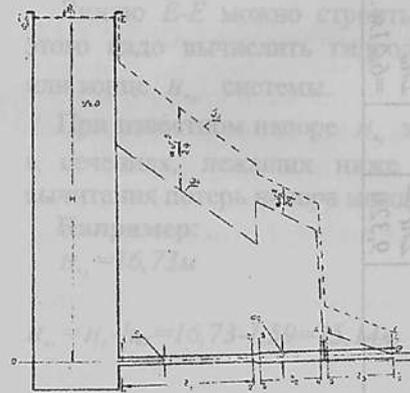
Поэтому при расчете такой системы давление в начале и в конце системы уравнивается и в расчете не учитывается.

Поскольку скорость движения жидкости в сосуде по сравнению со скоростью в трубах небольшая, то можно положить  $v_1 \approx 0$ , и соответственно скоростной напор в этом сечении:

$$\frac{v_1^2}{2g} = 0 \text{ величина } Z_2 = a = 0.20 \text{ м}$$

Напор в начале системы из уравнения Бернулли будет:

$$H_{\epsilon_1} = a + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \Sigma h_i + \Sigma h_m,$$



где

$$\Sigma h_i = \xi_{\epsilon_1} \frac{v_1^2}{2g} + \xi_{\epsilon_2} \frac{v_2^2}{2g} = \frac{\lambda \ell_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} + \frac{\lambda (\ell_2 + \ell_3)}{d_2} \frac{v_2^2}{2g},$$

$$\Sigma h_m = h_{bz} + h_{pp} + h_3 = \xi_{bz} \frac{v_1^2}{2g} + \xi_{pp} \frac{v_2^2}{2g} + \xi_3 \frac{v_3^2}{2g}.$$

Значения коэффициента  $\lambda$  вычисляем по формуле А.Д.Альтшуля (5.13) и проверяем правильность вычислений по графику (I) (стр.137)

Значения коэффициентов местных сопротивлений принимаются по справочным данным (1. стр.149-169, 2. Стр.38-48).

Расчет для построения линий E-E и P-P надо выполнять в табличной форме следующего вида:

Таблица 5.3

Расчетные величины к примеру 5.3

№	d (см)	$\omega$ (м <sup>2</sup> )	$\ell$ (м)	v (м/с)	$v^2/2g$ (м)	Re	$\Delta$	$\lambda$	$h_c$ (м)	$\phi_m$	$h_m$ (м)	$H_c$ (м)	$H_p$ (м)
I				0									
1	0.15	0.077		7.90	3.18					0.50	1.59	16.73	16.73
2	0.15	0.177	20	7.90	3.18	910000	0.00067	0.018	7.62	0.60	0.60	15.14	11.96
3	0.2	0.0314	-	4.43	1.0					4.02	4.02	7.52	4.34
4	0.2	0.0314	10	4.43	1.0	512000	0.0005	0.017	0.85			6.92	5.92
5	0.2	0.0314	10	4.43	1.0	512000	0.0005	0.017	0.85			6.07	5.07
II	0.20	0.0314		4.43	1.0				$\Sigma h_c = 9,32\text{м}$		$\Sigma h_m = 6,21\text{м}$	1.20	0.20

Напор в начале рассматриваемой системы равен:

$$H_{c_1} = 0,20 + 1,0 + 9,32 + 6,21 = 16,73\text{м}.$$

Построение линии E-E.

Для построения линии E-E величину гидродинамического напора  $H_c$  в сечениях откладывают вверх от плоскости сравнения O-O.

Линию E-E можно строить с начала или конца системы. Для этого надо вычислить гидродинамический напор в начале  $H_{c_1}$  или конце  $H_{c_n}$  системы.

При известном напоре  $H_{c_1}$  значение гидродинамического напора в сечениях, лежащих ниже по течению, определяется путем вычитания потерь напора между соответствующими сечениями.

Например:

$$H_{c_1} = 16,73\text{м}$$

$$H_{c_2} = H_{c_1} - h_{c2} = 16,73 - 1,59 = 15,14\text{м}$$

$$H_{c_3} = H_{c_2} - h_{c3} = 15,14 - 7,62 = 7,52\text{м} \text{ и т.д.}$$

При известном конечном напоре  $H_{c_n}$ , значения напора вычисляются прибавлением потерь напора между соответствующими сечениями.

Например:

$$H_{c_1} = a + \frac{\alpha v_2^2}{2g} = 0,20 + 1,0 = 1,20\text{м}$$

$$H_{c_2} = H_{c_1} + h_{c2} = 1,20 + 0,85 = 2,05\text{м}$$

$$H_{c_3} = H_{c_2} + h_{c3} = 2,05 + 4,02 = 6,07\text{м} \text{ и т.д.}$$

После вычисления величин гидродинамического напора для всех сечений необходимо выполнить проверку правильности решений. Для этого определяется величина  $H_{c_1}$  в начале системы, если был известен  $H_{c_n}$  и наоборот.

$$H_{c_1} = H_{c_n} + \Sigma h_f = 1,20 + 9,32 + 6,21 = 16,73\text{м},$$

$$H_{c_n} = H_{c_1} - \Sigma h_f = 16,73 + 9,32 - 6,21 = 1,20\text{м}.$$

Построение линии P-P.

Величину пьезометрического напора определяем по формулам: (5.4) или (5.5).

Значение  $H_p$  в сечениях может быть больше или меньше нуля. Положительные величины  $H_p$  откладываются вверх от плоскости сравнения  $O-O$ , отрицательные значения  $H_p$  откладываются вниз от плоскости  $O-O$ .

Проверка правильности вычисления значений  $H_p$  выполняется по формулам (5.4) или (5.5).

По вычисленным значениям  $H_c$  и  $H_p$  строятся линии  $E-E$  и  $P-P$  в масштабе. При этом вертикальный и горизонтальный масштабы могут быть разными.

## 6. РАСЧЕТ «КОРОТКИХ» НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОСТОЯННЫМ ДИАМЕТРОМ

### 6.1. Расчетные зависимости и основные типы задач по расчету «коротких» трубопроводов с постоянным диаметром

«Короткими» трубопроводами принято называть такие гидравлические системы, при расчете которых необходимо учитывать потери напора по длине и местные. При этом для всей системы потери напора определяются как:

$$h_f = \Sigma h_c + \Sigma h_m.$$

«Короткие» трубопроводы рассчитываются по формулам:

$$Q = \mu_c \omega \sqrt{2g\Delta H_c}, \quad (6.1)$$

или

$$Q = \mu_p \omega \sqrt{2g\Delta H_p}, \quad (6.2)$$

где  $\omega$  — площадь живого сечения;

$\mu_c, \mu_p$  — коэффициент расхода.

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\xi_c}}, \quad (6.3)$$

$$\mu_p = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_c}}, \quad (6.4)$$

где:  $\xi_c$  — коэффициент сопротивления системы;

$$\xi_c = \Sigma \xi_l + \Sigma \xi_m \quad \Sigma \xi_l = \frac{L}{d},$$

здесь:  $L$  — общая длина системы;

$\Sigma \xi_m$  — сумма коэффициентов местных сопротивлений сооружения (каждое сооружение имеет свои местные сопротивления в зависимости от его конструкции);

$\Delta H_c = h_f$  — разница гидродинамического напора в начале и конце сооружения, равная суммарным потерям напора;

$\Delta H_p$  — разница потенциального напора в начале и конце сооружения.

По этим формулам можно решать следующие практические задачи:

1. Даны  $d$  и  $\Delta H_e$  или  $\Delta H_p$ , найти  $Q$ .
2. Даны  $d$  и  $Q$ , найти  $\Delta H_e$  или  $\Delta H_p$ .
3. Даны  $Q, \Delta H_e$  или  $\Delta H_p$ , найти  $d(\omega)$ .

**Задача № 1** решается в следующем порядке:

а) задаем ряд значений  $Q$ , определяем соответствующие им:

$$v, \frac{v^2}{2g}, \Sigma h_e, \Sigma h_m, \Delta H_e = \Sigma h_e + \Sigma h_m \text{ или } \Delta H_p = \Delta H_e \left( \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right),$$

где  $v_1, v_2$  — скорости в сечениях;

б) строим график зависимости  $Q=f(\Delta H_e)$  или  $Q=f(\Delta H_p)$ ;

в) из графика по заданной величине  $\Delta H_e$  или  $\Delta H_p$  находим значение  $Q$ .

**Задача № 2** решается так:

а) определяем коэффициенты сопротивлений для рассматриваемой гидравлической системы;

б) подсчитываем величину потери напора

$$\Delta H_e = h_f = \Sigma h_m + \Sigma h_e$$

или

$$\Delta H_p = h_f - \left( \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right).$$

**Задача № 3** рассматривается на примерах определения диаметра сифона, дюкера и всасывающей трубы насосной установки (рис 6.1; 6.2; 6.3)

В этой задаче должны быть известны следующие величины:

1. Расход  $Q$ ;
2. Положение геометрического центра начального и конечного сечений сооружений;
3. Давление  $P_I$  и  $P_{II}$  и скорость  $v_I$  и  $v_{II}$  в начальном и конечном сечениях системы;
4. Длина системы  $L$ ;
5. Материал труб в соответствии с которым устанавливается  $\Delta$ ;
6. Температура воды  $t^\circ C$  по которой определяется  $\nu$ .
7. Должна быть известна конструкция сооружения, для которой устанавливаются виды местных сопротивлений.

Перед решением задач необходимо пояснить принцип работы каждого сооружения. Решение задач выполняется в следующем порядке:

1. Вычисляем разность напоров  $\Delta H_e$  из уравнения Бернулли, составленного для граничных сечений системы I-I и II-II, относительно плоскости сравнения, проведенной по горизонту воды нижнего канала.

а) для сифона  $\Delta H_e = Z$ ;

б) для дюкера  $\Delta H_e = Z + \frac{\alpha}{2g}(v_1^2 - v_2^2)$

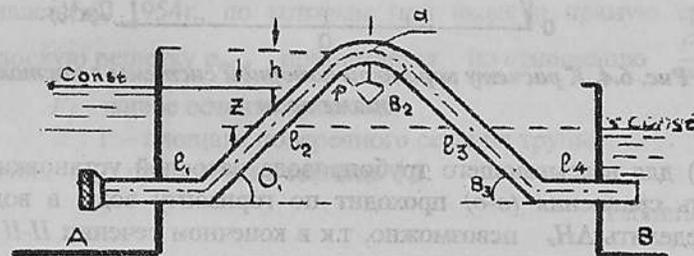


Рис. 6.1. Схема сифона

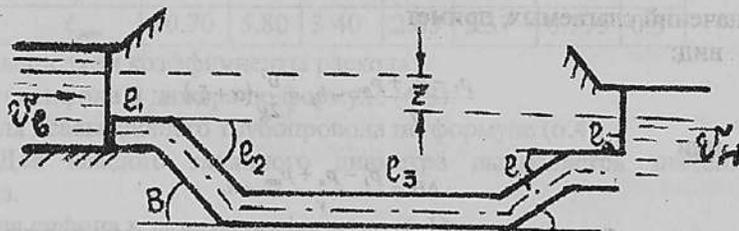


Рис. 6.2. Схема дюкера

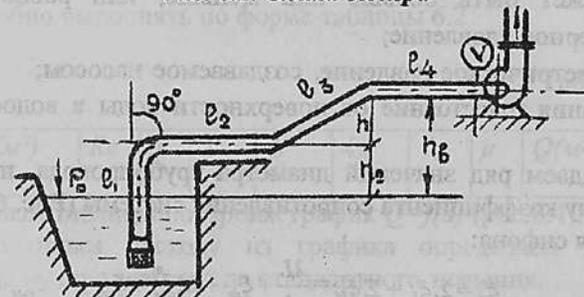


Рис. 6.3. Схема всасывающего трубопровода

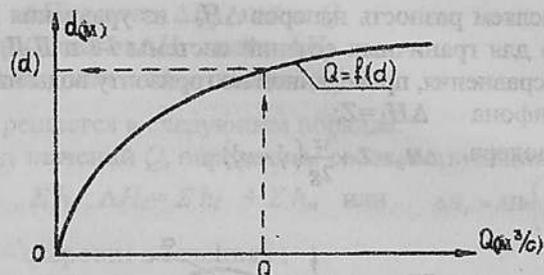


Рис. 6.4. К расчету короткой напорной системы с постоянным диаметром

в) для всасывающего трубопровода насосной установки (плоскость сравнения (о-о) проходит по горизонту воды в водоеме) определить  $\Delta H_e$  невозможно, т.к. в конечном сечении II-II, перед входом в насос неизвестна скорость  $v$

В этом случае уравнение Бернулли, после подстановки в него значений слагаемых, примет

вид:

$$\frac{p_1 - p_a + p_{\text{вк}}}{\gamma} - h_B = \frac{v^2}{2g} (\alpha + \xi_c),$$

или

$$\Delta H = \frac{p_1 - p_a + p_{\text{вк}}}{\gamma} - h_B,$$

где  $p_1$  — барометрическое давление на поверхности воды водоема ( $p_1$  может быть больше или меньше, или равно  $p_a$ );  $p_a$  — атмосферное давление;  $p_{\text{вк}}$  — вакуумметрическое давление, создаваемое насосом;  $h_B$  — высота всасывания (расстояние от поверхности воды в водоеме до оси насоса).

2. Задаем ряд значений диаметра трубопровода, и определяем величину коэффициента сопротивления системы (Рис. 6.1; 6.2; 6.3):

а) для сифона:

$$\xi_c = \sum \xi_L + \sum \xi_M = \frac{\lambda L}{d} + \xi_{\text{кл}} + 2\xi_{\text{пов}} + \xi_{\text{пл.пов}} + \xi_{\text{вк}}.$$

б) для дюкера:

$$\xi_c = \sum \xi_L + \sum \xi_M = \frac{\lambda L}{d} + \xi_{\text{кл}} + 4\xi_{\text{пов}} + \xi_{\text{вк}}.$$

в) для всасывающего трубопровода:

$$\xi_c = \frac{\lambda L}{d} + \xi_{\text{кл}} + \xi_{\text{пов}} + 2\xi_{\text{пов}}.$$

Для упрощения определения величины  $\xi_{\text{реш}}$  можно воспользоваться данными И.Е. Идельчика "Гидравлического сопротивления", 1954г., по которым при входе в прямую трубу

через плоскую решетку  $\phi_{\text{реш}}$  принимается по отношению  $\frac{F_1}{F}$ ;

где  $F_1$  — живое сечение решетки;

$F$  — площадь поперечного сечения трубы.

Значения  $\xi_{\text{реш}}$  приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

$\frac{F_1}{F}$	0.40	0.50	0.60	0.70	0.800	0.90	1.0
$\xi_{\text{реш}}$	10.70	5.80	3.40	2.05	1.37	0.795	0.5

3. Вычисляем коэффициенты расхода:

а) для сифона и дюкера по формуле (6.3);

б) для всасывающего трубопровода по формуле (6.4).

4. Для каждого заданного диаметра вычисляются значения расхода:

а) для сифона и дюкера по формуле (6.1);

б) для всасывающего трубопровода по формуле (6.2).

Расчет удобно выполнять по форме таблицы 6.2

Таблица 6.2

$d$ (м)	$\omega$ (м <sup>2</sup> )	$Re$	$\Delta$	$\lambda$	$\xi_l$	$\xi_M$	$\xi_c$	$\mu$	$Q$ (м <sup>3</sup> /с)
---------	----------------------------	------	----------	-----------	---------	---------	---------	-------	-------------------------

5. По данным таблицы построим график  $Q=f(d)$  (рис.6.4).

6. По заданном расходу из графика определяем диаметр трубопровода и округляем его до стандартного значения.

7. Проверку решения производим по формулам (6.1) или (6.2) при принятом стандартном диаметре.

## 7. РАСЧЕТ «ДЛИННОГО» СЛОЖНОГО НЕЗАМКНУТОГО ТРУБОПРОВОДА

### 7.1. Расчет «длинного» трубопровода

При расчете «длинных» трубопроводов местные потери напора не учитываются, т.к. они не превышают 3-5% от потерь по длине.

Следует пояснить, что сложный трубопровод состоит из магистрали *АВСД* (главной линии) и ответвлений *Вв*, *Сс*, *Дд* и т.д. (рис.7.1)

Магистраль рассматривается как «длинный» трубопровод, составленный из последовательно-соединенных труб разного диаметра со средоточенной раздачей расхода. При расчете магистрали и ответвлений учитываются только потери напора по длине:

$$h_{\Sigma} = \Sigma h_{\ell}$$

Расчетная формула для длинных трубопроводов имеет вид:

$$h_{\ell} = A Q^2 \ell, \quad (7.1)$$

где  $h_{\ell}$  – потери напора для длинной гидравлической системы;

$A$  – удельное сопротивление трубопровода для круглых труб:

$$A = \frac{\lambda}{d 2g\omega^2} = \frac{\lambda}{12.09d^5}, \quad (7.2)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы.

Для не nových стальных и чугунных водопроводных труб, работающих в квадратичной области сопротивления, когда  $v \geq 1,2$  м/с по Ф.А.Шевелеву:

$$\lambda = \frac{0,0210}{d^{0,3}}, \quad (7.3)$$

а удельное сопротивление в этой области:

$$A_{\text{шв}} = \frac{0,001737}{d} \quad (7.4)$$

Из выражения (7.4) видно, что  $A_{\text{шв}} = f(d)$ . Значения этой зависимости взяты из [3] и приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

$d$ (мм)	50	75	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600
$Q$ (л/с)	1.5	3.3	6	10	15	30	50	75	106	145	190	245	365
$A_{\text{шв}}(с^2/м^6)$	3686	929	172.9	76.3	30.6	6.55	2.287	0.847	0.373	0.186	0.09	0.058	0.023
		4		6	5	9					9		

Таблица 7.2

$v$	0.4	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	1.0	1.1	1.1	2
$K_v$	1.2	1.175	1.15	1.13	1.115	1.1	1.085	1.07	1.06	1.05	1.04	1.0	1.01	1.01	0
												3	5		

Значение поправочного коэффициента  $K_v$

При скорости  $v < 1.2 \text{ м/с}$  в формуле для определения удельных сопротивлений  $A$  необходимо вводить поправочный коэффициент  $K_v$ , учитывающий неквадратичность зависимости потерь напора от средней скорости движения воды, взятую из [3] и приведенную в таблице 7.2.

В этом случае расчетная формула имеет вид:

$$h_l = A_{кв} K_v Q^2 \ell \text{ м.} \quad (7.5)$$

### 7.2. Расчет магистрали сложной незамкнутой водопроводной сети

Расчет сложной незамкнутой водопроводной сети поясняется на примере схемы, приведенной на рис. 7.1.

Справочные данные к расчету «длинного» трубопровода

Водопроводная сеть питается из водонапорного бака  $B$ , установленного на водонапорной башне.

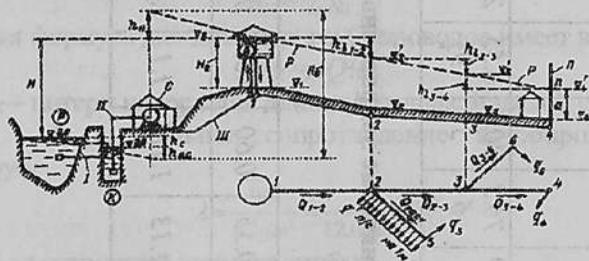


Рис. 7.1. Сложная незамкнутая водопроводная сеть

Для гидравлического расчета рассматриваемой сети заданы следующие величины:

1. Длины  $\ell_i$  отдельных участков сети;
2. Отметки поверхности земли в начале и конце участков магистрали и ответвлений  $\nabla_A, \nabla_B, \nabla_3, \nabla_4$  и т.д.;
3. Расчетные расходы воды, забираемые в отдельных точках сети  $Q_1, Q_2, Q_3$ , и т.д.;
4. Расходы непрерывной раздачи на 1 м длины трубопровода  $q_1, q_2$ ;

5. Свободный напор в конце ветвей  $h_{св}$ ;

6. Материал труб

Требуется определить диаметр труб отдельных участков магистрали и ответвлений, а также отметку горизонта воды в водонапорном баке  $B$ , обеспечивающую подачу заданных расходов воды в заданные точки сети.

Расчет магистрали выполняется в следующем порядке.

1. Определяем расчетные расходы для отдельных участков сети. Расчетный расход для любого участка будет равен сумме расходов, забираемых из магистрали ниже (по течению) этого участка.

Например, для участка  $AB$  расчетный расход будет:

$$Q_{AB} = Q_1 + q_1 \ell_1 + Q_2 + Q_3 + q_2 \ell_2.$$

Для участка  $BC$ :

$$Q_{BC} = Q_2 + Q_3 + q_2 \ell_3.$$

Для участка  $CD$ , где имеется  $Q_{тр} = Q_3$  и  $Q_p = q_2 \ell_3$ , расчетный расход будет:  $Q_{CD} = Q_3 + 0.55 q_2 \ell_3$ ,

где  $Q_{тр}$  — транзитный расход на участке трубопровода;

2. Определяем диаметры труб для отдельных участков магистрали, рекомендуемые в таблице 7.1.

3. Определяем удельные сопротивления для квадратичной области  $A_{кв}$  по диаметру из таблицы 7.1.

4. Вычисляем скорость на отдельных участках магистрали:

$$v = \frac{Q}{0.785 d^2}.$$

5. По вычисленным скоростям принимаем значения  $K_v$  из таблицы 7.2.

6. Вычисляем потери напора на каждом участке магистрали по формуле

$$h_l = A_{кв} \cdot K_v \cdot Q^2 \cdot \ell.$$

### 7.3. Построение напорной линии E-E

В случае «длинных» трубопроводов пренебрегают скоростным напором (ввиду его малости по сравнению с потенциальным). При этом напорная и пьезометрическая линии считаются совпадающими.

## 7.4. Расчет ответвлений

Линия, в которую сливаются линии E-E и P-P называются напорной линией.

Построение линии P-P надо начинать с определения отметки ее в конце магистрали. Для рассматриваемой системы в начале определим отметку линии P-P в узле Д.

$$\nabla p_D = \nabla_D + h_{cD}$$

Затем, идя от узла Д против течения, определяем отметки линии P-P выше лежащих узлов магистрали путем прибавления потерь напора  $h_i$  между узлами:

$$\nabla p_C = \nabla p_D + h_{cD} \text{ и т.д.}$$

По вычисленным отметкам  $\nabla p$  строим напорную линию

Отметка горизонта воды водонапорной башни ( $\nabla ГВВБ$ ) определится как сумма отметки линии P-P конечного узла магистрали и общих потерь напора на магистрали:

$$\nabla ГВВБ = \nabla p_D + \Sigma h_i$$

Расчет магистрали выполняется в расчетной таблице следующей формы.

Таблица 7.1

Узлы магистрали	Длина участка (м)	Отметки узла магистрали (м)	Расчетный расход (л/с)	Диаметр трубопровода (мм)	Удельн. сопротивления (с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup> )	Площадь поперечного сечения трубы (м <sup>2</sup> )	Скорость (м/с)	КК,	Потери напора (м)	Отметка линии P-P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	$\ell_1$	$\nabla A$	$Q_{AB}$	$d_1$	$A_{кв1}$	$\omega_1$	$v_1$	$K_{v_1}$	$h_1$	$\nabla p_A$
B	$\ell_2$	$\nabla B$	$Q_{BC}$	$d_2$	$A_{кв2}$	$\omega_2$	$v_2$	$K_{v_2}$	$h_2$	$\nabla p_B$
C	$\ell_3$	$\nabla C$	$Q_{CD}$	$d_3$	$A_{кв3}$	$\omega_3$	$v_3$	$K_{v_3}$	$h_3$	$\nabla p_C$
D		$\nabla D$								$\nabla p_D$

Расчет ответвлений также следует выполнять в табличной форме.

1. Отметки напорной линии в узлах магистрали показывают величину напора в начале каждого ответвления. Для рассматриваемой схемы -  $\nabla p_B$  и  $\nabla p_C$ . Напор в конце каждого ответвления определяется как сумма отметки конечной точки ветки и свободного напора:

$$\nabla p_e = \nabla_B + h_{ce}$$

$$\nabla p_c = \nabla_C + h_{ce}$$

2. Потери напора в ответвлениях равны разности напоров в начале и конце их.

$$h_{B-e} = \nabla p_B - \nabla p_e$$

$$h_{C-c} = \nabla p_C - \nabla p_c$$

3. Расчетные расходы ответвлений определяются по такому же принципу как и для магистрали.

4. Приняв работу ответвлений в квадратичной области сопротивления, определяем удельные сопротивления для ответвлений:

$$A_{кв} = A = \frac{h_i}{Q^2 \cdot l}$$

Следует обратить внимание студентов, что в этой формуле  $Q$  выражается в м<sup>3</sup>/с и  $h_i$  и  $l$ , в м,  $A_{кв} = \frac{с^2}{м^6}$

5. Стандартный диаметр  $d_{ст}$  для ответвлений принимается по  $A_{кв}$  из таблицы 7.1, причем  $d_{ст}$  берется ближайшей меньшей величины. Например: при  $A_{кв} = 40 \text{ см}^2 / \text{м}^6$ ,  $d = 125 \text{ мм}$

## Расчет ответвлений

Таблица 7.2

Ветви	Дли-на (м)	Отметки линии P-P на ветви	Потери напора (м)	Расчетный расход $Q$ (м <sup>3</sup> /с)	Акв. (с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup> )	Диаметр трубопровода (мм)
B	$\ell_4$	$\nabla p_B$	$h_{B-e}$	$Q_{B-e}$	$A_{кв4}$	$d_4$
b		$\nabla p_b$				
C	$\ell_5$	$\nabla p_C$	$h_{C-c}$	$Q_{C-c}$	$A_{кв5}$	$d_5$
c		$\nabla p_c$				

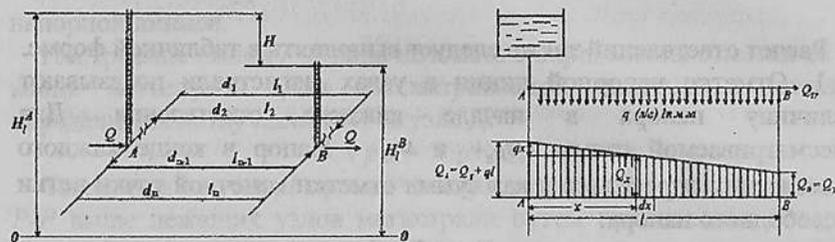


Рис. 7.2.

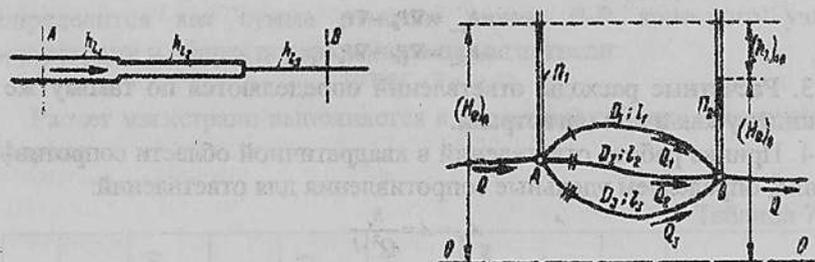


Рис. 7.3.

## 8. ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

### 8.1. Истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке в атмосферу и под уровень

При рассмотрении вопросов истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке следует напомнить характеристику понятий «малое отверстие» и «тонкая» стенка.

Отверстие принято считать малым, если его диаметр  $d$  (круглое отверстие) или высота «а» (прямоугольное отверстие) меньше или равны  $\frac{1}{10}H$  - глубины центра тяжести площади отверстия  $\omega$  (рис.8.1) и  $\frac{\Omega}{\omega} \geq 4$ , где  $\Omega$  - площадь поперечного сечения сосуда в плоскости перпендикулярной к оси отверстия.

Стенка, в которой сделано отверстие, считается «тонкой» в том случае, если её толщина  $\delta$  не влияет на характер истечения. Опытами установлено, что в этом случае  $\delta$  не более 1-1.5 диаметра отверстия.

На расстоянии  $\ell_0 = (0.5-1)d$  от стенки образуется сжатое сечение С-С, в котором считается параллельно струйное течение. Давление по всей площади живого сечения С-С при истечении в атмосферу  $p_c = p_a$ .

Площадь живого сжатого сечения  $\omega_c = \epsilon \cdot \omega$ , где  $\epsilon$  - коэффициент сжатия струи.

Затем следует подчеркнуть, что при расчете истечения из малого отверстия учитываются только местные потери напора

$$h_f = h_{\text{от}} = h_{\text{от}} = \xi_{\text{от}} \frac{v_c^2}{2g},$$

где  $v_c$  - скорость в сжатом сечении;

$\xi_{\text{от}}$  - коэффициент сопротивления при истечении из

отверстия.

#### А. Расчетные зависимости при истечении в атмосферу.

Из уравнения Бернулли для сечений 1-1 и С-С относительно плоскости О-О (рис.8.1) получим выражение для скорости в сжатом сечении.

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{om}}} \sqrt{2gH}, \quad (8.1)$$

или

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH},$$

где  $\varphi$  — коэффициент скорости; ( $\alpha \approx 1.0$ ).

При истечении через малое отверстие в атмосферу расход выражается формулой:

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2gH}, \quad (8.3)$$

где  $\mu_0 = \varphi \varepsilon$  — коэффициент расхода отверстия.

### Б. Расчетные зависимости при истечении под уровень.

В случае истечения под уровень (рис.8.2) из уравнения Бернулли, составленного для сечений 1-1 и 2-2, получим:

$$v_c = \varphi \sqrt{2gZ}, \quad (8.4)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\xi_{om} + \xi_{max}}}, \quad (8.5)$$

$\xi_{max}$  — коэффициент сопротивления на выход при  $v \approx 0$

$$\xi_{max} = 1.0$$

Расход для этого случая определяется по формуле:

$$Q = \mu_0 \cdot \omega \sqrt{2gZ}, \quad (8.6)$$

где  $Z$  — разность отметок уровня жидкости в резервуарах.

## 8.2. Типы сжатия струи

Сжатие струи может быть совершенным, несовершенным, неполным.

а) Совершенное сжатие будет в том случае, если боковые стенки и дно сосуда удалены от отверстия на расстояния, удовлетворяющие условию (рис.8.3):

$$m > 3a \quad n > 3a$$

В этом случае, как установлено опытами, для квадратичной области сопротивления численные значения коэффициентов будут:

$$\varepsilon = 0.63 + 0.64; \quad \varphi_{om} = 0.06; \quad I = 0.97; \\ \mu_0 = 0.62.$$

Здесь следует обратить внимание на одинаковые численные значения коэффициентов при истечении в атмосферу и под уровень.

б) Несовершенное сжатие струи получается при несоблюдении указанных выше условий (Рис.8.3). В этом случае, чем меньше размеры  $m$  и  $n$ , тем меньше сжатие струи и больше величина  $\varepsilon$ . Коэффициент расхода при этом будет:

$$(\mu_0)_{нес} \approx \mu_0 \left( 1 + \frac{\tau}{100} \right), \quad (8.7)$$

где  $\tau$  — величина, зависящая от отношения  $\frac{\omega}{\Omega}$ ;

в) Неполное сжатие струи будет, когда  $m$  или  $n$  равны нулю сжатия струи нет, за счет чего увеличивается коэффициент расхода. (рис. 8.3в). В этом случае стороне, где  $m$  или  $n$  равны нулю

$$(\mu_0)_{неп} \approx \mu_0 \left( 1 + 0.4 \frac{P}{P'} \right), \quad (8.8)$$

где  $P$  — периметр отверстия;

$P'$  — часть периметра отверстия, где струя не испытывает сжатия.

## 8.3. Истечения жидкости из кругло-цилиндрического насадка при постоянном напоре

Насадком называется короткая труба  $l = (3-7)d$ , присоединяемая к малому отверстию с внешней или внутренней стороны, с целью увеличения его пропускной способности за счет образования вакуума в сжатом сечении.

Основные типы насадков: цилиндрические, внешние и внутренние (рис.8.4 а, б), конические — сходящиеся и расходящиеся (рис.8.4 в, г) коноидальные (рис.8.4 д).

### А. Расчетные зависимости при истечении из внешнего цилиндрического насадка (насадок Вентури).

1. Истечение в атмосферу (рис. 8.5).

Из уравнения Бернулли составленного для сечений 1-1 и В-В относительно плоскости O-O, получим формулу для определения скорости на выходе из насадка.

$$v_b = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (8.9)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_n}} \quad \text{- коэффициент скорости,} \quad (8.10)$$

$\varphi_n$  - коэффициент сопротивления насадка.

Формула для определения расхода имеет вид:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} \quad (8.11)$$

2. Истечение под уровень (рис. 8.6)

В этом случае из уравнения Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, приняв скорости  $v_1 = v_2 \approx 0$ , получим выражение:

$$v_b = \varphi \sqrt{2gZ} \quad (8.12)$$

где  $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\xi_n + \xi_{\text{сж}}}}$  - коэффициент скорости

Формула для определения расхода имеет вид:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gZ}. \quad (8.13)$$

### Б. Численные значения коэффициентов

$\epsilon, \varphi_n, \xi_n, \varphi, \mu$

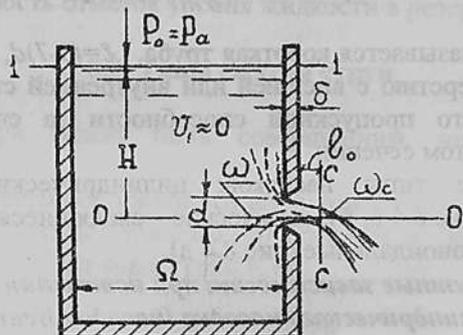


Рис. 8.1. Истечение жидкости из малого отверстия в атмосферу

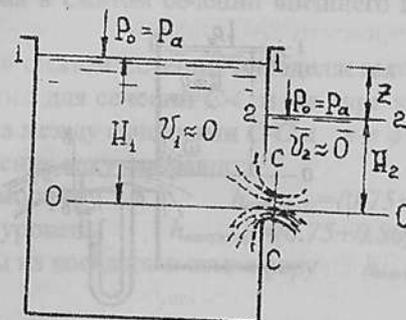


Рис. 8.2. Истечение жидкости из малого отверстия под уровень

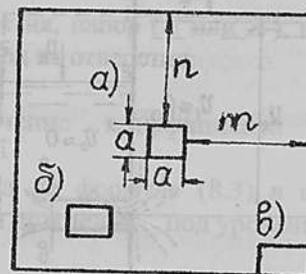


Рис. 8.3. К вопросу о типе сжатия струй

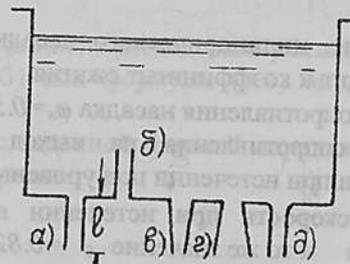


Рис. 8.4. Типы насадок

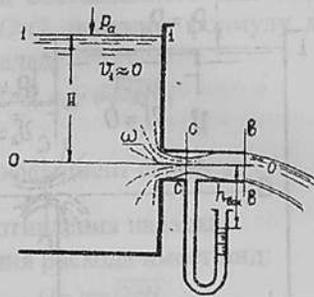


Рис. 8.5. Насадок Вентури.  
истечение в атмосферу

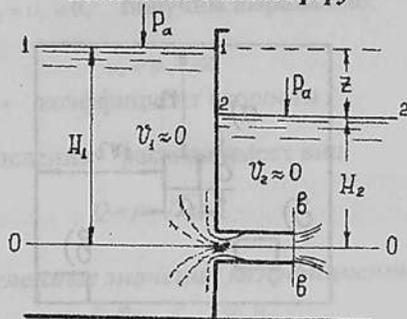


Рис. 8.6. Истечение под уровень через насадок

При истечении из цилиндрического насадка сжатие струи на выходе не происходит и коэффициент сжатия  $E=1.0$

Коэффициент сопротивления насадка  $\varphi_n=0.50$

Коэффициент сопротивления на выход при истечении в атмосфере  $\varphi_{\text{вых}}=0$ , а при истечении под уровень при  $V \approx 0$ ,  $\xi_n = 1.0$

Коэффициент скорости при истечении в атмосферу и под уровень имеет одно и то же значение  $\varphi = 0.82$

Коэффициент расхода насадка при истечении в атмосферу и под уровень одинаков  $\mu = \varphi I = 0.82$

Значение коэффициентов скорости и расхода для насадков прочих типов приведены в гидравлических справочниках /1/, (стр. 343-344)

В. Величина вакуума в сжатом сечении внешнего цилиндрического насадка.

Величина вакуума в сжатом сечении определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений С-С и в-в, при коэффициенте сопротивления насадка между сечениями С-С и в-в  $\varphi=0.35$

Теоретическое значение вакуума равно:

При истечении в атмосферу  $h_{\text{вак(max)}} = (0.75 + 0.80)H$

При истечении под уровень  $h_{\text{вак(max)}} = (0.75 + 0.80)(Z - H_2)$

При истечении воды из насадков в атмосферу  $h_{\text{вак(max)}} = 13.8\text{ м}$

#### 8.4. Основные типы задач при истечении жидкости из малых отверстий

##### Задача 8.1

Даны размеры отверстия, напор ( $H$  или  $Z$ ), известен тип сжатия струи. Определить расход из отверстия

Решение:

1. Определяем значение коэффициента расходов  $\mu$  как указано в пункте 8.2.

2. Вычисляем расход по формуле (8.3) в случае истечения в атмосферу или (8.6) при истечении под уровень.

##### Задача 8.2

Даны расход  $Q$ , напор ( $H$  или  $Z$ ), форма отверстия и местоположение отверстия в тонкой стенке. Определить размеры отверстия.

Решение:

1. Определяем коэффициент расхода, как указано в пункте 8.2

2. Из формулы (8.3) или формулы (8.6) определяем площадь отверстия  $\omega$ .

3. В соответствии с заданной формой определяем диаметр или высоту и ширину отверстия.

##### Задача 8.3

Даны расход  $Q$ , площадь отверстия  $\omega$ , тип сжатия струи. Определить при свободном сечении напор  $H$  или разницу отметок уровней в резервуарах  $Z$ , в случае истечения под уровень.

**Решение:**

1. Определяем коэффициент расхода  $\mu$
2. Из формулы (8.3) определяем  $H$  или из формулы (8.6) определяем  $Z$

### 8.5. Основные типы задач при истечении из насадов

#### Задача 8.4

Даны диаметр  $d$  короткой трубы длиной  $\ell=(3/7)d$  и расход  $Q$ , вытекающий из трубы в атмосферу. Определить напор  $H$  над центром трубы и величину вакуума в сжатом сечении  $h_{\text{вак}}$ .

**Решение:**

1. Предполагая что труба работает как насадок, из формулы (8.11) определяем напор  $H$ , приняв коэффициент расхода  $\mu=0.82$ .
2. Проверяем правильность предположения, что труба работает как насадок, сравнивая вычисленный напор с  $h_{\text{вак(max)}}$ . Условие выполняется при  $H \leq h_{\text{вак(max)}}$ .
3. Определяем скорость в сжатом сечении, полагая  $\varepsilon=0.64$

$$v_c = \frac{Q}{\varepsilon(0.785d^2)}$$

4. Из уравнения Бернулли для сечения 1-1 и C-C (рис.8.5) получим:

$$\frac{P_c}{\gamma} = H + \frac{P_0}{\gamma} - \frac{v_c^2}{2g}(\alpha + \xi_{\text{т.с}})$$

5. Величина вакуума будет:  $h_{\text{вак}} = \frac{P_0 - P_c}{\gamma}$

В случае, когда  $h_{\text{вак}} > h_{\text{вак(max)}}$ , уточняется напор  $H$  при котором  $h_{\text{вак}}$  будет меньше или равным  $h_{\text{вак(max)}}$ .

#### Задача 8.5

В теле дамбы устраивается водовыпуск в виде трубы длиной  $\ell$ . Известен напор  $H$  над центром трубы, глубина в нижнем бьефе  $h$ , через трубу пропускается расход  $Q$ . Определить диаметр трубы  $d$ .

**Решение:**

1. Определяем площадь поперечного сечения трубы  $\omega$  из формулы (8.11), предполагая что она работает как насадок с коэффициентом расхода  $\mu=0.82$  при истечении в атмосферу

2. Вычисляем диаметр трубы  $d = \sqrt{\frac{\omega}{0.785}}$  и выясняем соотношение

между диаметром водовыпуска и его длиной. Если  $\ell=(3-7)d$ , то задача решена верно, если  $\ell > (3-7)d$ , то расчет выполняется как для «короткой» напорной системы.

7. Определяем величину вакуума в сжатом сечении и сравниваем его с допустимым  $h_{\text{вак(max)}}$ .

## 9. РАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

### 9.1. Гидравлические элементы живого сечения потока в канале

Живое сечение потока характеризуется формой и размерами. Основные гидравлические элементы живого сечения  $\omega$ ,  $\chi$ ,  $R$  определяются по следующим формулам:

А. Трапециидальное сечение (рис.9.2 а)

$$\text{Живое сечение: } \omega = h(b + mh) = h^2(\beta + m), \quad (9.1)$$

$$\text{Смоченный периметр: } \chi = b + 2m'h = h(\beta + 2m), \quad (9.2)$$

$$\text{Гидравлический радиус: } R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (9.3)$$

где  $h$  – глубина потока в канале;

$b$  – ширина канала по дну;

$m$  – коэффициент откоса назначается по условиям устойчивости откоса в зависимости от гидрогеологических и геологических условий, глубины канала, глубины воды в нем, а также в зависимости от условий производства работ.

Значение коэффициента  $m$  принимается по СНиПу (СНиП 2.06.03-97).

$\beta = \frac{b}{h}$  – относительная ширина по дну;

$$m' = \sqrt{1 + m^2}. \quad (9.4)$$

Ширина потока поверху определяется по формуле:

$$B = b + 2mh. \quad (9.5)$$

Б. Прямоугольное сечение (рис.9.2 б)

При определении элементов поперечного сечения такой формы используется те же формулы что и для трапециидального сечения при  $m=0$

В. Треугольное сечение (рис.9.2 в)

При определении элементов поперечного сечения такой же формы используются те же формулы, что и для трапециидального сечения при  $b=0, \beta=0$ .

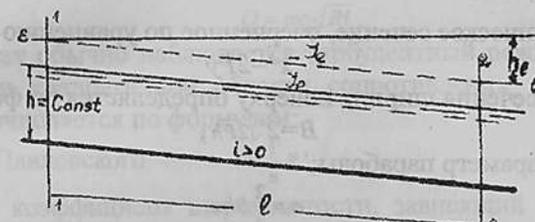


Рис. 9.1. Схема равномерного движения воды в канале

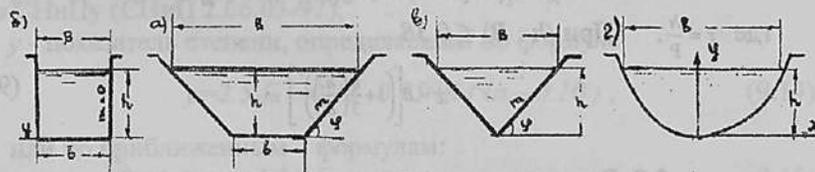


Рис. 9.2. Примеры поперечного сечения канала

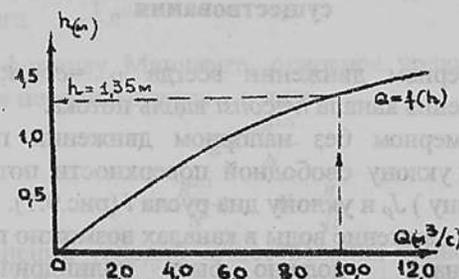


Рис. 9.3. Рабочая характеристика канала

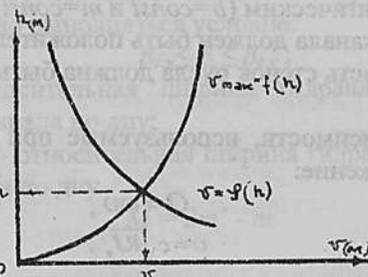


Рис. 9.4. К расчету неразмываемого канала

Г. Параболическое сечение, очерченное по уравнению  $x^2=2Py$  (рис.9.2)

Для этого сечения ширина поверху определяется по формуле:  
 $B=2\sqrt{2Ph}$ , (9.6)

где:  $P$ - параметр параболы;  
 $\omega = \frac{2}{3} Bh$ . (9.7)

Смоченный периметр:  
 $\chi = 2\sqrt{2\tau(1+2\tau)} + 2,3 \lg(\sqrt{2\tau} + \sqrt{1+2\tau})$ , (9.8)

где  $\tau = \frac{h}{P}$ . При  $(h : B) \leq 0,38$   
 $\chi = B \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{h}{B} \right)^2 \right]$ . (9.9)

### 9.2. Равномерное движение воды в каналах, его характеристики и условия существования

При равномерном движении всегда  $v = const$ ;  $\alpha = const$ ; глубина наполнения канала  $h = const$  вдоль потока.

При равномерном без напорном движении гидравлический уклон  $J_e$  равен уклону свободной поверхности потока (пъезометрическому уклону)  $J_p$  и уклону дна русла  $i$  (рис.9.1).

Равномерное движение воды в каналах возможно при условиях:

- 1) русло канала должно быть цилиндрическим (при параболическом сечении параметр и степень параболы одинаковы по длине, для кругового – геометрический радиус одинаков по длине) или призматическим ( $b = const$  и  $m = const$  по длине русла);
- 2) уклон дна канала должен быть положительным и  $i = const$ ;
- 3) шероховатость стенок русла должна быть одинакова по длине ( $n = const$ ).

Основные зависимости, используемые при расчете каналов на равномерное движение:

$$Q = \omega v, \quad (9.10)$$

$$v = c \sqrt{R J_e}. \quad (9.11)$$

Учитывая, что при равномерном движении  $J_e = i$ , основное уравнение (формула Шези) записывается в таком виде:

$$Q = \alpha c \sqrt{R i}. \quad (9.12)$$

В каналах обычно наблюдается турбулентный режим движения. Тогда при квадратичной области сопротивления коэффициент Шези  $C$  вычисляется по формулам:

$$1. \text{ Н.Н.Павловского } c = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{2}}, \quad (9.13)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости, зависящий от материала стенок русла и эксплуатационного состояния канала. Определяется он по справочным данным [1], (таблица 4-3), [2], (таблица 4-5) или по СНиПу (СНиП 2.06.03-97);

$y$  - показатель степени, определяемый по формуле:

$$y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,10), \quad (9.14)$$

или по приближенным формулам:

$$\text{при } R < 1,0 \text{ м, } y = 1,5 \sqrt{n}, \quad (9.15)$$

$$R > 1,0 \text{ м, } y = 1,3 \sqrt{n}. \quad (9.16)$$

$$2. \text{ Маннинга } c = \frac{1}{n} R^{1/6}. \quad (9.17)$$

Используя формулу Маннинга, основное уравнение равномерного движения переписывается в виде:

$$Q = \frac{\omega R^{2/3}}{N}, \quad (9.18)$$

$$v = \frac{R^{2/3}}{N}; \quad N = \frac{n}{\sqrt{i}}. \quad (9.19)$$

При выполнении условий существования равномерного движения (формула Шези) структура потока может не соответствовать схеме равномерного движения, поток будет делиться на отдельные рукава, и ось потока будет отклоняться от оси русла. Чтобы этого не происходило должно выполняться условие:

$$\beta_{z,n} \leq \beta \leq \beta_{z,y}, \quad (9.20)$$

$\beta_{z,n}$  – относительная ширина гидравлически наивыгоднейшего сечения канала по дну;

$\beta_{z,y} = 7M - m$  - относительная ширина гидравлически устойчивого сечения канала по дну.

$$M = 2m' - m.$$

### 9.3. Гидравлически наивыгоднейший поперечный профиль трапецидального канала

При известных величинах  $Q, m, n, i$  можно запроектировать много поперечных профилей канала с различными  $b$  и живым сечениями. Среди этих сечений имеется такое, в котором средняя скорость  $v$  оказывается максимальной.

$$v = v_{\max} = \frac{1}{N} \left[ \frac{QN}{4M} \right]^{3/8}, \quad (9.21)$$

Откуда при  $y=1/6$  следует:

$$R_{\max} = \left[ \frac{QN}{4M} \right]^{3/8}, \quad (9.22)$$

В этом случае:

$$\beta = \beta_{z.n.} = \left( \frac{b}{h} \right)_{z.n.} = 2(\sqrt{1+m^2} - m) = 2m' - 2m, \quad (9.23)$$

Введя обозначение:

$$\begin{aligned} M &= 2m' - m \\ \beta_{z.n.} &= M - m \end{aligned} \quad (9.24)$$

Канал гидравлически наивыгоднейшего сечения относительно глубокий с малой шириной по дну.

### 9.4. Проверка канала на размыв и заиление

Вначале студентам кратко поясняются явления размыва и заиления каналов. Для обеспечения высокой надежности каналов необходимо принимать такое расчетное значение средней скорости  $v$ , при которой в канале не будет происходить размыв. Для нормальной работы канала средняя скорость  $v = \frac{Q}{\omega}$  должна быть в пределах  $v_3 \leq v \leq v_p$ ,

где  $v_p$  — допустимая неразмывающая средняя скорость;

$v_3$  — наименьшая незаиляющая средняя скорость.

Под допустимой неразмывающей средней скоростью понимается наибольшее значение средней скорости движения воды, при которой поток не может вызвать недопустимого для нормальной эксплуатации размыва (разрушения) русла.

За незаиляющую скорость принимается наименьшее значение средней скорости движения, при которой поток способен транспортировать без осаждения находящиеся в нем насосы.

Допустимая неразмывающая скорость  $v_p$  зависит от рода грунта или материала облицовки стенок русла и глубины наполнения  $h$ . Принимается  $v_p$  по СНиПу (СНиП 2.06.03-97).

Наименьшая незаиляющая скорость может определяться по формулам Е.А.Замарина; С.Х.Абальянца, А.М. Арифжанова и др.

$$v_3 = \sqrt[3]{\frac{A^3}{n^2} R^{1/3}}, \quad (9.25)$$

где

$$A = 0,0127 \sqrt{\rho^2 W_0^2 \bar{W}}, \quad (9.26)$$

$\rho$  — мутность потока (кг/м<sup>3</sup>),  $\bar{W}$  — средневзвешенная гирволическая крупность наносов (мм/с);

$W_0 = W$ , если  $W \geq 2$  мм/с,  $W_0 = 2$  мм/с если  $W < 2$  мм/с;

по формуле С.Х.Абальянца:

$$v_3 = a \sqrt{R} \quad (9.27)$$

$$\text{где } a = 0,382 \sqrt{\rho \bar{W}} \quad (9.28)$$

по формуле А.Арифжанова:

$$v = \alpha_0 \sqrt[3]{\rho g R \bar{W}};$$

где  $\alpha_0 = \sqrt[3]{\frac{W_0}{W}}$ ;  $W_0 = 0,069$  мм/с;

$W$  — гидравлическая крупность — скорость равномерного падения частицы насосов в неподвижной воде.

Для выяснения условия работы канала необходимо определить действительную скорость  $v$ , наибольшую неразмывающую  $v_p$  и наименьшую незаиляющую  $v_3$  и сделать сравнение:

если  $v \leq v_p$  канал не размывается;

если  $v > v_p$  канал размывается;

если  $v \geq v_3$  канал не заиляется;

если  $v < v_3$  канал заиляется;

если  $U \leq U_3 \leq U_p$  канал не размывается, и не заиляется.

### 9.5. Основные задачи при расчете трапецидальных каналов

Трапецидальный канал характеризуется следующими шестью элементами:

$$Q, m, n, i, b, h.$$

Задачи гидравлического расчета канала могут быть следующих типов:

А. Три основные задачи гидравлического расчета канала (известны пять элементов, найти один).

#### Задача 1.

Даны все размеры живого сечения  $m, b, h$ , уклона дна  $i$ , коэффициент шероховатости  $n$ . Требуется найти расход  $Q$  воды в канале.

**Решение:**

1. Вычисляем  $\omega, \chi, R$ , по зависимостям: (9.1 и 9.2, 9.3)

2. Вычисляем  $c = \frac{1}{n} R^y$ ;

3. Вычисляем  $v = c\sqrt{Ri}$  или  $v = \frac{R^{2/3}}{N}$ , приняв  $y = 1/6$

4. Определяем  $Q = \omega v$

Проверяем канал на размыв и заиление как указано в пункте 9.3.

#### Задача 2.

Даны:  $Q, m, n, b, h$ . Найти значение уклона дна  $i$ .

**Решение:**

1) Также как и в задаче 1 определяем величины  $\omega, \chi, R, c$ ;

2) Вычисляем уклон дна по зависимости:

$$i = \frac{Q}{\omega^2 c^2 R} \quad \text{или} \quad i = \frac{Q^2 n^2}{\omega^2 R^{4/3}} \quad \text{приняв} \quad y = 1/6$$

#### Задача 3.

Определение глубины наполнения канала при равномерном движении  $h_0$ .

Даны:  $Q, m, n, i, b, n$ . Требуется определить глубину наполнения канала  $h_0$ . Следует подчеркнуть, что при неизвестной величине  $h_0$

задача прямого решения не имеет, т.к. величины  $\omega, R, C$ , сложно выражаются через  $h_0$ .

Поэтому рассмотрим следующие способы определения  $h_0$ .

**I способ:** определения нормальной глубины путем построения рабочей характеристики канала, графика  $Q=f(h)$ .

Ход решения задачи поясняется на следующем примере.

#### Примере 9.1

Определить нормальную глубину в канале трапецидального сечения при пропуске расхода  $Q=10 \text{ м}^3/\text{с}$ , если  $m=1.0$ ;  $n=0.015$ ;  $i=0.0003$ ;  $b=7.0 \text{ м}$

**Решение:**

1. Задаем ряд значений  $h$  и для каждой  $h$  вычисляем расход  $Q$  как в задаче 1. Расчет сводим в таблицу следующей формы.

Таблица к расчету глубины равномерного движения воды.

Таблица 9.1

$h$ (м)	$\omega$ (м <sup>2</sup> )	$\chi$ (м)	$R$ (м)	$C$ (м <sup>0.5</sup> /с)	$Q$ (м <sup>3</sup> /с)
1.0	8.0	9.82	0.81	48.3	6.03
1.3	10.8	10.7	1.02	50.2	9.50
1.5	12.8	11.2	1.14	51.1	12.00

2. По данным таблицы строим график  $Q=f(h)$  (рис.9.3), из которого при заданном расходе  $Q=10 \text{ м}^3/\text{с}$  определяем  $h_0 = 1.35 \text{ м}$ .

Необходимо обратить внимание студентов на то, что кривая  $Q=f(h)$  проходит через начало координат. Для построения плавной кривой необходимо задавать не менее трех значений  $h$ .

3. Проверку решения при найденном значении  $h_0$  выполняем по формуле (9.12).

4. Сравниваем действительную среднюю скорость  $V_c, V_p, V_3$ , для выявления условия работы канала.

**II способ:** определения нормальной глубины по линейке инженера В.Ф.Полякова построенной по формуле Шези-Маннинга. Правила пользования ею указаны на самой линейке.

**III способ:** определения нормальной глубины по таблицам доцента Р.М. Каримова, приведенным в [6].

**IV способ:** определения нормальной глубины на ЭВМ. Для этого составлен специальный алгоритм расчета.

### Канал трапецидального сечения.

#### Пример 9.2.

Определить нормальную глубину для трапецидального канала  $h_0$  при известных:  $Q=20 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $m=1.5$ ;  $n=0.02$ ;  $i=0.0004$ ;  $b=10 \text{ м}$

#### Решение:

1. Вычисляем значение функции

$$K_1 = 0,159 \frac{Qn}{\sqrt{j}} = 0,159 \frac{20 \cdot 0,02}{\sqrt{0,0004}} = 3,18$$

2. Из таблицы 1-1 (стр. 12-13) по  $K_1$  определяем  $R_0=1.54$

3. Вычисляем значение отношения

$$K_1 = \frac{b}{R_0} = \frac{10}{1,54} = 6,49$$

4. Из таблицы 2-3 (стр. 90-97) по заданному коэффициенту откоса и вычисленному  $K_2$  определяем значение

$$S = \frac{h_0}{R_0} = 0,957$$

5. Определяем глубину  $h_0 = SR_0 = 0,957 \cdot 1,54 = 1,47 \text{ м}$

### Канал параболического сечения.

#### Пример 9.3

Определить глубину наполнения канала  $h_0$  параболического сечения при известных значениях:

$$Q=16 \text{ м}^3/\text{с}; \quad p=30 \text{ м}; \quad \alpha=3; \quad i=0.0003; \quad n=0.014$$

Уравнение параболы, образующей смоченный периметр:  $x^2=py$

#### Решение:

1. Вычисляем значение функции

2. По таблице 1-1, (стр. 12-13) определяем  $R_0=1.30$

3. Вычисляем значение функции:  $K_2=Q^{1/(\alpha-1)}/R_0=30^{1/(3-1)}/1.30=4.21$

8. По таблице 2-5 для (стр. 49-63)  $\alpha=3$  и  $K_2=4.21$  определяем

$$S_1 = h_0/R_0 = 1.47$$

9. Зная величины  $S$  и  $R_0$  определяем

$$h_0 = S_1 R_0 = 1.47 \cdot 1.30 = 1.91 \text{ м}$$

10. По таблице 2.5 определяем отношение

$$S_2 = \frac{B}{R_0} = 6,0$$

11. Определяем ширину потока по верху:

$$B = S_2 R_0 = 6,0 \cdot 1,30 = 7,80 \text{ м}$$

**Задачи, встречающиеся при проектировании каналов** (известны 4 элемента, найти два)

Поясняя решение задач такого типа, необходимо указать, что т.к для расчета равномерного движения в открытых руслах имеется только одна формула:

$$Q = \omega \sqrt{Ri}$$

то при числе неизвестных элементов более одного необходимо задавать дополнительные уравнения

#### Задача 4

Даны  $Q, m, n, b$ , и дополнительно  $v$ .

Требуется найти  $h_0$  и  $i$ .

#### Решение:

Для определения двух неизвестных элементов имеем уравнения:

$$1) \quad Q = \frac{\omega R^{\frac{2}{3}}}{N} \quad \text{и} \quad 2) \quad mh^2 + bh = \frac{Q}{v}$$

1. Вычисляем площадь живого сечения:

$$\omega = \frac{Q}{v}$$

2. Определяем глубину наполнения из формулы:

$$h = \frac{1}{2m} (\sqrt{b^2 + 4m\omega} - b)$$

3. Определяем значение смоченного периметра:

$$\chi = b + 2m'h$$

4. Вычисляем величину гидравлического радиуса:

$$R = \frac{\omega}{\chi}$$

5. Вычисляем величину уклона дна:

$$i = \frac{v^2 n^2}{R^3}$$

#### Задача 5

Даны:  $Q, m, n, i$  и дополнительно  $v$ .

Требуется найти  $h_0$  и  $b$ .

**Решение:**

1. Вычисляем:  $\omega = \frac{Q}{v}$

2. Вычисляем:  $R = (\omega N)^{2/3}$

3. Вычисляем:  $x = \frac{\omega}{R}$

4. Имея два уравнения:  $mh^2 + bh - \omega = 0$  (1) и  $b + 2m'h - x = 0$  (2)

Определяем:  $h_{1,2} = \frac{1}{2M} (x \pm \sqrt{x^2 - 4M\omega})$

5. Ширина по дну равна:  $b = \frac{\omega}{h} - mh$

Студентам следует указать, что каналы имеют стандартную ширину по дну:

$b_{см} = 0.2; 0.4; 0.5; 0.8; 1.0; 1.2; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5; 4.0; 4.5; 5.0;$  и далее через 1.0 м

6. Вычисленная величина  $b$ , округляется до стандартного значения и уточняется глубина наполнения канала  $h_0$  при  $b = b_{СТ}$ .

**Задача 6**

Даны:  $Q, m, n, i$  и дополнительно  $R$ . Найти  $b$  и  $h_0$

**Решение:**

1. Определяем площадь живого сечения:

$$\omega = \frac{QN}{R^{2/3}}$$

2. Определяем:

$$x = \frac{\omega}{R}$$

3. Определяем:

$$h_{1,2} = \frac{1}{2M} (x \pm \sqrt{x^2 - 4M\omega})$$

4. Ширина канала по дну:

$$b = \frac{\omega}{h} - mh$$

5. Уточнение величин  $b$  и  $h_0$  выполняется как указывалось выше.

**Задача 7**

Даны:  $Q, m, n, i$  и дополнительно  $\beta$

Требуется найти  $h_0$  и  $b$

**Решение:**

1. Определяем гидравлический радиус:

$$R = \left[ \frac{QN(\beta + m)}{(\beta + 2m)^2} \right]^{2/3}$$

Далее решение выполняется как в задаче 6.

**Проектирование неразмываемого трапецидального канала стандартной ширины по дну.**

При проектировании канала обычно известны расход и характеристика грунта, в котором должен быть построен неразмываемый канал.

Таким образом известны:  $Q$  и тип грунта, характеризуемый коэффициентом сцепления  $C$  или диаметром частиц  $d$ . Средняя скорость движения воды в канале равна наибольшей скорости  $v = v_p$ .

Проектирование каналов выполняется в соответствии с СНиПом (СНиП 2.06.03-97).

Решение выполняется в следующем порядке:

1. По характеристике грунта и расхода определяется коэффициент шероховатости  $n$  (СНиП таблица 3-1) (стр.22), (Таблица 6, приложение и коэффициента заложение откосов-  $m$ )

2. Из статистических зависимостей С.А.Гиршкана определяется рациональная ширина канала по дну  $b_2$

$$b_2 = A Q^x$$

при

$$Q = (1.0 - 1.5) \text{ м}^3/\text{с} \quad A = 1.4; \quad x = 0.85$$

$$Q = (1.5 - 50) \text{ м}^3/\text{с} \quad A = 1.5; \quad x = 2/3$$

$$Q \geq 50 \text{ м}^3/\text{с} \quad A = 1.3; \quad x = 2/3$$

Полученная ширина канала по дну  $b_2$  округляется до стандартного значения.

Выполнив эти действия для дальнейшего решения задачи будут известны:  $Q, m, n, b$ , и в качестве дополнительного условия  $v = v_p$ .

3. По характеристике грунта (тип грунта и коэффициент сцепления или диаметр частиц грунта) из СНиП выписываются допустимые (Таблица 4, приложение) неразмывающие средние

скорости  $v_p$ , при средней глубине потока  $h$ . Составляется таблица (9.2)

Таблица 9.2

$h(m)$	$v_p(m/c)$	$\omega(m^2)$	$v(m/c)$
0.5			
1.0			
3.0			
5.0			

4. При взятых из СН и П  $h$ , определяется значения площади живого сечения  $\omega=h(b+mh)$  и средней скорости потока  $v=Q/\omega$

5. По данным таблицы строятся графики  $v_p=f(h)$  и  $v=\varphi(h)$  (рис.9.4)

Точка пересечения кривых определит действительные значения  $v$  и  $h_0$  потока.

6. При найденном значении  $h_0$  определяются величины  $\omega, \chi, R, i$ .

## 10. НЕРАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

### 10.1. Примеры возникновения плавно изменяющегося движения

Неравномерное движение воды в каналах характеризуется в общем случае условиями:

$h \neq const$  (вдоль течения);

$v \neq const$  (вдоль течения);

$J_e \neq J_p \neq i$

Такое явление возникает, когда каким либо путём нарушается равномерное движение.

Например:

1. Русло канала цилиндрическое с прямым уклоном дна ( $i > 0$ );

а) в канале устраивается плотина (рис.10.1.а);

б) в канале устраивается перепад (рис.10.1.б);

в) в канале устраивается щит (рис.10.1.в);

2. Русло канала цилиндрическое с горизонтальным дном ( $i=0$ ) (рис.10.2.а.), или с обратным уклоном: ( $i < 0$ ) (рис.10.2.б.).

3. Русло не цилиндрическое: расширяющееся или сужающееся (рис.10.3.а и б).

При изучении теории неравномерного плавно изменяющегося движения необходимо использовать следующие понятия, рассматриваемые ниже.

#### 10.2.1. Удельная энергия сечения

Удельная энергия в каком – либо живом сечении потока, вычисленная относительно плоскости сравнения  $O-O$ , проходящей по самой нижней точки дна сечения русла (рис.10.4.) без учёта атмосферного давления называется удельной энергией сечения  $\mathcal{E}$  и определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = h + \frac{\alpha v^2}{2g}$$

Размерность удельной энергии сечения линейная.

Следует подчеркнуть, что полная удельная энергия  $E$  всегда уменьшается вниз по течению, тогда как удельная энергия сечения  $\mathcal{E}$  может быть постоянной по длине потока (случай равномерного движения): ( $h=const$  и  $v=const$ ).

### 10.2.2. График удельной энергии сечения. Критическая глубина и способы ее определения.

Переписав формулу удельной энергии сечения в виде:

$$\mathcal{E} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}, \quad (10.2)$$

поясняется зависимость удельной энергии сечения  $\mathcal{E}$  от глубины потока  $h$  при постоянных величинах  $Q, m, b$ . Исследуя выражение  $\mathcal{E}=f(h)$  необходимо задать предельные значения  $h$ :  $h \rightarrow 0$  и  $h \rightarrow \infty$  и показать, что при этих значениях величина  $\mathcal{E}$  стремится к бесконечности.

Таким образом, при некотором промежуточном значении  $h$  величина удельной энергии сечения будет иметь минимальное значение  $\mathcal{E}_{min}$ .

Для построения графика  $\mathcal{E}=f(h)$  необходимо отложить значения глубины  $h$  на оси ординат, а соответствующие им значения удельной энергии  $\mathcal{E}$  на оси абсцисс в одинаковом масштабе.

Кривая  $\mathcal{E}=f(h)$  будет иметь две асимптоты: биссектриса координатного угла и ось абсцисс (рис.10.5). Глубина потока, при которой удельная энергия сечения приобретает минимальное значение называется *критической* и обозначается  $h_k$ . Следует заметить что  $h_k$  определяется для данного сечения потока. Величина ее зависит только от расхода и формы поперечного сечения потока.

Значение критической глубины для русла любого поперечного сечения определяется из уравнения:

$$\frac{\omega^3}{B^2} = \frac{\alpha Q^3}{g}. \quad (10.3)$$

Критическая глубина в треугольном, прямоугольном и параболическом руслах определяется непосредственно из этого уравнения.

а) Прямоугольное русло: Формула для определения  $h_{кр}$  имеет вид:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} \quad (10.4)$$

Введя в рассмотрение удельный расход:

$$q = \frac{Q}{b}, \quad (10.5)$$

и приняв  $\alpha=1.1$  и  $g=9.81 м/с^2$  получим

$$h_{кр} = 0.482 q^{2/3}, \quad (10.6)$$

или при  $\alpha=1.0$  будем иметь:

$$h_{кр} = 0.467 q^{2/3}, \quad (10.7)$$

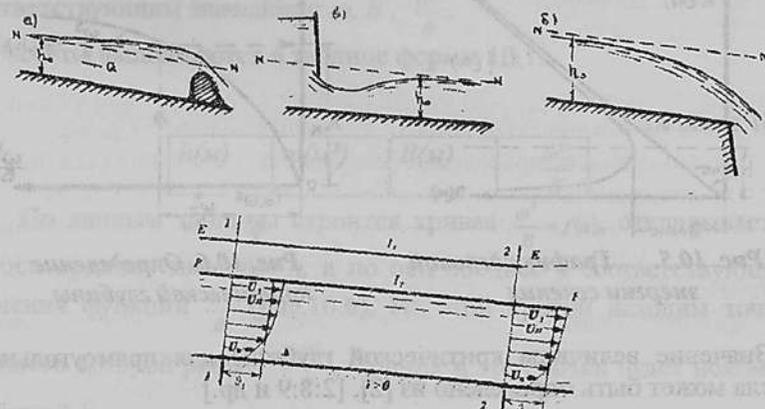


Рис. 10.1. Примеры равномерного движения в цилиндрическом канале с прямым уклоном ( $i>0$ )

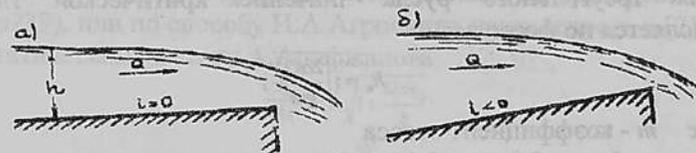


Рис. 10.2. Примеры неравномерного движения в цилиндрическом канале с горизонтальным дном и обратным уклоном

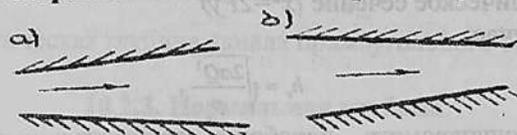


Рис. 10.3. Нецилиндрическое (непризматическое) русло

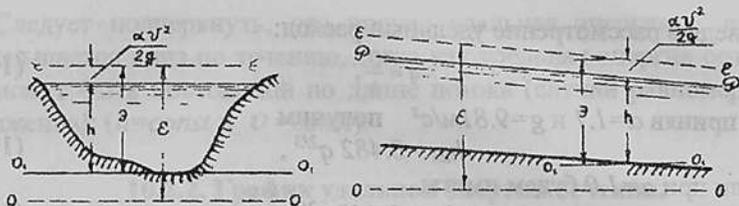


Рис. 10.4. К определению удельной энергии сечения Э

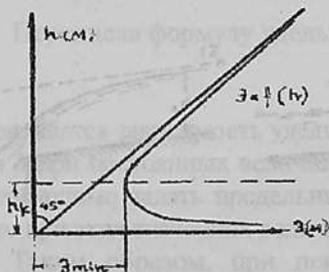


Рис. 10.5. График удельной энергии сечения

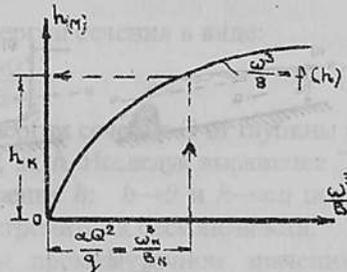


Рис. 10.6. Определение критической глубины

Значение величины критической глубины для прямоугольного русла может быть определено из [2], [2:8:9 и др.]

б) симметричное прямоугольное сечение.

Для треугольного русла значение критической глубины вычисляется по формуле:

$$h_k = \sqrt{\frac{2\alpha Q^2}{gm^2}}, \quad (10.8)$$

где  $m$  - коэффициент откоса

При  $m=1$  и  $\alpha=1.0$ ;  $g=9.81 \text{ м/с}^2$

$$h_k = 0.290 \sqrt[5]{Q^2}; \quad (10.9)$$

в) Параболическое сечение ( $x^2=2Py$ )

В этом случае:

$$h_k = \sqrt[4]{\frac{2\alpha Q^2}{P}}, \quad (10.10)$$

где  $p$  - полупараметр параболы, ограничивающей поперечное сечение.

При  $\alpha=1.0$  и  $g=9.81 \text{ м/с}^2$

$$h_k = 0,455 \sqrt[5]{\frac{Q^2}{P}}; \quad (10.11)$$

з) симметричное трапециевидальное сечение

В этом случае выражение для  $h_k$ , в явном виде получить не удастся, так как функция  $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$  имеет сложный вид.

Уравнение (10.3) решается графическим путем. Для этого задаются различные значения глубины и определяются по соответствующим значениям:  $\omega$ ,  $B$ ,  $\frac{\omega^3}{B}$ .

Расчеты выполняются в таблице формы 10.1.

Таблица 10.1

$h(\text{м})$	$\omega(\text{м}^2)$	$B(\text{м})$	$\frac{\omega^3}{B}$
---------------	----------------------	---------------	----------------------

По данным таблицы строится кривая  $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$ , откладывается по оси ординат значения  $h$ , а по оси абсцисс - соответствующие значения функции  $\frac{\omega^3}{B}$  (рис.10.6). На этой кривой находим точку, абсцисса которой равна  $\frac{\alpha Q^2}{g}$ . Ордината этой точки будет искомой глубиной  $h_k$ .

Значительно проще значение критической глубины может быть определено с помощью графика Л.А. Машковича, приведенного в [1], (стр.239), или по способу И.А.Агроскина приведенного в [2] или по аналитическому методу А.Арифжанова

$$\frac{b}{4M} \sqrt{1 + \frac{8mh_1}{b}}$$

$$M = \frac{m^2}{m'}$$

$$h_{k1} = (0,73 - 0,12 \ln \frac{mh_{k1}}{b_{\text{н}}}) \cdot h_{k1}$$

где  $h_1$  - критическая глубина канала прямоугольного сечения.

### 10.2.3. Нормальная глубина

Студентам следует напомнить, что глубина равномерного движения называется нормальной глубиной и в теории неравномерного

движения обозначается  $h_0$ , а также напомнить способы определения этой глубины.

#### 10.2.4. Критический уклон

Критический уклон  $i_k$ , такой уклон дна призматического русла, при котором при заданном расходе  $Q$  выполняется равенство  $h_0 = h_k$ .

Для определения значения критического уклона записываются формулы:

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k}, \quad (10.12)$$

или при определении коэффициента Шези по формуле Маннинга

$$i_k = \left| \frac{Q \cdot n}{\omega_k R_k^{3/2}} \right|^2, \quad (10.13)$$

$$i_k = \frac{g X_k}{\alpha C_k^2 B_k}, \quad (10.14)$$

где гидравлические элементы с индексом «к» вычисляются по соответствующим формулам при критической глубине  $h_k$ .

#### 10.2.5. Спокойное и бурное состояние потока

Поясняя этот вопрос, необходимо снова обратиться к графику удельной энергии сечения  $\mathcal{E} = f(h)$  (рис.10.5) и подчеркнуть что при одном и том же значении удельной энергии сечения поток может находиться в спокойном и бурном состоянии.

Результат сравнения глубины потока с глубиной  $h_k$ , является критерием для установления энергетического состояния потока.

Если  $h > h_k$  – состояние потока спокойное ( $\varepsilon_n > \varepsilon_k$ )

Если  $h < h_k$  – состояние потока бурное ( $\varepsilon_n < \varepsilon_k$ )

Критическое состояние потока будет при  $h = h_k$  ( $\varepsilon_n = \varepsilon_k$ )

Для суждения о степени кинетичности потоков, характеризующихся одним и тем же энергетическим состоянием имеются понятия: число Фруда  $F_r$  (отношение удвоенной кинетической энергии к глубине потока в данном сечении) и параметр кинетичности  $\Pi_k$  (отношение удвоенной кинетической энергии к глубине безнапорного потока).

$$F_r = \frac{v^2}{gh}, \quad (10.15)$$

$$\Pi_k = \frac{v^2}{g h_{cp}} = \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}, \quad (10.16)$$

где  $h$  – глубина потока в данном сечении;

$h_{cp}$  – средняя глубина потока в данном сечении.

Число Фруда  $F_r$  и параметр кинетически  $\Pi_k$  безразмерные величины. Для прямоугольного сечения русла  $F_r = \Pi_k$ . При бурном состоянии потока  $F_r > 1.0$  и  $\Pi_k > 1.0$ . При спокойном состоянии потока  $F_r < 1.0$  и  $\Pi_k \ll 1.0$ . Критическое состояние потока характеризуется равенством  $F_r = \Pi_k = 1.0$ .

#### 10.3. Группы и классы призматических водотоков.

##### Зоны течения. Формы кривых свободной поверхности

Следует подчеркнуть, что рассматриваются только призматические (цилиндрические) русла «правильной» формы.

При этом необходимо напомнить, что линии нормальных глубин  $N-N$  и критических глубин  $K-K$ , проводятся параллельно дну канала на расстоянии  $h_0$  и  $h_k$  от него.

Следует, подчеркнуть, что при нанесении линий  $N-N$  и  $K-K$  надо учитывать зависимость величины нормальной глубины от уклона дна: в руслах с уклоном дна  $i < i_k$ ,  $h_0 > h_k$  и линия  $N-N$  проходит выше линии  $K-K$ .

В руслах с уклоном дна  $i > i_k$ , линия  $N-N$  проходит ниже линии  $K-K$ . Линии  $N-N$  и  $K-K$  совпадают при уклоне дна  $i = i_k$ , т.к. в этом случае  $h_0 = h_k$ .

Необходимо также заметить, что в русле с горизонтальным дном ( $i=0$ ) и в русле с обратным уклоном дна ( $i < 0$ ) уравнение равномерного движения теряет физический смысл и в руслах с такими уклонами линия нормальных глубин  $N-N$  удаляется в бесконечность. В руслах с  $i=0$  и  $i < 0$  будет только линия критических глубин  $K-K$ . Линии  $N-N$  и  $K-K$ , делят продольный профиль канала на отдельные зоны течения ( $a, b, c$ ).

Зона «а» располагается выше линий  $N-N$  и  $K-K$ , зона «b» между линиями  $N-N$  и  $K-K$ , зона «с» - ниже этих линий.

В каждой из этих зон может располагаться только одна кривая свободной поверхности.

В потоке глубина по течению может увеличиваться, кривая свободной поверхности при этом называется кривой подпора, или уменьшаться, в этом случае формируется кривая спада.

Следует запомнить, что:

а) в зонах «а» и «с» формируются только кривые подпора, в зонах «b» - кривые спада;

б) к линиям нормальных глубин кривые свободной поверхности подходят асимптотически.

При переходе через линию К-К возникает разрыв в непрерывном и плавном изменении глубин. Поэтому к линиям критических глубин кривые подходят под углом  $90^\circ$ .

в) при безграничном возрастании глубин ( $h \rightarrow \infty$ ), кривые свободной поверхности асимптотически приближаются к горизонтальной линии.

В заключение следует рассмотреть несколько схем водотоков с различными заданными глубинами и показать возможные формы кривых свободной поверхности [Рис.10.6а].

#### 10.4. Расчет кривых свободной поверхности в призматических руслах

Для расчета кривых свободной поверхности должны быть известны:  $Q$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $i$ ,  $b$ ,  $a$  также глубина в начале участка  $h_1$ , или в конце  $h_2$  и общая длина участка  $L$ , на котором необходимо построить кривую свободной поверхности.

Рассмотрим расчет кривых свободной поверхности в призматических руслах способами Б.А.Бахметева и В.И.Чарномского.

Расчет кривых свободной поверхности состоит из двух частей:

1) установлены формы кривой свободной поверхности, подлежащей построению, на основе анализа дифференциальных уравнений плавно изменяющегося движения в призматическом русле, результаты которого приведены в [1] (стр. 244-250), при этом следует помнить сказанное в пункте 10.2. о формировании кривых свободной поверхности;

2) собственно расчет кривых свободной поверхности, заключающийся в задании глубин, в соответствии с установленной формой кривой и нахождении расстояния  $l$  между известной и задаваемой глубинами.

Следует помнить, что кривые свободной поверхности при спокойном состоянии потока рассчитываются вверх по течению и вниз по течению – при бурном состоянии потока.

Нумерация сечений производится всегда вниз по течению.

При подходе кривых свободной поверхности к линии нормальных глубин, следует считать равномерное движение потока при глубинах  $h = h_0 \pm (1 \div 2)$  см.

#### А. Способ Б.А.Бахметева.

Расстояние между соседними глубинами определяются по формулам:

а) при  $i > 0$  (положительный уклон)

$$l_{i-2} = \frac{h_0}{i} \{ \eta_2 - \eta_1 - (1-j) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \}, \quad (10.17)$$

где  $\varphi(\eta)$  – функция Б.А.Бахметева зависит от относительной глубины и гидравлического показателя русла  $x$  [1] (стр.573); (Таблица 7, приложение)

$$\zeta = \frac{h}{h_0} - \text{относительная глубина;}$$

$h_0$  – нормальная глубина

Среднее значение величины  $j$  определяется из формулы:

$$\bar{j} = \frac{\alpha \cdot i C^2 \cdot \bar{B}}{g \chi} = \frac{\alpha \cdot i \bar{R}^3 \bar{B}}{n^2 g \chi}, \quad (10.18)$$

где  $X, B, C, R$  – значения элементов, вычисляемых при средних глубине на рассматриваемом участке потока;

$h_{cp}$  – средняя глубина для зоны течения

$K_{cp} = \omega \cdot C_p \cdot \sqrt{R_{cp}}$  – модуль расхода;

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (10.19)$$

$\varphi(\zeta)$  – функция Б.А.Бахметева зависит от относительной глубины и гидравлического показателя русла  $x$  [1] (стр.573)

$$x = 2 \frac{\lg K_{cp} - \lg K_0}{\lg h_{cp} - \lg h_0}. \quad (10.20)$$

Гидравлический показатель русла может быть определен по формуле Р.Р.Чугаева для трапецеидального русла

$$x = 3,4 \left( 1 + \frac{m}{\frac{b}{h_{н0}} + m} \right) - 1,4 \frac{m'}{\frac{b}{h_{н0}} + m'} \quad (10.21)$$

$$m' = 2\sqrt{1+m^2} \quad (10.22)$$

Значение величины  $x$  можно так же определить по графику А.Н.Рахманова, зависимости  $x=f(\beta_{cp})$ , приведенному в [2], (стр. 110) или [7], (стр. 35).

Значения средней глубины  $h_{cp}$  следует определять в зависимости от формы кривой свободной поверхности, подлежащей расчету.

Кривая типа	+ a <sub>1</sub>	$h_{cp} = \frac{h_0 + h_\phi}{2}$
Кривая типа	- b <sub>1</sub>	$h_{cp} = \frac{h_0 + h_\phi}{2}$
Кривая типа	+ c <sub>1</sub>	$h_{cp} = \frac{h_\phi + h_k}{2}$
Кривая типа	+ c <sub>0</sub>	$h_{cp} = \frac{h_\phi + h_k}{2}$
Кривая типа	+ c <sup>l</sup>	$h_{cp} = \frac{h_\phi + h_k}{2}$

где  $h_\phi$  – фиксированная (заданная) глубина потока.

б) при  $i=0$  – (горизонтальный участок канала)

$$i_{1-2} = \frac{h_0}{i_k} (\bar{j}_k - 1) (\xi_2 - \xi_1) - [\varphi(\xi_2) - \varphi(\xi_1)] \quad (10.23)$$

где:  $h_k$  – критическая глубина;  $i_k$  – критический уклон;

$$\xi = \frac{h}{h_k} \text{ – относительная глубина; } \bar{j}_k = \frac{\alpha \cdot i_k \cdot \bar{c}^2 \cdot \bar{B}}{gX} \quad (10.24)$$

$\varphi(\xi)$  – функция Бахметева зависит от  $\xi$  и гидравлического показателя русла [1] (стр. 576).

$$x = 2 \frac{\lg K_{\omega} - \lg K_d}{\lg h_{\omega} - \lg h_d} \quad (10.25)$$

$$K_k = \frac{Q}{\sqrt{i_k}} \quad (10.26)$$

При значениях аргумента, лежащих в пределах  $0 < \xi \leq 1.3$  значение гидравлического показателя русла можно принимать  $x=4.0$

т.к его влияние на величину  $\varphi(\xi)$  незначительно в указанных пределах  $\varphi$ .

в) при  $i < 0$  (обратный уклон)

$$i_{1-2} = \frac{h_0}{i_k} \left\{ (\xi_2 - \xi_1) + (1 + \bar{j}_k) [\varphi(\xi_2) - \varphi(\xi_1)] \right\} \quad (10.27)$$

где  $h_0$  – глубина фиктивного равномерного потока,  $i^l$  – абсолютная величина уклона дна.

$$\bar{j} = \frac{\alpha \cdot i^l \cdot \bar{c}^2 \cdot \bar{B}}{gX} \quad (10.28)$$

$$x = 2 \frac{\lg K_{\omega} - \lg K_d}{\lg h_{\omega} - \lg h_d} \quad (10.29)$$

где:  $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}$  (10.30)

При изменении аргумента  $\xi$  в пределах  $0 < \xi \leq 0.6$  гидравлический показатель русла можно принять  $x=4.0$  т.к в указанных пределах значения  $\xi$  влияние  $x$  на величину  $\varphi(\xi)$  незначительно.

### Пример 10.1

Трапецеидальный канал длиной  $L=130\text{м}$ ,  $b=8.0\text{м}$ ;  $m=1.0$ ;  $n=0.015$ ;  $i=10i_k$  пропускает расход  $Q=30\text{м}^3/\text{с}$ . В начале канала устанавливается глубина  $h_1=1.0\text{м}$ . Требуется установить тип кривой свободной поверхности и рассчитать эту кривую по способу Б.А.Бахметева.

### Решение:

Поскольку уклон дна канала задан в зависимости от  $i_k$ , то порядок расчета будет следующий:

1. Определяем критическую глубину  $h_k$  по одним из способов, указанных в пункте 10.2.2.  $h_k=1.08\text{м}$ .
2. Вычисляем критический уклон по формуле:

$$i_k = \left| \frac{Q \cdot n}{\omega_k R_k^{2/3}} \right|^2$$

где:  $\omega_k = h_k(b_1 + mh_k) = 1.08(8.0 + 1.0 \cdot 1.08) = 9.8\text{ м}^2$

$$\chi_k = b + 2m h_k = 8.0 + 2 \cdot 1.08 \cdot 1.08 = 11.04\text{ м}$$

$$R_k = \frac{\omega_k}{\chi_k} = \frac{9.8}{11.04} = 0.887\text{ м}$$

$$i_k = \left| \frac{30 - 0,015}{9,8 \cdot 0,887^2} \right|^2 = 0,00248$$

3. Уклон дна канала будет:

$$i = 10i_k = 10 \cdot 0,00248 = 0,0248$$

4. Определяем нормальную глубину по одним из способов, указанных в пункте 9.1.

$$\beta = 16,0; \quad h_0 = \frac{b}{\beta} = \frac{8,0}{16,0} = 0,5 \text{ м}$$

5. Устанавливаем к какой группе и классу относится рассматриваемый канал. Так как  $i > i_k$  и  $h_0 < h_k$ , то канал относится к водотокам второго класса, группы А.

6. Наносим на профиль канала линии нормальных глубин  $N-N$  и критических глубин  $K-K$ .

7. Устанавливаем форму кривой свободной поверхности, формирующейся в канале. Заданная глубина  $h_1 = 1,0$  м меньше критической  $h_k = 1,08$  м, но больше  $h_0 = 0,5$  м. В канале будет формироваться кривая свободной поверхности типа  $-b_2$ , в зоне течения «б».

Вычисляем среднюю глубину:

$$h_x = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{0,5 + 1,0}{2} = 0,75 \text{ м}$$

Из графика ([2], рис.9-15 стр.110) определяем значение гидравлического показателя русла  $x = 3,30$

9. Имея начальную глубину на участке  $h_1 = 1,0$  м, задаем последующие уменьшающиеся глубины, вычисляем расстояния  $\ell$ , как указано в пункте 10.3

Вычисления сводим в таблицу формы 10.2

Расчет кривой свободной поверхности типа  $-b$  по способу Б.А.Бахметева

Таблица 10.2

$h_1$ (м)	$h_2$ (м)	$h$ (м)	$\omega$ (м <sup>2</sup> )	$\chi$ (м)	$R$ (м)	$C$ (м <sup>0,5</sup> /с)	$B$ (м)	$j$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\varphi(\eta)$
1.0	0.80	0.90	7.90	10.54	0.75	68.10	9.80	10.80	2.00	1.60	0.092
0.80	0.70	0.75	6.55	10.10	0.65	66.50	9.50	10.50	1.60	1.40	0.164
0.70	0.60	0.65	5.61	9.83	0.56	64.80	9.35	10.10	1.40	1.20	0.237

0.60	0.52	0.56	4.80	9.58	0.50	63.6	9.12	9.75	1.20	1.04	0.389
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

Продолжение таблицы 10.2

$\varphi(\eta_2)$	$\ell$ (м)
0.164	6.25
0.237	9.90
0.389	23.80
0.826	81.10

$$\sum \ell = 121,05 \text{ м}$$

По данным таблицы строим кривую свободной поверхности как показано на рис 10.7.

**Б. Способ В.И.Чарномского.**

Способом В.И.Чарномского кривые свободной поверхности можно рассчитывать в призматическом и непризматическом каналах.

При этом используются расчетные зависимости следующего вида:

Русло с прямым уклоном дна ( $i > 0$ )

$$l = -\frac{\Delta \mathcal{E}}{i - J_c} \quad (10.31)$$

Горизонтальное русло  $i = 0$

$$l = -\frac{\Delta \mathcal{E}}{J_c} \quad (10.32)$$

Русло с обратным уклоном дна ( $i < 0$ )

$$l = -\frac{\Delta \mathcal{E}}{i + J_c} \quad (10.33)$$

где  $\ell$  — длина участка потока, ограниченного известной и заданной глубинами  $h_1$  и  $h_2$ ;

$\Delta \mathcal{E}: \mathcal{E}_{n+1} - \mathcal{E}_n$  — изменение удельной энергии сечения на расстоянии  $\ell$

$$\mathcal{E} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}$$

$i$  — уклон, дна канала; (10.34)

$J_c$  — среднее постоянное значение гидравлического уклона, определяемое по формуле

или

$$J_e = \frac{v^2 \cdot C^2}{2^{4/3}}$$

где  $\overline{v, C, R}$  — гидравлические элементы определяемые при среднем значении глубины  $h$

$$\overline{h} = \frac{h_n + h_{n+1}}{2} \quad (10.35)$$

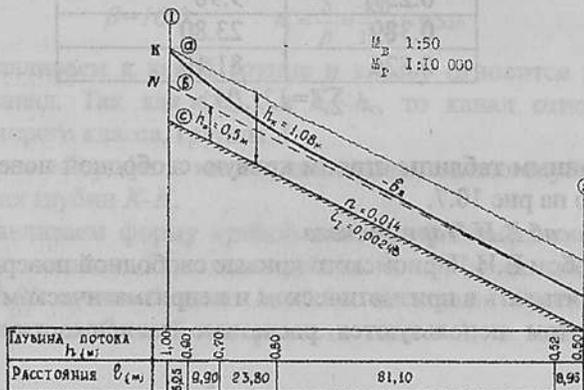


Рис. 10.7. Построение кривой свободной поверхности по способу Б.А.Бахметева

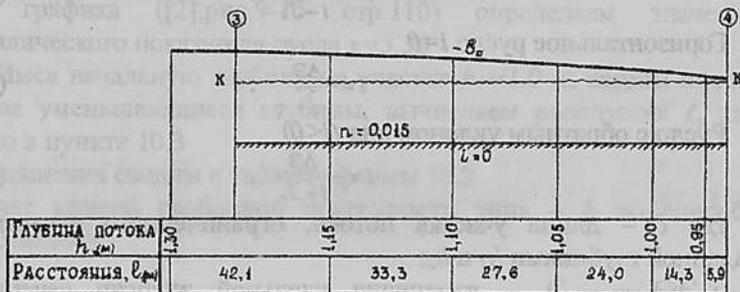


Рис. 10.8. Построение кривой свободной поверхности по способу В.И.Чарномского

При построении кривой свободной поверхности в непризматическом русле канал разбиваем на отдельные расчетные участки длиной  $l$  и нумеруем их вниз по течению.

Каждый такой участок рассматриваем отдельно. Если известна глубина в начальном сечении канала  $h_1$  расчет начинаем с первого расчетного участка и определяем глубину в конечном его сечении  $h_2$  подбором:

Задаем ряд значений глубин  $h_2$  в этом сечении и для каждой глубины вычисляем  $\Delta_2$ ,  $J_e$ ,  $J_c$ , затем  $\Delta\Delta$ .

Отыскиваем такую глубину, при которой выполняется равенство длины расчетного участка  $l$  с длиной, вычисленной по формулам (10.31), (10.32) или (10.33). Это решение можно выполнить путем построения графика  $l=f(h)$ . Определив таким путем глубину в конце первого участка переходим ко второму, при этом определенная  $h_2$  для первого участка, будет  $h_1$  для второго. Расчет повторяется для всех намеченных расчетных участков.

Если известна глубина в конечном сечении канала  $h_2$ , расчет начинаем с последнего участка и определяем глубины в начале каждого расчетного участка также, как определяли глубины в конечном сечении.

По полученным в результате расчета глубинам и расстояниям между ними строим в масштабе кривую свободной поверхности.

Пояснения к расчету кривой свободной поверхности в призматическом русле по способу В.И.Чарномского приведены в примере 10.2.

### Пример 10.2

Призматический трапецеидальный канал длиной  $L=130$  м,  $b=12$  м,  $m=1.5$ ,  $n=0.015$ ,  $i=0$  пропускает расход  $Q=30$  м<sup>3</sup>/с.

В конце канала устанавливается глубина  $h_2=0.9$  м. Требуется установить тип кривой свободной поверхности и рассчитать эту кривую по способу В.И.Чарномского.

**Решение:**

1. Определяем критическую глубину для канала.

$$\text{Находим: } q = \frac{30,0}{12,0} = 2,5 \text{ м}^3 / \text{с} / \text{м}; \quad h_{кр} = 0,861 \text{ м}$$

$$\sigma_n = \frac{1,5 \cdot 0,861}{12,0} = 0,108; \quad K = 0,966$$

$$h_k = 0,966 \cdot 0,861 = 0,833 \text{ м}$$

2. Устанавливаем тип кривой свободной поверхности, подлежащей расчету. Заданная глубина  $h_2=0.9\text{ м}$  больше критической, кривая свободной поверхности будет формироваться в зоне  $b$ : тип кривой –  $b_0$ .

3. Расчет кривой свободной поверхности. Задаем ряд увеличивающихся глубин вверх по течению и вычисляем расстояние  $\ell$  (в случае горизонтального дна  $i=0$ )  $\ell$  вычисляем по формуле (10.32) между известной и заданной глубинами. Вычисления сводим в таблицу составленную по форме 10.3.

Расчет кривой свободной поверхности по способу В.И. Чарномского.

Таблица 10.3

$h(\text{м})$	$\omega(\text{м}^2)$	$\chi(\text{м})$	$R(\text{м})$	$R^{4/3}$	$v$ (м/с)	$v^2/2g$ (м/с)	$Je$	$Je$	$\mathcal{E}(\text{м})$	$\Delta\mathcal{E}(\text{м})$	$\ell(\text{м})$
0.90	12.02	15.25	0.79	0.73	2.50	0.32	0.0019	0.0017	1.22	-0,01	5,9
0.95	12.76	15.43	0.83	0.78	2.35	0.28	0.0015	0.00145	1.23	-0,02	14,3
1.00	13.50	15.61	0.86	0.80	2.22	0.25	0.0014	0.00125	1.25	-0,025	24,0
1.05	14.25	15.79	0.96	0.88	2.10	0.23	0.0011	0.00105	1.275	-0,029	27,6
1.10	15.01	15.97	0.94	0.92	2.00	0.20	0.0010	0.0009	1.304	-0,03	33,3
1.15	15.78	16.15	0.98	0.98	1.90	0.18	0.00083	0.00078	1.334	-0,033	42,1
1.20	16.56	16.33	1.01	1.00	1.81	0.17	0.00074		1.367		

$$\sum \ell = 147.2 \text{ м}$$

По данным таблицы строим кривую свободной поверхности как показано на рис.10.8.

Глубина в начале участка  $h_1=1.18\text{ м}$  определена графически.

## 11. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

### 11.1. Гидравлический прыжок и его элементы

Гидравлическим прыжком называется резкое увеличение глубины потока от глубины  $h'$ , меньшей  $h_k$ , до глубины  $h''$  большей  $h_k$  (рис.11.1). Глубины  $h'$  и  $h''$ , измеряемые перед гидравлическим прыжком и за ним называются сопряженными глубинами.

$a = h'' - h'$  – высота гидравлического прыжка;

$\ell_n$  – длина гидравлического прыжка;

$\ell_{nn}$  – длина послепрыжкового участка.

Гидравлический прыжок возникает при переходе потока из бурного состояния в спокойное.

В гидравлическом прыжке учитываются только местные потери напора.

Поясняя характер движения воды в пределах гидравлического прыжка следует обратить внимание студентов на интенсивную турбулентность потока и его повышенную размывающую способность.

### 11.2. Уравнение гидравлического прыжка.

#### Прыжковая функция и ее график

Для прямоугольного цилиндрического русла с небольшим уклоном дна основное уравнение совершенного гидравлического прыжка имеет вид:

$$\frac{Q^2}{g\omega_1} + \omega_1 y_1 = \frac{Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 y_2, \quad (11.1)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – площади живого сечения перед гидравлическим прыжком и за ним

Для прямоугольного русла  $y = \frac{h}{2}$ ,  $y_1, y_2$  – глубины центра тяжести живого сечения (рис.11.2).

Для трапецидальных русел

$$y = \frac{h}{6} \cdot \frac{(3b + 2mh)}{b + mh} \quad (11.2)$$

Из уравнения гидравлического прыжка видно, что левая его часть является функцией только  $h'$ , а правая — такой же функцией  $h''$ . Выражение

$$\frac{Q}{g\omega} + y\omega = \Pi(h), \quad (11.3)$$

и  $\Pi(h)$  называется прыжковой функцией  $\dim \Pi(h) = L^3(M^3)$ .

Основное уравнение гидравлического прыжка можно записать в виде:

$$\Pi(h') = \Pi(h''). \quad (11.4)$$

Таким образом, для сопряженных глубин  $h'$  и  $h''$  прыжковая функция имеет одну и ту же величину. Напомнив кратко анализ выражения прыжковой функции (11.3) следует показать график прыжковой функции (рис.11.3) и отметить, что минимальное значение прыжковой функции будет при критической глубине  $h_k$ .

### 11.3. Определение сопряженных глубин в призматических руслах

Для определения одной из сопряженных глубин должны быть заданы расход, форма и размеры поперечного сечения канала, а также известна другая сопряженная глубина.

#### 1. Прямоугольное сечение.

Сопряженные глубины определяются по формулам:

$$h' = \frac{h''}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_k}{h''} \right)^3} - 1 \right], \quad (11.5)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_k}{h'} \right)^3} - 1 \right]. \quad (11.6)$$

#### 2. Трапецидальное сечение

Сопряженные глубины можно определить следующими способами.

##### а) по графику прыжковой функции.

Для построения графика прыжковой функции задаем значения глубин (больше и меньше  $h_k$ ) и вычисляем величины  $\Pi(h)$ , отвечающие этим глубинам. Расчет выполняется в таблице формы 11.1

Таблица 11.1

$h(m)$	$\omega(m^2)$	$y(m)$	$\omega y$	$\Pi(h)(m^3)$
--------	---------------	--------	------------	---------------

По данным таблицы строим график  $\Pi(h)$  и из графика  $\Pi(h)$  по известной  $h'$  находим  $h''$  или по известной  $h''$  находим  $h'$  (рис.11.3)

б) По графику А.Н.Рахманова (график № 4) Для этого определяется критическая глубина  $h_k$ , затем вычисляются относительная глубина  $\zeta = h'/h_k$  ( $h'$  заданная сопряженная глубина)

и  $\frac{mh_k}{b}$ . Из графика определяется  $\zeta$  и  $h'' = \zeta^{21} h_k$ .

в) по графику Л.А.Машковича ([8] рис.14).

пояснение расчета сопряженных глубин приведено на графике.

з) По приближенным формулам А.Н.Рахманова.

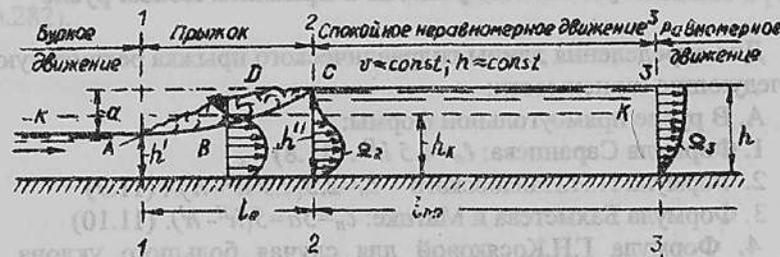


Рис. 11.1. Гидравлический прыжок и послепрыжковый участок

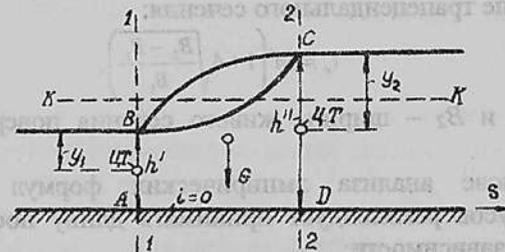


Рис. 11.2. Схема гидравлического прыжка

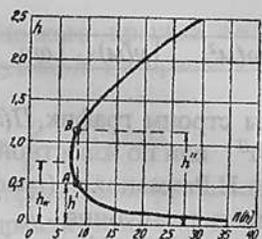


Рис. 11.3. График прыжковой функций  $\Pi(h)$

$$\zeta' = \frac{12}{\zeta''} - 0,2 ; \quad \zeta'' = \frac{1}{0,167 - 0,834\zeta'} \quad (11.7)$$

#### 11.4. Определение длины гидравлического прыжка и послепрыжкового участка в призматическом русле

Для определения длины гидравлического прыжка рекомендуются следующие зависимости:

А. В русле прямоугольной формы:

1. Формула Саранцева:  $\ell_n = 4,5 h''$  . (11.8)

2. Формула Н.Н.Павловского  $\ell_n = 2,5(1,9 h'' - h')$  . (11.9)

3. Формула Бахметева и Матцке:  $\ell_n = 5a = 5(h'' - h')$  . (11.10)

4. Формула Г.Н.Косяковой для случая большого уклона дна русла

$$C_3 \geq (i > i_k) \quad \ell_n = \ell_n(1 + 3i)$$

Б. В русле трапецидального сечения:

$$\ell_n = 5h'' \left( 1 + 4 \sqrt{\frac{B_2 - B_1}{B_1}} \right), \quad (11.11)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – ширина живого сечения поверху до и после прыжка.

На основе анализа эмпирических формул ряда авторов М.Д.Чертоусов рекомендует принимать длину после прыжкового участка по зависимости:

$$\ell_{mn} = (13 \div 15,6) h_n, \quad (11.12)$$

где  $h_n$  – глубина в нижнем бьефе.

#### 11.5. Определение потери энергии в гидравлическом прыжке

В случае русла с горизонтальным дном ( $i=0$ ) потеря удельной энергии в гидравлическом прыжке определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_n = \left( h' + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left( h'' + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \right). \quad (11.13)$$

В русле прямоугольной формы поперечного сечения выражение для определения потери энергии в прыжке имеет вид:

$$\mathcal{E}_n = \frac{a^3}{4h'h''}. \quad (11.14)$$

Потери энергии в гидравлическом прыжке могут быть определены и графоаналитическим способом путем построения совмещенных графиков кривых  $\mathcal{E}=f(h)$  и  $\Pi(h)$ , как это показано в [1] (стр.282).

## 12. ВОДОСЛИВЫ

### 12.1. Терминология и классификация водосливов

Водосливом называется явление перетекания жидкости через какие-либо препятствия (пороги, сужения и т.д.).

Рассматриваются водосливы, у которых водосливное отверстие прямоугольной формы (кроме расходомерных), с прямолинейным в плане гребнем и прямым (лобовым) подходом потока (рис 12.1). При расчете водосливов учитываются только местные потери напора.

Классификация водосливов дается только в зависимости от формы и размеров поперечного сечения порога водослива (водосливной стенки). При этом в зависимости от отношения  $\delta/H$  будут:

- водосливы с тонкой стенкой  $\delta \leq (0.1 + 0.5)H$ ;
- водосливы практического профиля, когда толщина порога водослива находится в пределах  $0.5 < \delta < 2H$ ;
- водосливы с широким порогом  $2H < \delta < 8H$ .

У этих водосливов, в общем случае, гребень порога представляет собой горизонтальную плоскость.

### 12.2. Основная расчетная формула для прямоугольного водослива

Основная расчетная формула для прямоугольного водослива имеет вид:

$$Q = mb \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (12.1)$$

где  $m$  — коэффициент расхода, зависит от размеров и формы порога водослива.

Следует подчеркнуть, что на пропускную способность водослива влияет 4 основных фактора;

- размеры и форма водосливной стенки;
- величина скорости подхода;
- наличие и степень бокового сжатия потока;
- наличие и степень подтопления водослива.

### 12.3. Расчетные формулы для водослива с широким порогом

Вид расчетной формулы для водослива с широким порогом зависит от вида истечения:

а) Не подтопленный водослив со свободным истечением (рис.12.2);

б) подтопленный водослив (рис.12.3);

Критерий подтопления водослива с широким порогом следует принимать по рекомендации Р.Р.Чугаева:

Если  $h_n \leq nH_0$  водослив неподтоплен;

Если  $h_n > nH_0$  водослив подтоплен;

где:  $n = 0,75 - 0,85$ ;  $h_n = h_n - C_n$  высота подтопления;

В случае свободного истечения расход воды определяется по формуле:

$$Q = mb \varepsilon \sqrt{2g} H_0^{3/2}. \quad (12.2)$$

В случае подтопленного истечения расчет водослива выполняется по формуле:

$$Q = \varphi_n b h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)}, \quad (12.3)$$

где:  $\varepsilon$  — коэффициент бокового сжатия;

$m$  — коэффициент расхода;  $b$  — ширина водосливного отверстия;

$H_0$  — расчетный напор на водосливе;

$\varphi_n$  — коэффициент скорости;

$h_1$  — глубина воды на пороге водослива.

### 12.4. Учет факторов, влияющих на пропускную способность водослива с широким порогом

#### А. Учет размеров и формы водосливной стенки.

Определение значения  $m$ .

Величина коэффициента расхода  $m$ , определяется по данным Д.И.Кумина из [1] (стр. 366). Таблицы 11-1 и 11-2.

Отметим, что величина  $m$  в случае свободного и подтопленного истечения определяется одинаково.

#### Б. Учет величины скорости подхода. Определение величины $H_0$ .

Скоростью подхода можно пренебречь, если  $\Omega_{вс} > 4B \cdot H$ ,

где  $\Omega b \delta$  – площадь живого сечения верхнего бьефа,  $V = \sum V$  – ширина водосливного фронта,  $H$  – геометрический напор на водосливе

По предположению Киселева П.Г. скоростью подхода можно пренебречь, если:

$$v_0 \leq 0,361\sqrt{H}. \quad (12.4)$$

В случаях, когда скоростью подхода можно пренебречь, расчетный напор на пороге водослива равен геометрическому  $H_0 = H$ .

В случаях, когда скорость подхода больше указанных выше пределов, расчетный напор определяется как:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (12.5)$$

При этом значение скорости подхода вычисляется по зависимости:

$$v_0 = \frac{Q}{\Omega_{вс}}. \quad (12.6)$$

### В. Учет наличия бокового сжатия. Определение величины $\varepsilon$ .

Влияние бокового сжатия учитывается введением в расчетную формулу водослива коэффициента бокового сжатия  $\varepsilon$ , определяемого по формуле Френсиса-Кригера:

$$\varepsilon = 1 - 0,2 \left[ \zeta_y + \frac{(n-1)\zeta_b}{n} \right] \frac{H_0}{b}, \quad (12.7)$$

где  $\zeta_y, \zeta_b$  – коэффициенты уменьшения учитывающие форму устоев и быков в плане

Значения этих коэффициентов приведены в [1] (рис.12.4, 12.5).

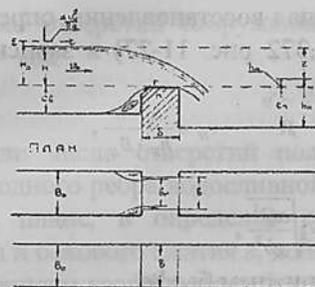
$n$  – число отверстий сооружения.

Учет бокового сжатия может быть выполнен следующим образом:

$$b_p = \sum b - \sum a \quad (12.8)$$

где  $\sum a$  – суммарная величина отжимов у быков и устоев.

У устоев:  $a_y = 0,2\zeta_y H_0. \quad (12.9)$



- ОБОЗНАЧЕНИЯ:  
 П – порог водослива;  
 Г – гребень порога;  
 Н – геометрический напор на водосливе;  
 H\_0 – расчетный напор;  
 h\_n – высота порога в верхнем и нижнем бьефах;  
 δ – толщина порога водослива;  
 b – ширина водослива (водосливного отверстия);  
 a – ширина устья, в котором устроен водослив;  
 v\_0 – скорость подхода;  
 ζ – расчетная ширина водослива на водосливе;  
 z – геометрический перепад на водосливе;  
 h\_n – высота подтопления.

Рис. 12.1. Схема водослива

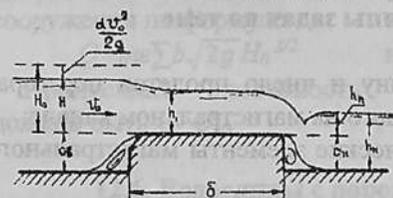


Рис. 12.2. Неподтопленный водослив с широким порогом

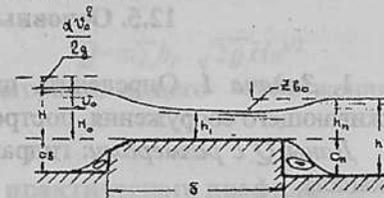


Рис. 12.3. Подтопленный водослив с широким порогом

У быков:

$$a_b = 0,2(n-1)\zeta_b H_0. \quad (12.10)$$

Тогда расход определяется по формуле:

$$Q = m b_p \sqrt{2g H_0}, \quad (12.11)$$

где

$$b_p = b - \sum (a_\delta + a_y). \quad (12.12)$$

### Г. Учет наличия и степени подтопления.

Определение величины  $\varphi_n$ .

Величина  $\varphi_n$  зависит от значения  $\varepsilon \cdot t$  и берется в соответствии с данными Д.И.Кумина [1]

$\varepsilon \cdot t$ .....	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38
$\varphi_n$ .....	0.77	0.84	0.90	0.96	0.99

Глубина на пороге водослива  $h_1$  определяется по формуле:

$$h_1 = h_H - C_H + Z_{bc} = h_n + Z_{bc}, \quad (12.13)$$

где:  $h_H$  – глубина воды в нижнем бьефе;

$C_H$  – высота порога в нижнем бьефе;

$h_n$  – высота подтопления;

$Z_{bc}$  — относительный перепад восстановления, определяемый по графику Р.Р.Чугаева ([1] стр.372 рис. 11-27) в зависимости от величин:

$$\zeta = \frac{h_n}{h_n} \quad \text{и} \quad v_n = \frac{h_n \cdot b}{h_n \cdot B_n}, \quad (12.14)$$

Здесь

$$h_n = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}, \quad (12.15)$$

$B_n$  — ширина потока в нижнем бьефе.

### 12.5. Основные типы задач по теме

1. **Задача 1.** Определить ширину и число пролетов перегораживающего сооружения, построенного на магистральном канале:

Даны  $Q$  с размерами: гидравлические элементы магистрального канала.

**Решение:** Состоит в определении ширины и числа пролетов перегораживающего сооружения, построенного на магистральном канале.

2. Входная часть перегораживающего сооружения осуществляется по схеме водослива с широким порогом.

3. В магистральном канале (МК) перед и за сооружением равномерное движение с глубиной  $h_0$ . Геометрический напор на пороге водослива  $H = h_0 - C_0$ .

4. За сооружением быстроток-перепад. Вид истечения устанавливается путем сравнения высоты перепада  $P$  и  $h_0$ .

5. Выясняется необходимость учета скорости подхода  $v_0 = Q/\Omega_{МК}$  как указано в пункте 12.4 и определяется расчетный напор  $H_0$ . Здесь  $\Omega_{МК} = h_0(b_{МК} + mh_0)$  — площадь живого сечения верхнего бьефа.

6. Коэффициент расхода  $m$  первоначально принимается для прямоугольной формы входного ребра водосливной стенки.

7. Выполняется учет бокового сжатия потока, как указано в пункте 12.4. Ширина отверстия « $e$ » определяется из заданного отношения  $b/H$  и округляется до стандартного значения.

8. Вычисляется расход одного отверстия  $Q_1$  по формуле (12.2) или (12.11).

9. Число отверстий сооружения в первом приближении определяется как

$$n' = \frac{Q_{МК}}{Q}$$

10. Если число отверстий получится не целым, то, изменяя форму входного ребра водосливной стенки, а также форму быков и устоев в плане, и определив соответствующие коэффициенты расхода  $m$  и бокового сжатия  $\varepsilon$ , добиваемся целого числа отверстий.

11. Уточняем коэффициент бокового сжатия или сумму отжимов  $\sum a$  для всего сооружения и определяем пропускную способность сооружения по формуле:

$$Q = m \varepsilon \sum b \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad \text{или} \quad Q = m \sum b_p \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

Пропускная способность перегораживающего сооружения должна быть  $Q \geq Q_{МК}$

### 12.6. Водосливы с порогом практического профиля

Водосливы практического профиля делятся на две основные группы:

1 группа — водосливы со стенкой криволинейного очертания (рис.12.6): безвакуумные и вакуумные;

2 группа — полигонального очертания: с порогом прямоугольного, трапецидального, треугольного очертания и с округленным входным ребром (рис.12.7) и др.

Толщина стенки водослива  $\delta$  лежит в пределах:

$$0.5 H < \delta < 2H$$

Расчетная формула:

$$Q = \sigma_n m \varepsilon b \sqrt{2g} H_0^2, \quad (12.16)$$

где  $\sigma_n$  — коэффициент подтопления водослива нижним бьефом;  $m, \varepsilon, b, H_0$  — означает тоже, что и в водосливах с широким порогом.

#### 12.6.1. Учет факторов, влияющих на пропускную способность водосливов практического профиля

##### А. Учет размеров и формы порога водослива.

Для криволинейного безвакуумного водослива со стенкой нормального очертания (Кригера - Офицера) (рис.12.6) коэффициент расхода  $m$  определяется по данным, приведенным в [1] (стр.382).

Для водослива с порогом прямоугольного профиля коэффициент расхода определяется по зависимости:

$$\text{При } H/\delta = 2 \div 0.5, \quad m \approx 0.42(0.70 + 0.185 H/\delta) \quad (12.17)$$

Для низких водосливов с порогом трапецеидального профиля (рис.12.7.6) коэффициент расхода рекомендуется определять по формуле:

$$m = \frac{\delta}{B \cdot \frac{\delta}{H} - c}, \quad (12.18)$$

где:  $B$  и  $C$  параметры, зависящие от котангенса угла наклона верхней грани к горизонту  $S$

$S$	1	2	3	5	10
$B$	2.9	2.81	2.79	2.77	2.72
$C$	0.27	0.21	0.20	0.17	0.09

Для водосливной стенки с закругленным ребром (рис.12.7 г) при определении коэффициента расхода  $m_r$  - вводится корректив  $\delta_\phi = 1 + \frac{r}{H}$  в формулу (12.17) тогда

$$m_r = m \sigma_\phi, \quad (12.19)$$

где  $r/H$  - отношение радиуса закругления входного ребра порога к напору.

#### Б. Учет влияния наличия и степени подтопления водослива.

Определение  $\sigma_n$ .

Условие подтопления водослива выясняется в следующем порядке.

Сравнивается глубина воды в нижнем бьефе с высотой порога в нижнем бьефе: если  $h_n \leq C_n$  водослив не подтоплен и коэффициент подтопления  $\sigma_n = 1.0$ .

Если  $h_n > C_n$  могут быть два случая:

а) при  $\frac{Z}{C_n} > \left(\frac{Z}{C_n}\right)_k$  водослив не подтоплен.  $\sigma_n = 1.0$

б) при  $\frac{Z}{C_n} < \left(\frac{Z}{C_n}\right)_k$  водослив подтоплен.  $\sigma_n < 1.0$

где  $Z$  - геометрический период на водосливе  $Z = \sqrt{g} \sqrt{B \delta} - \sqrt{g} \sqrt{H \delta}$

$\left(\frac{Z}{C_n}\right)_k$  - критическое значение относительного перепада.

Величина его определяется из [1] (по графику на рис. 12-13 стр. 406).

Значение коэффициента подтопления  $\sigma_n$  определяется в зависимости от отношения  $h_n/H$  из [1].

Учет скорости подхода и бокового сжатия выполняется по тем же зависимостям, что и в случае водослива с широким порогом.

### 12.7. Основные указания по выполнению задачи

**Задача 2.** Определить пропускную способность водослива практического профиля.

1. В задаче рассматривается головной канал водовыпуска распределителя  $P-1$  (рис. 12.9) работающий по схеме водослива практического профиля, т.к. по условию задания  $0.5H < \delta < 2$ .

Требуется определить его пропускную способность.

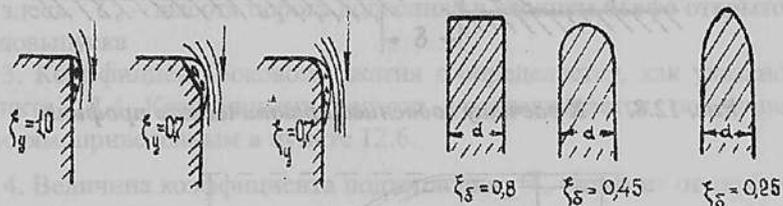


Рис. 12.4. Форма устоев в плане и коэффициенты уменьшения

Рис. 12.5. Форма быков в плане и коэффициенты уменьшения

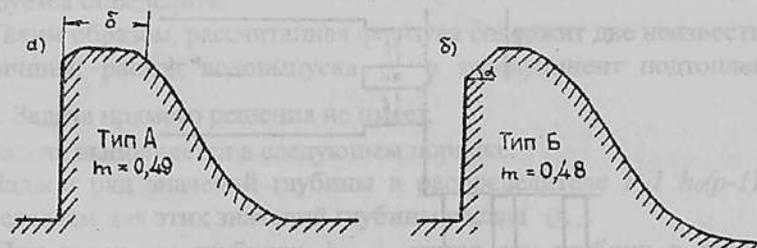


Рис. 12.6. Водосливы практического профиля криволинейного очертания

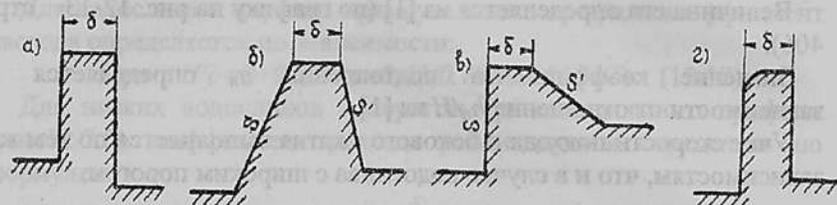


Рис. 12.7. Водосливы практического профиля

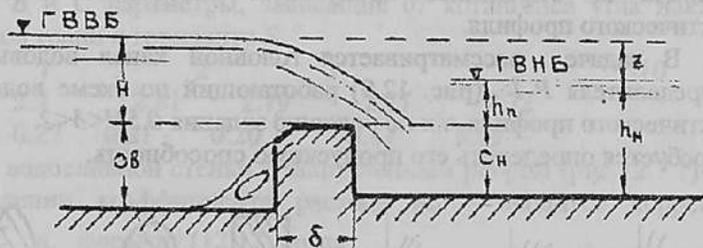


Рис. 12.8. К расчёту водослива практического профиля

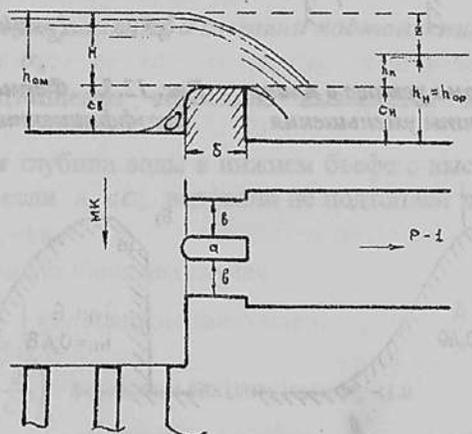


Рис. 12.9. Схема открытого водовыпуска

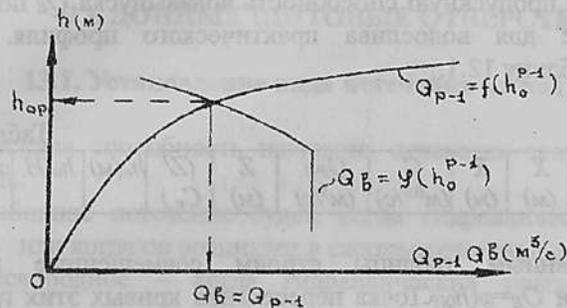


Рис. 12.10. к задаче № 2

1. Расчетная формула:  $Q = \sigma_n \text{mnb} \sqrt{2gH_0^{3/2}}$
2. Величина расчетного напора принимается равной геометрическому, т.к. подход потока к сооружению боковой  $H_0 = H = h_0 - C_B$ .  
здесь  $C_B$  – высота порога водослива в верхнем бьефе открытого водовыпуска
3. Коэффициент бокового сжатия  $\epsilon$  определяется, как указано в пункте 12.4 Коэффициент расхода устанавливается по зависимостям, приведенным в пункте 12.6.

4. Величина коэффициента подтопления  $\sigma_n$  зависит от глубины в нижнем бьефе  $h_n$ . Эта глубина по условию задачи равна глубине равномерного движения воды в распределителе  $P-1$   $h_{0(p-1)}$ , но она неизвестна, т.к. неизвестен расход распределителя  $P-1$   $Q_{P-1}$ , его требуется определить.

Таким образом, рассчитанная формула содержит две неизвестные величины: расход водовыпуска  $Q_n$  и коэффициент подтопления  $\sigma_n$ . Задача прямого решения не имеет.

Задача выполняется в следующем порядке.

1. Задаем ряд значений глубины в распределителе  $P-1$   $h_{0(p-1)}$ , и определяем для этих значений глубины расход  $Q_{P-1}$ .
2. При заданных глубинах  $h_{0(p-1)}$  считая эту глубину в нижнем бьефе водовыпуска  $h_n$  определяем вид истечения и значение коэффициента подтопления  $\sigma_n$ .

3. Вычисляем пропускную способность водовыпуска  $Q_B$  по расчетной формуле для водослива практического профиля. Расчет сводится в таблицу 12.1.

Таблица 12.1

$h_0(p-1)$ (м)	$\Omega$ (м <sup>2</sup> )	$X$ (м)	$R$ (м)	$C$ (м <sup>0.5</sup> /с)	$Q_{p-1}$ (м <sup>3</sup> /с)	$Z$ (м)	$(Z/C_n)$	$h_n$ (м)	$h_n/H$	$\sigma_n$	$Q_b$ (м <sup>3</sup> /с)

4. По данным таблицы строим совмещенные графики  $Q_{p-1}=f(h_{0(p-1)})$  и  $Q_B=f(h_{0p})$ . Точка пересечения кривых этих графиков определяет пропускную способность водовыпуска  $Q_0$  и глубину наполнения распределителя  $h_{0(p-1)}$ , (рис. 12.10).

## 13. ДОННЫЕ ЩИТОВЫЕ ОТВЕРСТИЯ

### 13.1. Установление вида истечения из-под щита

Пропускная способность щитового отверстия зависит от вида истечения:

а) свободное истечение будет, когда гидравлический прыжок отогнан или когда он возникает в сжатом сечении  $c-c$  (рис. 13.1).

б) несвободное – когда гидравлический прыжок затоплен (рис. 13.2)

Вид истечения устанавливается путем сравнения второй сопряженной глубины со сжатой  $h_c''$  с глубиной в нижнем бьефе  $h_n$ .

Отогнанный прыжок получается в случае когда

$$h_c'' > h_n, \quad (13.1)$$

Затопленный- когда  $h_c'' < h_n$ . (13.2)

Гидравлический прыжок будет возникать в сжатом сечении при

$$h_c'' = h_n. \quad (13.3)$$

### 13.2. Расчетные зависимости при истечении из-под щита

В случае свободного истечения расчетное уравнение имеет вид:

$$Q = \varphi \cdot e \cdot b \cdot \sqrt{2g(H_0 - h_c)}, \quad (13.4)$$

где  $\varphi_c$  – коэффициент скорости зависит от конструкции входной части сооружения, принимается :

$$\varphi_c \geq 0.95$$

$\varepsilon$  – коэффициент вертикального сжатия, зависящий от соотношения  $e/H$ . Значение  $\varepsilon$  определяется по данным Н.Е. Жуковского или по формуле А.Д. Альтшуля;

$$\varepsilon = 0.57 + \frac{0.043}{1.1 + \frac{e}{H}}, \quad (13.5)$$

где  $e$  – высота поднятия затвора;  
 $b$  – ширина отверстия;

$h_c = \varepsilon e$  – сжатая глубина;  
 $H_0$  – расчетный напор.  
 $H_0 = H$  при  $V_0 \leq 0,885\sqrt{Z}$ , (13.6)

$H_0 = H + \frac{\alpha \cdot v_0^2}{2g}$  при  $V_0 > 0,885\sqrt{Z}$ , (13.7)

$v_0 = \frac{Q}{\Omega_b}$  – скорость подхода.

В случае подтопленного истечения при степени подтопления  $\sigma = \frac{h_n}{h_c} > 1,2$  расход щитового отверстия определяется по формуле:

$Q = \mu_0 e b \sqrt{2gZ_0}$ , (13.8)

где  $\mu_0$  – коэффициент расхода при подтопленном истечении. Рекомендует этот коэффициент определять по зависимости

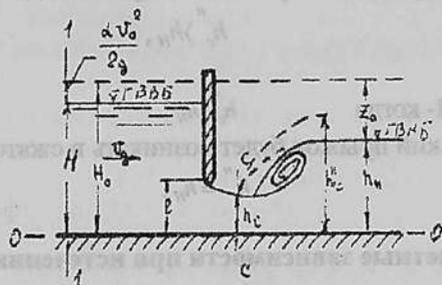


Рис. 13.1. Свободное истечения из-под щита

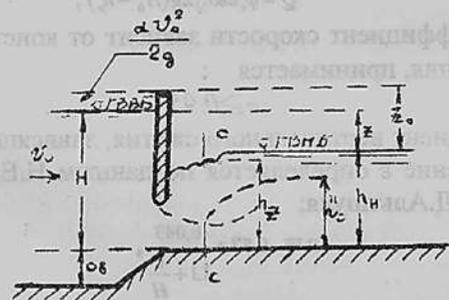


Рис. 13.2. Подтопленное истечения из-под щита

$\mu_0 = \mu \left( 1 + 0,61 \frac{e}{h_n} \right)$ , (13.9)

где:  $\mu = \varphi_c \cdot \varepsilon$  – коэффициент расхода при свободном истечении;

$Z_0$  – разность уровней в верхнем и нижнем бьефах, подсчитанная с учетом скорости подхода.

При степени подтопления  $\delta < 1,2$  расчет щитового отверстия выполняется как при свободном истечении.

### 13.3. Основные типы задач по расчету истечения из под щита

#### Задача 1:

Дано:  $H, e, b, \varphi_c, h_n$ .

Определить  $Q$ .

#### Решение:

1. Определяем  $h_c = \varepsilon e$

где  $\varepsilon$  – коэффициент вертикального сжатия, определяется как указано в пункте 13.2;

2. Определяем вторую сопряженную глубину  $h''_c$  с сжатой  $h_c$  одним из способов, указанных в пункте 13.1.

3. Сравниваем  $h''_c$  с глубиной в нижнем бьефе  $h_n$ , устанавливаем вид истечения, как указано в пункте 13.1

4. Определяем расход согласно указаниям, приведенным в пункте 13.2.

#### Задача 2:

Дано:  $H, Q, b, I_c, h_n$ .

Определить:  $e$ .

#### Решение:

1. Устанавливаем вид истечения, для чего:

а) принимаем глубину в нижнем бьефе  $h_n$  как вторую сопряженную глубину и по ней находим первую, сопряженную с ней глубину  $h'_n$

б) вычисляем удельную энергию сечения при глубине  $h'_n$  по формуле:

$Э'_n = h'_n + \frac{\alpha Q^2}{2g(\omega'_n)^2 \varphi_c^2}$ , (13.10)

где  $\omega_n'$  — живое сечение при глубине  $h_n'$ ;  
 $\varphi_c$  — коэффициент скорости зависит от условия входа потока в сооружение  $\varphi_c = 0.95 \div 1.0$ ;

в) сравниваем вычисленную удельную энергию  $\mathcal{E}_n'$  с удельной энергией в верхнем бьефе сооружения, вычисленной относительно плоскости сравнения, проходящей по дну нижнего бьефа  $E_0$ .

$$E_0 = C_n + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (13.11)$$

$C_n$  — высота порога в нижнем бьефе сооружения.

Если  $E_0 > \mathcal{E}_n'$  истечение свободное, если  $E_0 < \mathcal{E}_n'$  истечение подтопленное.

В случае свободного истечения расчет ведется по формуле (13.4), в случае подтопленного — по формуле (13.8)

Далее решение выполняется в следующем порядке.

1. Задаем значение высоты поднятия затворов  $\epsilon$  и вычисляем пропускную способность сооружения  $Q$ . Расчет удобнее вести в таблице формы 13.1.

Таблица 13.1

$e(m)$	$e/H$	$\epsilon$	$Q(m^3/c)$
--------	-------	------------	------------

2. По данным таблицы строим график  $Q=f(e)$  (рис.13.4)

3. Из графика  $Q=f(e)$  по заданному расходу определяем высоту поднятия затвора  $e$ .

### Задача 3

Дано:  $Q, e, b, \varphi_c, h_k$ .

Определить  $H$

Решение:

1. Задаем значения  $H$ , вычисляем скорость подхода  $V_0$  и определяем расчетный напор  $H_0$ .

2. Устанавливаем вид истечения, как показано в задаче 1 и по соответствующей формуле определяем величину расхода  $Q$ . Расчет следует вести в таблице следующей формы 13.2

Таблица 13.2

$H(m)$	$V_0(m/c)$	$H_0(m)$	$e/H$	$\epsilon$	$Q(m^3/c)$
--------	------------	----------	-------	------------	------------

3. По данным таблицы строим график  $Q=f(H)$

4. Из графика  $Q=f(H)$  по заданному расходу определяем значение геометрического напора  $H$ .

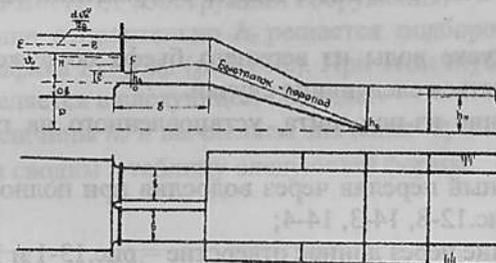


Рис. 13.3. Расчетная схема к задаче

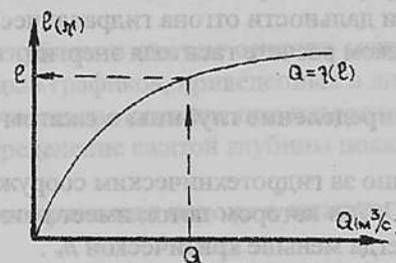


Рис. 13.4. График к задаче №2

## 14. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

### 14.1. Основные задачи сопряжения бьефов

При пропуске воды из верхнего бьефа сооружения в нижний могут встречаться следующие случаи.

1. Истечение из-под щита, установленного на гребне плотины (рис.14-1)
2. Свободный перелив через водослив при полностью поднятых затворах – рис.12-8, 14-3, 14-4;
3. Истечение через донное отверстие – рис.13-1 и 13-2.

Основные гидравлические задачи, возникающие при расчете сопряжения бьефов состоят:

- а) в выяснении формы сопряжения потока в нижнем бьефе;
- б) в определении дальности отгона гидравлического прыжка;
- в) в гидравлическом расчете гасителя энергии.

### 14.2. Определение глубины в сжатом сечении

Непосредственно за гидротехническим сооружением образуется сжатое сечение  $C-C$ , в котором поток имеет наименьшую глубину  $h_c$ . Эта глубина всегда меньше критической  $h_k$ .

При установлении формы сопряжения потока в нижнем бьефе глубина в сжатом сечении имеет особое значение, поэтому решение задачи начинается с определения этой глубины.

Глубина в сжатом сечении определяется в зависимости от типа сооружения и заданных для расчета величин.

А. При протекании воды через водосливную стенку и истечении из-под щита (рис.13-1, 13-2, 14-1, 14-3) и известных величинах  $H$ ,  $V_0$ ,  $b$ ,  $C_b$ ,  $C_n$ ,  $Q$ , глубина в сжатом сечении определяется согласно уравнению Бернулли для сечения 1-1 и  $C-C$ , записанному в следующем виде:

$$E_0 = h_c + \frac{Q^2}{2g\omega_c^2\varphi_c^2}, \quad (14.1)$$

где  $E_0$  – удельная энергия потока в верхнем бьефе;  
 $\omega_c$  – площадь живого сечения в сжатом сечении;

$\varphi_c$  – коэффициент скорости, учитывающий потери напора на участке потока от сечения 1-1 до сжатого сечения  $C-C$ .

Значение коэффициента скорости  $\varphi_c$  принимается в пределах  $0.8 \div 1.0$  в зависимости от конструкции сооружения.

Это уравнение относительно  $h_c$  решается подбором или путем построения графика  $E_0 = f(h_c)$  (рис.14.2). При этом глубина в сжатом сечении определяется в следующем порядке:

1. Задаем величины  $h_c$  и вычисляем значения  $E'_c$  по зависимости (14.1). Расчеты сводим в таблицу следующей формы.

Таблица 14.1

$h_c(м)$	$\omega_c(м^2)$	$\omega_c^2$	$E'_c(м)$
----------	-----------------	--------------	-----------

2. По данным расчетной таблицы строим график  $E'_c = f(h_c)$  (рис.14.2) и определяем глубину  $h_c$  по фактическому значению  $E_0 = C_n + H_0$ .

Определение глубины в сжатом сечении может быть выполнено так же и с помощью графиков, приведенных в литературе [1,2 и др].

Б. При истечении из-под щита при известных величинах  $H$ ,  $e$ ,  $b$ ,  $V_0$ , (рис.13.1), определение сжатой глубины показано в пункте 13.2.

### 14.3. Формы сопряжения потока в нижнем бьефе сооружения

В случае, когда русло в нижнем бьефе имеет уклон  $i < i_k$ , различают три формы сопряжений бьефов:

1. Гидравлический прыжок за сооружением затоплен (рис.14-3);
2. Прыжок начинается непосредственно в сжатом сечении (рис.14-4);
3. Гидравлический прыжок отогнан от сжатого сечения на расстояние  $l$  (рис.14-5).

Общий ход расчета по сопряжению бьефов может быть следующим:

1. Находим глубину в сжатом сечении  $h_c$  как указано выше;
2. Вычисляем значение сопряженной глубины  $h'_c$  с глубиной в сжатом сечении  $h_c$  (см. параграф 11.3 «Определение сопряженных глубин»);
3. Сравниваем глубину  $h_c$  с глубиной в нижнем бьефе  $h_n$ ;

а)  $h_c^* < h_H$  – сопряжение потока осуществляется по типу затопленного гидравлического прыжка;

б)  $h_c^* = h_H$  – гидравлический прыжок возникает в сжатом сечении

в)  $h_c^* > h_H$  – сопряжение при помощи отогнанного прыжка.

Установление формы сопряжения бьефов можно выполнить методом, приведенным в пункте 13.3, задача 2.

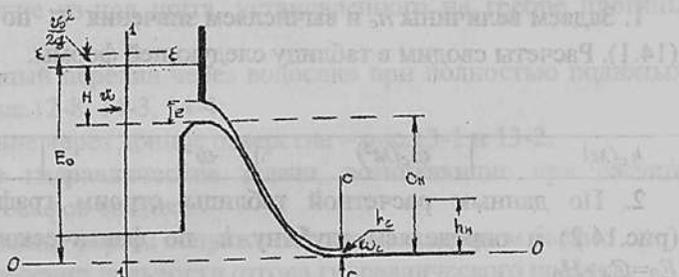


Рис. 14.1. Общий случай сопряжения бьефов

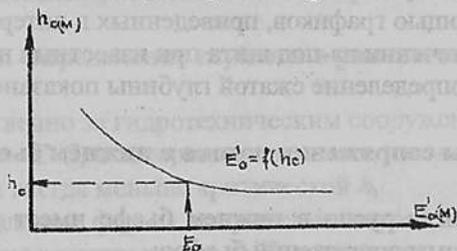


Рис. 14.2. График к определению сжатой глубины

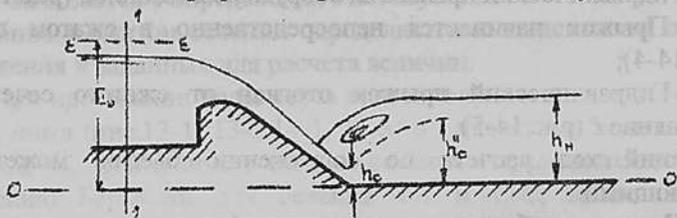


Рис. 14.3. Сопряжение бьефов при помощи затопленного прыжка

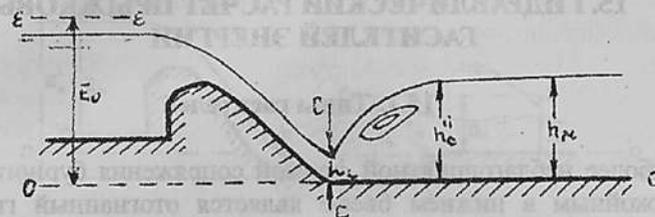


Рис. 14.4. Прыжок в сжатом сечении

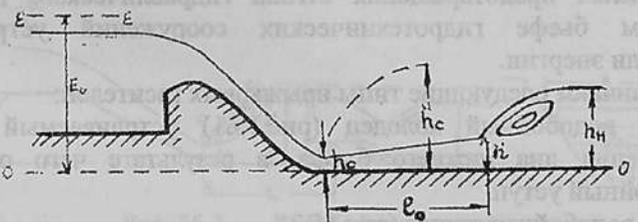


Рис. 14.5. Сопряжение бьефов при помощи отогнанного прыжка

## 15. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРЫЖКОВЫХ ГАСИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

### 15.1. Типы гасителей

Наиболее неблагоприятной формой сопряжения бурного потока со спокойным в нижнем бьефе является отогнанный гидравлический прыжок.

В целях предотвращения отгона гидравлического прыжка в нижнем бьефе гидротехнических сооружений устраиваются гасители энергии.

Различают следующие типы прыжковых гасителей:

а) водобойный колодец (рис.15.1) устраиваемый за счет углубления дна нижнего бьефа, в результате чего образуется водобойный уступ.

б) водобойная стенка (рис.15.2).

в) водобойный колодец комбинированного типа (рис.15.3).

### 15.2. Расчет глубины водобойного колодца

При устройстве водобойного колодца дно нижнего бьефа сооружения понижается на величину  $d$ , что увеличивает высоту падения струи. При этом сжатая глубина на дне колодца уменьшается до величины  $h_c'$ , а вторая сопряженная глубина с ней  $h_c''$  увеличивается.

Наряду с этим ещё больше увеличивается глубина нижнего бьефа непосредственно за сооружением  $h_n^* = h_n + d$ , в результате чего получаем требуемое неравенство  $h_c' \leq h_c$ , отвечающее затопленному гидравлическому прыжку.

Для расчета глубины водобойного колодца должны быть известны следующие величины: расход  $Q$ , размеры и конструкция сооружения, размеры канала в верхнем и нижнем бьефах, напор и глубина в нижнем бьефе.

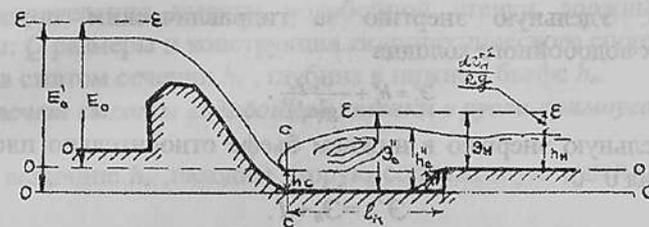


Рис. 15.1. Водобойный колодец

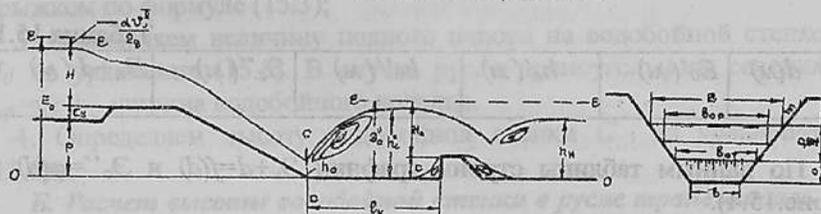


Рис. 15.2. Водобойная стенка

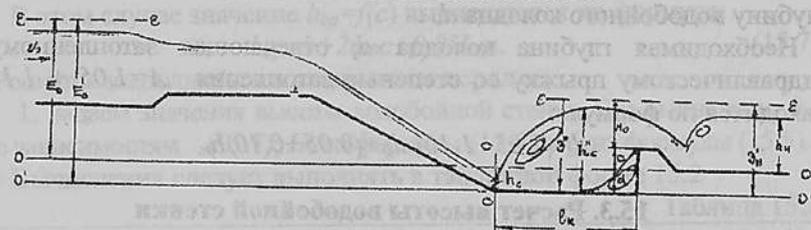


Рис. 15.3. Водобойный колодец комбинированного типа

При правильно рассчитанной глубине водобойного колодца выполняется равенство:

$$\varepsilon_c' = \varepsilon_n + d, \quad (15.1)$$

здесь  $\varepsilon_n = h_n + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_n^2}$  - удельная энергия сечения в нижнем бьефе.

Расчет глубины водобойного колодца ведется в следующей последовательности. Задаём значения глубины  $d$  и вычисляем:

1. Удельную энергию потока в верхнем бьефе относительно плоскости сравнения, проходящей по дну  $\theta' - \theta'$

$$E_0' = E_0 + \alpha. \quad (15.2)$$

2. По значению  $E_0'$  определяем величину  $h_c'$  и сопряженную с ней глубину  $h_c''$ :

3. Удельную энергию за гидравлическим прыжком в пределах водобойного колодца

$$\mathcal{E}_c^* = h_c^* + \frac{\alpha Q_2}{2g(\omega_c^*)^2} \quad (15.3)$$

4. Удельную энергию в нижнем бьефе относительно плоскости сравнения 0'-0'

$$\mathcal{E}'_n = \mathcal{E}_n + d \quad (15.4)$$

Расчеты сводим в таблицу формы (15.1)

Таблица 15.1

$d(м)$	$\mathcal{E}'_n(м)$	$h_c'(м)$	$h_c''(м)$	$\mathcal{E}_c''(м)$	$\mathcal{E}_n + d(м)$

По данным таблицы строим графики  $\mathcal{E}_n + d = f(d)$  и  $\mathcal{E}_c'' = \varphi(d)$ , (рис.15.4).

Точка пересечения этих кривых определяет теоретическую глубину водобойного колодца  $d_0$ .

Необходимая глубина колодца  $d$ , отвечающая затопленному гидравлическому прыжку со степенью затопления  $A = 1.05 + 1.10$  находится по формуле:

$$d = (1.05 + 1.10) d_0 + (0.05 + 0.10) h_n$$

### 15.3. Расчет высоты водобойной стенки

Водобойная стенка работает по схеме водослива практического профиля со свободным истечением без бокового сжатия. При этом расчетная формула имеет вид:

$$Q = mb_m \sqrt{2gH_0^3}, \quad (15.5)$$

где  $b_{cp}$  – средняя ширина переливающегося потока через водобойную стенку.

Коэффициент расхода, может быть принят равным  $m \cong 0.42$

Обращаясь к рис. 15.2 можем записать:

$$\mathcal{E}_c'' = C + H_0, \quad (15.6)$$

где  $\mathcal{E}_c''$  – удельная энергия за гидравлическим прыжком, вычисляемая по зависимости (15.3);

$C$  – высота водобойной стенки;

$H_0$  – полный напор на водобойной стенке.

Для определения высоты водобойной стенки должны быть известны:  $Q$  размеры и конструкция гидротехнического сооружения, глубина в сжатом сечении  $h_c$ , глубина в нижнем бьефе  $h_n$ .

**А. Расчет высоты водобойной стенки в русле прямоугольного сечения.**

1. По величине  $h_c$ , находим вторую сопряженную с ней глубину  $h_c'$ ;

2. Вычисляем значение удельной энергии за гидравлическим прыжком по формуле (15.3);

3. Определяем величину полного напора на водобойной стенке  $H_0$  из уравнения (15.5). В случае русла прямоугольного сечения  $b_{cp} = f(c)$  – ширина водобойного колодца.

4. Определяем высоту водобойной стенки  $C$  из уравнения (15.6).

**Б. Расчет высоты водобойной стенки в русле трапецидального сечения.**

В этом случае значение  $b_{cp} = f(c)$  вычисляются по формуле:

$$b_{cp} = b + 2m_0c + 0.8H_0m. \quad (15.7)$$

Решение выполняется в следующем порядке:

1. Задаем значения высоты водобойной стенки  $C$  и вычисляем:  $b_{cp}$  по зависимостям (15.7);  $H_0$  из формулы (15.6) и  $Q$  из формулы (15.5).

Вычисления следует выполнять в табличной форме 15.2

Таблица 15.2

$C(м)$	$b_{cp}(м)$	$H_0(м)$	$Q(м^3/с)$

2. По вычисленным данным строим график  $Q = f(C)$ , (рис.15.5).

3. Из графика по заданному расходу определяем высоту водобойной стенки.

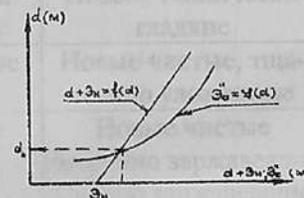


Рис. 15.4. Определение теоретической глубины колодца

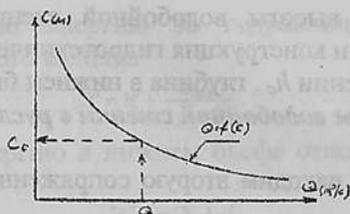


Рис. 15.5. Определение теоретической высоты водобойной стенки

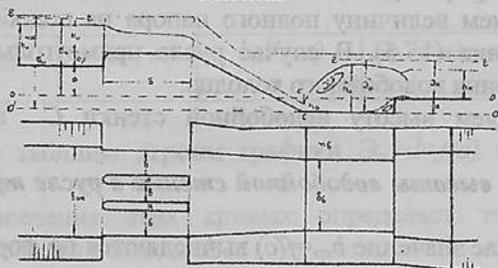


Рис. 15.6. Схема перегороджающего сооружения на МК

Определив высоту водобойной стенки, необходимо проверить сопряжение бьефов за стенкой. При этом сжатая глубина за водобойной стенкой может быть определена по графику  $E_0 = f(c)$  при  $E_0 = \mathcal{E}_c$ .

В случае отогнанного гидравлического прыжка выполняется расчет следующей водобойной стенки или водобойного колодца.

Длина водобойного колодца  $l_k$  равна длине гидравлического прыжка  $l_n$ , определяемой как указано в пункте 11.4.

Приложения

Коэффициент местного сопротивления

Таблица 1

Устройство	A	$\xi_{жв}$	Устройство	A	$\xi_{жв}$
Пробочный кран	150	0,4	Тройник	150	0,3
Вентиль:			Задвижка	75	0,15
обыкновенный	3000	6	полностью		
«Косва»	900	2,5	открытая:		
угловой	400	0,8	n=0,75	350	0,2
шаровой клапан	5000	45	n=0,5	1300	2
Угольник:			n=0,25	3000	20
90°	400	1,4	Диафрагма:		
135°	600	0,4	n=0,64	70	1
Колено 90°	130	0,2	n=0,4	120	7
Выход из трубы в бак	30	1	n=0,16	500	70
Вход из бака в трубу	30	0,5	n=0,05	3200	800

Эквивалентная шероховатость  $\Delta_a$  для труб из разных материалов

Таблица 2

Трубы	Состояние трубы	$\Delta_a$ , мм
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0-0,0002
Бесшовные стальные	Новые чистые, тщательно уложенные	0,01-0,02
Стальные сварные	Новые чистые	0,03-0,1
	Умеренно заржавевшие	0,3-0,7
	Сильно заржавевшие или с большими отложениями	2-4

Оцинкованные железные	Новые чистые	0,1-0,2
Чугунные	Новые без покрытия	0,02-0,5
	Бывшие в употреблении	0,5-1,5
Асбестоцементные	Новые	0,05-0,1
Бетонные	Новые	0,15-0,3
	Бывшие в употреблении Из необработанного бетона	0,3-0,8 1,3
Полиэтиленовые (2-20мм)	Новые чистые	0,003

Коэффициенты заложения  $m$  откосов каналов

Таблица 3

Грунт	Коэффициенты заложения $m$ откосов каналов в зависимости от грунта, слагающего русло		Грунт	Коэффициенты заложения $m$ откосов каналов в зависимости от грунта, слагающего русло	
	Откосы			Откосы	
	Подводные	Надводные		Подводные	Надводные
Скальный	0,00-0,50	0,00-0,25	Песок	1,50-2,5	
Полускальный	0,50-1,00	0,50	мелкий	0	1,00-2,00
Галечник и гравий с песком	1,25-1,50	1,00	Песок пылеватый	300-3,50	2,50
Глина, суглинок и тяжелый и средний	1,00-1,50	0,50-1,00			
Суглинок легкий, супесь	1,25-2,00	1,00-1,50			
Глина, суглинок тяжелый и средний	0,75-1,0		Супесь	1,0-1,5	

Суглинок легкий	1,0-1,25	Песок	1,25-2,0
-----------------	----------	-------	----------

Допускаемые неразмывающие скорости

Таблица 4

Средний размер частиц грунта, мм	Допускаемые неразмывающие средние скорости потока для однородных несвязных грунтов при содержании в них глинистых частиц менее 0,1 кг/м <sup>3</sup> , м/с, при глубине потока, м								
	0,5	1	3	5					
0,05	0,52	0,55	0,60	0,62					
0,15	0,36	0,38	0,42	0,44					
0,25	0,37	0,39	0,41	0,45					
0,37	0,38	0,41	0,46	0,48					
0,50	0,41	0,44	0,50	0,52					
0,75	0,47	0,51	0,57	0,59					
1,00	0,51	0,55	0,62	0,65					
2,00	0,64	0,70	0,79	0,83					
2,50	0,69	0,75	0,86	0,90					
3,00	0,73	0,80	0,91	0,96					
5,00	0,87	0,96	1,10	1,17					
0,00	1,10	1,23	1,42	1,51					
15,00	1,26	1,42	1,65	1,76					
20,00	1,37	1,55	1,84	1,96					
25,00	1,46	1,65	1,93	2,12					
30,00	1,56	1,76	2,10	2,26					
40,00	1,68	1,93	2,32	2,50					
75,00	2,01	2,35	2,89	3,14					
100,00	2,15	2,54	3,14	3,46					
150,00	2,35	2,84	3,62	3,96					
200,00	2,47	3,03	3,92	4,31					
300,00	2,90	3,32	4,40	4,94					
0,005	0,39	0,43	0,49	0,52	0,175	1,21	1,33	1,52	1,60
0,01	0,44	0,48	0,55	0,58	0,20	1,28	1,40	1,60	1,69
0,02	0,52	0,57	0,65	0,69	0,225	1,36	1,48	1,70	1,80
0,03	0,59	0,64	0,74	0,78	0,25	1,42	1,55	1,78	1,88
0,04	0,65	0,71	0,81	0,86	0,30	1,54	1,69	1,94	2,04

0,05	0,71	0,77	0,89	0,98	0,35	1,67	1,83	2,09	2,21
0,075	0,83	0,91	1,04	1,10	0,40	1,79	1,96	2,25	2,38
0,10	0,96	1,04	1,20	1,27	0,45	1,88	2,06	2,35	2,49
0,125	1,03	1,13	1,30	1,37	0,50	1,99	2,17	2,05	2,63
0,15	1,13	1,23	1,41	1,49	0,60	2,16	2,38	2,72	2,83
0,005	0,36	0,40	0,46	0,49	0,175	0,70	0,77	0,89	0,94
0,01	0,39	0,43	0,49	0,52	0,20	0,75	0,82	0,93	1,00
0,02	0,41	0,45	0,52	0,55	0,225	0,80	0,88	1,00	1,07
0,03	0,43	0,48	0,55	0,59	0,25	0,82	0,91	1,04	1,10
0,04	0,46	0,51	0,58	0,62	0,30	0,90	0,99	1,12	1,20
0,05	0,48	0,53	0,61	0,65	0,35	0,97	1,06	1,22	1,30
0,075	0,51	0,56	0,64	0,69	0,40	1,03	1,15	1,31	1,40
0,10	0,55	0,61	0,70	0,75	0,45	1,09	1,20	1,39	1,46
0,125	0,60	0,67	0,76	0,81	0,50	1,26	1,28	1,46	1,56
0,15	0,65	0,72	0,82	0,88	0,60	1,27	1,38	1,60	1,70

Таблица 5

d, мм	W, мм	d, мм	W, мм	d, мм	W, мм/с
0,005	0,0175	0,06	2,49	0,15	15,60
0,01	0,0692	0,07	3,39	0,175	18,90
0,02	0,277	0,08	4,43	0,20	21,60
0,03	0,623	0,09	5,61	0,225	24,30
0,04	1,11	0,10	6,92	0,25	27,00
0,05	1,73	0,125	10,81	0,275	29,90

**Коэффициенты шероховатости «n» каналов и естественных водотоков**

Таблица 6

Расход воды в канале, м <sup>3</sup> /с	Коэффициенты шероховатости n оросительных каналов в земляном русле	
	в связных и песчаных грунтах	в гравелисто-галечниковых грунтах
Более 25	0,0200	0,0225
1-25	0,0225	0,0250
Менее 1	0,0250	-

Каналы постоянной сети	0,0275	-
периодического действия		
Оросители	0,0300	-

Продол. табл.6

Характеристика поверхности ложа канала	Коэффициенты шероховатости n каналов в скале
Хорошо обработанная поверхность	0,02-0,025
Посредственно обработанная поверхность без выступов	0,03-0,035
То же, с выступами	0,04-0,045

Продол. табл.6

Облицовка	Коэффициенты шероховатости n каналов с облицовкой
Бетонная хорошо отделанная	0,012-0,014
Бетонная грубая	0,015-0,017
Сборные железобетонные лотки	0,012-0,015
Покрытия из асфальтобитумных материалов	0,013-0,016
Одернованное русло	0,03-0,035

Продол. табл.6

Характеристика русла	Коэффициенты шероховатости n естественных водотоков	Характеристика русла	Коэффициенты шероховатости n естественных водотоков
Естественное русло в благоприятных условиях (чистое, прямое,	0,025-0,033	Заросшие участки рек с очень медленным течением и глубокими промоинами	0,05-0,08

незасоренное земляное, со свободным течением)			
То же, с камнями	0,03-0,04	Заросшие участки рек болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.)	0,075-0,15
Периодические потоки (большие и малые) при хорошем состоянии и формы ложа	0,033	Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (трава, кустарники)	0,05
Земляные русла сухих логов в относительно благоприятных условиях	0,04	Значительно заросшие поймы со слабым течением и большими глубокими промоинами	0,08
Русла периодических водотоков, несущих вовремя паводка заметное количество наносов с крупногалечниковым или покрытым растительностью дном, периодические водостоки, сильно	0,05	То же, с неправильным косоструйным течением и большими заводами и др.	0,1

засоренные и извилистые			
Чистое извилистое ложе с небольшим числом промоин и отмелей	0,033-0,045	Поймы лесистые со значительными мертвыми пространствами, местными углублениями, озерами и др.	0,133
То же, но слегка заросшее и с камнями	0,035-0,05	Глухие поймы, сплошные заросли (лесные, тасжного типа)	0,2

Значения функции  $\Phi(z)$  при уклоне  $i > 0$  при  $x=5,5$ 

Таблица 7

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0	0	0,76	0,788	0,970	1,265	1,17	0,137
0,05	0,050	0,77	0,801	0,975	1,300	1,18	0,1330
0,10	0,100	0,78	0,814	0,980	1,344	1,19	0,124
0,15	0,150	0,79	0,828	0,985	1,400	1,20	0,118
0,20	0,200	0,80	0,842	0,990	1,474	1,21	0,113
0,25	0,250	0,81	0,857	0,995	1,605	1,22	0,108
0,30	0,300	0,82	0,872	1,000	-	1,23	0,103
0,35	0,350	0,83	0,88	1,005	0,730	1,24	0,098
0,40	0,400	0,84	0,904	1,010	0,598	1,25	0,094
0,45	0,450	0,85	0,921	1,015	0,525	1,26	0,090
0,50	0,501	0,86	0,938	1,020	0,474	1,27	0,086
0,55	0,552	0,87	0,956	1,025	0,435	1,28	0,082
0,60	0,605	0,88	0,975	1,030	0,402	1,29	0,079
0,61	0,615	0,89	0,995	1,035	0,375	1,30	0,076
0,62	0,626	0,90	1,017	1,040	0,353	1,31	0,073
0,63	0,637	0,905	1,028	1,045	0,334	1,32	0,070
0,64	0,648	0,910	1,040	1,05	0,317	1,33	0,067
0,65	0,659	0,915	1,053	1,06	0,290	1,34	0,064
0,66	0,670	0,920	1,066	1,07	0,266	1,35	0,061
0,67	0,681	0,925	1,080	1,08	0,245	1,36	0,058

0,68	0,692	0,930	1,095	1,09	0,226	1,37	0,056
0,69	0,704	0,935	1,111	1,10	0,210	1,38	0,054
0,70	0,716	0,940	1,128	1,11	0,196	1,39	0,052
0,71	0,728	0,945	1,146	1,12	0,183	1,40	0,050
0,72	0,740	0,950	1,165	1,13	0,172	1,41	0,048
0,73	0,752	0,955	1,186	1,14	0,162	1,42	0,046
0,74	0,764	0,960	1,209	1,15	0,153	1,43	0,045
0,75	0,776	0,965	1,235	1,16	0,145	1,44	0,044
1,45	0,043	1,70	0,020	2,3	0,005	4,0	0,00025
1,46	0,042	1,75	0,017	2,4	0,004	4,5	0
1,47	0,041	1,80	0,015	2,5	0,003	5,0	0
1,48	0,040	1,85	0,013	2,6	0,0025	6,0	0
1,49	0,039	1,90	0,011	2,7	0,0020	8,0	0
1,50	0,038	1,95	0,009	2,8	0,0015	10,0	0
1,55	0,032	2,00	0,008	2,9	0,0010		
1,60	0,027	2,1	0,007	3,0	0,00075		
1,65	0,023	2,2	0,006		0,00050		
			3,5				

Таблица 8

R,м	n=0,012		n=0,014		n=0,017		n=0,020	
	CR <sup>2,5</sup>	C	CR <sup>2,5</sup>	C $\sqrt{R}$	CR <sup>2,5</sup>	C $\sqrt{R}$	CR <sup>2,5</sup>	C $\sqrt{R}$
0,05	0,034	13,48	0,027	10,82	0,02	8	0,015	6,02
0,06	0,054	15,1	0,044	12,19	0,033	9,1	0,025	6,94
0,07	0,081	16,63	0,066	13,48	0,05	10,15	0,039	7,81
0,08	0,116	18,07	0,094	14,7	0,071	11,14	0,055	8,64
0,09	0,157	19,44	0,128	15,87	0,098	12,08	0,076	9,44
0,1	0,207	20,74	0,17	16,98	0,13	12,99	0,102	10,2
0,11	0,266	22	0,218	18,05	0,168	13,87	0,132	10,94
0,12	0,333	23,21	0,275	19,09	0,21	14,72	0,168	11,66
0,13	0,411	24,38	0,339	20,09	0,262	15,54	0,209	12,36
0,14	0,5	25,51	0,411	21,06	0,319	16,34	0,255	13,04
0,15	0,598	26,61	0,495	22,01	0,385	17,12	0,309	13,71
0,16	0,709	27,69	0,588	22,93	0,459	17,88	0,368	14,35
0,17	0,83	28,73	0,69	23,83	0,538	18,63	0,433	14,99
0,18	0,96	29,75	0,8	24,7	0,625	19,35	0,502	15,61

0,19	1,11	30,75	0,926	25,57	0,725	20,07	0,585	16,23
0,20	1,27	31,72	1,06	26,4	0,826	20,76	0,673	16,82
0,21	1,44	32,68	1,2	27,23	0,943	21,45	0,769	17,41
0,22	1,63	33,61	1,35	28,03	1,07	22,12	0,871	17,99
0,23	1,83	34,54	1,52	28,83	1,2	22,78	0,982	18,56
0,24	2,04	35,44	1,7	29,61	1,35	23,43	1,1	19,12
0,25	2,27	36,33	1,9	30,38	1,5	24,07	1,23	19,67
0,26	2,51	37,2	2,11	31,14	1,67	24,7	1,36	20,21
0,27	2,77	38,06	2,32	31,88	1,85	25,32	1,51	20,74
0,28	3,05	38,9	2,56	32,61	2,03	25,94	1,67	21,28
0,29	3,34	39,74	2,8	33,33	2,23	26,54	1,83	21,8
0,30	3,65	40,56	3,06	34,05	2,44	27,14	2,01	22,3
0,31	3,98	41,37	3,34	34,75	2,67	27,72	2,19	22,81
0,32	4,32	42,17	3,64	35,44	2,9	28,31	2,39	23,32
0,33	4,67	42,97	3,94	36,14	3,14	28,89	2,59	23,82
0,34	5,06	43,75	4,26	36,81	3,4	29,46	2,8	24,31
0,35	5,45	44,52	4,59	37,49	3,68	30,02	3,04	24,8
0,36	5,87	45,28	4,95	38,15	3,97	30,58	3,27	25,28
0,37	6,29	46,04	5,32	38,8	4,25	31,13	3,52	25,76
0,38	6,76	46,78	5,7	39,45	4,54	31,68	3,79	26,24
0,39	7,23	47,52	6,1	40,09	4,9	32,21	4,06	26,7
0,40	7,72	48,25	6,52	40,73	5,24	32,75	4,35	27,17
0,41	8,23	48,97	6,95	41,36	5,59	33,28	4,64	27,63
0,42	8,76	49,68	7,4	41,97	5,95	33,8	4,93	28,08
0,43	9,32	50,38	7,86	42,59	6,33	34,31	5,26	28,53
0,44	9,9	51,08	8,36	43,2	6,74	34,83	5,61	28,97
0,45	10,5	51,78	8,87	43,8	7,16	35,34	5,96	29,42
0,46	11,1	52,47	9,4	44,41	7,58	35,85	6,32	29,87
0,47	11,7	53,15	9,94	45	8,03	36,35	6,71	30,3
0,48	12,4	53,82	10,5	45,58	8,49	36,84	7,09	30,73

ГЛОССАРИЙ

Термин	Русский язык	Узбекский язык	Английский язык
<b>А</b>			
Абсолютная пьезометрическая высота	<b>Абсолютная пьезометрическая высота</b> Высота такого столба жидкости в закрытом пьезометре, который своим весом способен создать давление, равное абсолютному гидростатическому давлению в рассматриваемой точке. Абсолютная пьезометрическая высота $h_a$	Абсолют пьезометрик бандлик	Absolute piezometric height
Абсолютный пьезометрический напор	<b>Абсолютный пьезометрический напор</b> – это потенциальная энергия давления жидкой частицы, приходящаяся на единицу ее веса. Обозначают абсолютный пьезометрический напор, выражают в 17 метрах (м).	Абсолют пьезометрик напор	Absolute piezometric head
<b>Б</b>			
Безнапорное движение	<b>Безнапорное движение</b> - это движение жидкости, при котором поток имеет свободную поверхность, а давление атмосферное.	Напорсиз харакат	without head movement
<b>В</b>			
Вакуумметрическое давление, или вакуум	<b>Вакуумметрическое давление, или вакуум</b> , - недостаток давления до атмосферного (дефицит давления), т. е. разность между	Вакуумметрик босим ёки вакуум	Vacuum pressure

	атмосферным или барометрическим и абсолютным давлением: $p_{\text{вак}} - p_a - p$ .		
Внешние силы	<b>Внешние силы</b> – это силы, приложенные к частицам рассматриваемого объема жидкости со стороны жидкости, окружающей этот объем	Ташки кучлар	External forces
Внутренние силы	<b>Внутренние силы</b> – это силы, возникающие внутри жидкости в результате воздействия на нее внешних сил	Ички кучлар	Internal forces
Вязкость	<b>Вязкость</b> - свойство жидкости оказывать сопротивление относительно движению (сдвигу) частиц жидкости. Характеристиками вязкости являются: динамический коэффициент вязкости $\mu$ и кинематический коэффициент вязкости $\nu$ .	Ёпиш-коклик	Viscosity
<b>Г</b>			
Гидростатика	<b>Гидростатика</b> – раздел гидравлики, в котором изучаются условия и закономерности равновесия жидкостей под действием приложенных к ним сил, а так же воздействие покоящихся жидкостей на погруженные в них твердые тела и стенки сосудов	Гидростатика	Hydrostatics
Гидравлический радиус	<b>Гидравлический радиус</b> Параметр живого сечения потока, величина которого равна отношению площади	Гидравлик радиус	Hydraulic radius

	живого сечения к длине смоченного периметра. Гидравлический радиус обозначается $R_r$ , выражается в метрах (м) и вычисляется по формуле: $R_r = \dots$		
<b>Гидравлический диаметр</b>	<b>Гидравлический диаметр</b> $D_r$ – размерная величина, равная учетверенному гидравлическому радиусу: $D_r = 4 \cdot R_r$ .	Гидравлик диаметр	Hydraulic diameter
<b>Гидравлический удар</b>	<b>Гидравлический удар</b> – явление резкого изменения давления в напорном трубопроводе при внезапном изменении скорости движения жидкости, связанном с быстрым закрытием или открытием задвижки, крана, клапана и т. п., быстрым остановом или пуском гидродвигателя или насоса. В указанных случаях при уменьшении или увеличении скорости движения жидкости давление перед запорным устройством соответственно резко увеличивается ( <b>положительный гидравлический удар</b> ) или уменьшается ( <b>отрицательный гидравлический удар</b> ). Это изменение давления распространяется по всей длине трубопровода с большой скоростью $a$ , называемой скоростью	Гидравлик зарба	Hydraulic impact

	распространения ударной волны.		
<b>Гидравлический коэффициент трения (или коэффициент Дарси)</b>	<b>Гидравлический коэффициент трения (или коэффициент Дарси)</b> – безразмерный коэффициент пропорциональности в формуле Дарси -Вейсбаха, зависящий в самом общем случае от относительной эквивалентной шероховатости и числа Рейнольдса.	Дарси коэффициенти	Darcy coefficient
<b>Гидродинамика</b>	<b>Гидродинамика</b> – раздел гидравлики, в котором изучаются закономерности движения несжимаемых жидкостей и их воздействие на обтекаемые ими твердые тела.	Гидродинамика	Hydrodynamic
<b>Геометрический напор</b>	<b>Геометрический напор</b> (геометрическая высота или удельная потенциальная энергия положения) – это потенциальная энергия положения жидкой частицы, отнесенная к единице ее веса. Обозначают геометрический напор, выражают в метрах (м)	Геометрический напор	Geometric head
	<b>Д</b>		
<b>Давление</b>	<b>Давление</b> – физическая величина, характеризующая напряженное состояние сплошных сред, численно – это интенсивность нормальных сил, с которыми одно тело действует на поверхность другого.	Босим	Pressure

	Давление обозначается $p$ , за его единицу в СИ принят паскаль (Па). Один паскаль в неподвижной среде равен давлению, вызываемому нормальной силой 1Н, действующей на поверхность, равную 1 м <sup>2</sup> (1Па=1Н/м <sup>2</sup> ).		
Движение	<b>Движение</b> – в философии: форма существования материи; в физике: изменение положения тела или его частей относительно других тел. Движение в пространстве связано с длиной пройденного пути и временем, затраченным на этот путь	Харакат	Movement
Длина	<b>Длина</b> – протяжение в том направлении, в котором две крайние точки линии лежат на наименьшем расстоянии друг от друга.* Длина обозначается $l$ (L). В СИ в качестве основной единицы длины принят метр.	Узунлик	Length
	<b>Ж</b>		
Живое сечение потока	<b>Живое сечение потока</b> — поверхность в пределах потока жидкости, перпендикулярная в каждой своей точке к вектору соответствующей местной скорости в этой точке. При плавно изменяющемся движении жидкости живое сечение представляет плоскость, перпендикулярную к направлению движения.	Оқим харакат кесими	Live flow cross-section

	Живое сечение потока характеризуется площадью живого сечения $S$ , смоченным периметром $\chi$ , гидравлическим радиусом $R_r$ и гидравлическим диаметром $D_g$ . Смоченный периметр $\chi$ – длина линии, по которой живое сечение потока соприкасается с ограничивающими его стенками. Гидравлический радиус $R_r$ – размерная величина, равная отношению площади живого сечения к смоченному периметру: $R_r = S/\chi$ .		
Жидкость	<b>Жидкость</b> – непрерывная среда, обладающая свойством текучести, т. е. способная неограниченно изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил, но в отличие от газа мало изменяющая свою плотность при изменении давления.	Суюклик	Fluid
	<b>З</b>		
Закон Архимеда	<b>Закон Архимеда</b> На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх, численно равная весу жидкости, вытесненной телом. Выталкивающая сила приложена к центру тяжести объема погруженной части тела.	Архимед қонуни	The law of Archimed

<b>Закон Паскаля</b>	<b>Закон Паскаля.</b> Давление, производимое на капельную жидкость внешними силами, передается ею одинаково по всем направлениям.	Паскаль конуни	The law of Pascal
<b>И</b>			
<b>Избыточное давление</b>	<b>Избыточное давление</b> $p_{изб}$ – разность между абсолютным давлением $p$ и атмосферным давлением $p_a$ . $p_{изб} = p - p_a$ .	Ортикча босим	Overpress ure
<b>Испарение</b>	<b>Испарение</b> -парообразование, происходящее лишь на поверхности капельной жидкости.	Буғла ниш	Evaporati on
<b>К</b>			
<b>Кавитационный запас</b>	<b>Кавитационный запас</b> – превышение полного напора жидкости во всасывающем патрубке насоса над давлением $p_{н.п}$ насыщенных паров этой жидкости.	Кавита цион захира	Cavitation stock
<b>Кавитационный режим насоса</b>	<b>Кавитационный режим насоса</b> - режим работы насоса в условиях кавитации, вызывающей изменение основных технических показателей.	Насос нинг кави тация режими	Kavitaion regim of the pump
<b>Критическое число Рейнольдса</b>	<b>Критическое число Рейнольдса</b> (или расчетное критическое число Рейнольдса) – это то его числовое значение, при котором разрушается ламинарное течение. Критическое число Рейнольдса обозначается $Re_{кр}$ , для круглых труб условились считать $Re_{кр}$	Рейнольд с критик сони	Critical number of Reynolds

	= 2320.		
<b>Коэффициент кинетической энергии</b>	<b>Коэффициент кинетической энергии</b> (или коэффициент Кориолиса) – это коэффициент, учитывающий отличие кинетической энергии в сечении потока, вычисленной по средней скорости, от значения, вычисленного по действительному распределению местных скоростей.	Кинетик энергия коэффици цинти	Factor to kinetic energy
<b>Л</b>			
<b>Ламинарный режим</b>	<b>Ламинарный режим</b> движения жидкости - жидкость движется слоями без поперечного перемешивания, причем пульсации скорости и давления отсутствуют. Критерием для определения режима движения является безразмерное число Рейнольдса.	Ламинар харакат тартиби	Laminar regime
<b>М</b>			
<b>Масса</b>	<b>Масса</b> – в философии: количественная мера материи тела; в физике: мера инертности тела по отношению к действующей на него силе. В качестве единицы массы в СИ принят к и л о г р а м м.	Масса	Mass
<b>Массовые силы</b>	<b>Массовые силы</b> Под массовыми понимаются силы, непрерывно распределенные по массе (объему) жидкости и	Масса кучлари	Mass forces

	пропорциональные массе жидкости. Примерами массовых сил являются сила тяжести и сила инерции.		
<b>Массовый расход жидкости</b>	<b>Массовый расход жидкости</b> - это количество жидкости в единицах массы, проходящей в единицу времени через сечение потока. Массовый расход обозначают, единица его измерения кг/с.	Суоуклинг мас-са сарфи	Mass consumption to fluids
<b>Местная скорость</b>	<b>Местная скорость</b> - скорость движения жидких частиц в данный момент времени в той или другой неподвижной точке пространства, заполненного движущейся жидкостью. Местная скорость обозначается $V$ и определяется как $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ , где $V_x$ - продольная составляющая; $V_y$ и $V_z$ - поперечные составляющие местной скорости.	Махаллий тезлик	Local velocity
<b>Местная потеря напора</b>	<b>Местная потеря напора</b> (или потеря напора на местном сопротивлении) - снижение полного гидродинамического напора, наблюдаемое в отдельных местах потока, где поток претерпевает ту или другую резкую местную деформацию. Каждую отдельную местную потерю напора обозначают $h_M$ .	Махаллий каршили кларда напорнинг йуколлиши	Local loss of the pressure
	<b>H</b>		
<b>Напорное движение</b>	<b>Напорное движение</b> представляет	Напорли харакат	Pressure motion

	движение жидкости в закрытом русле, при котором поток не имеет свободной поверхности, а давление отличается от атмосферного.		
<b>Насадка (или насадок)</b>	<b>Насадка (или насадок)</b> - короткий патрубок, подсоединяемый к отверстию с целью изменения параметров истечения.	Найча	Nozzle
<b>Насосы</b>	<b>Насосы</b> - машины для создания напорного потока жидкой среды. Этот поток создается в результате силового воздействия на жидкость в рабочей камере насоса. По характеру силового воздействия, а следовательно, и по виду рабочей камеры различают насосы динамические и объемные.	Насослар	Pumps
<b>Ньютоновские жидкости</b>	<b>Ньютоновские жидкости</b> - жидкости, в которых напряжения трения определяются эмпирической формулой Ньютона: $\tau = \mu (dv/dn)$ , определяющей закон вязкого трения: напряжения трения пропорциональны градиенту скорости $v$ в относительном движении. Здесь $n$ - нормаль к поверхности, вдоль которой движется жидкость; коэффициент пропорциональности $\mu$ называется динами-	Ньютон суоукликлари	Fluids of Nyuton

	ческим коэффициентом вязкости. Он измеряется в пуазах, в $(\text{Н/м}^2) \cdot \text{с}$ (Па·с) - СИ, $(\text{кг/м}^2) \cdot \text{с}$ - (МКГСС).		
<b>Неньютоновскими или аномальными жидкостями</b>	<b>Неньютоновскими, или аномальными, жидкостями</b> называют жидкости, которые не подчиняются основному закону внутреннего трения Ньютона, выраженному уравнением выше. К ним относятся: литой бетон, глинистые, цементные, известковые и коллоидные растворы, нефтепродукты и смазочные масла при температуре, близкой к температуре застывания, краски, клей, смолы, целлюлоза, бумажная масса, растворы каучука, желатин, крахмал, различные белки, жиры и другие продукты пищевой промышленности, огнеупоры, шлаки, расплавленные силикаты и т. п.	Ньютон бўлмаган ёки аномаль суюклик- лар	Fluids of anomalous
	<b>О</b>		
<b>Объемный расход жидкости</b>	<b>Объемный расход жидкости</b> Объемным расходом называют количество жидкости в единицах объема, проходящей в единицу времени через сечение потока.	Сувюкликнинг ҳажмий сарфи	Three-de mental consumptio n of the pump
<b>Оптимальный режим</b>	<b>Оптимальный режим насоса</b> - режим работы насоса при наибольшем значении к. п.	Насос- нинг оп- тималь ре-	Optimum regime of

<b>насоса</b>	д. Номинальный режим насоса - режим работы насоса, обеспечивающий заданные технические показатели.	жими	the pump
<b>Относительная эквивалентная шероховатость</b>	<b>Относительная эквивалентная шероховатость</b> - это безразмерный параметр, определяемый как отношение эквивалентной шероховатости к внутреннему диаметру трубопровода.	Нисбий эквива- лент ғадир- будирлик	Relative equivalent roughness
	<b>П</b>		
<b>Парообразование</b>	<b>Парообразование</b> - свойство капельных жидкостей изменять свое агрегатное состояние на газообразное.	Бугла- ниш	Vaporiza- tion
<b>Плавно изменяющееся движение</b>	<b>Плавно изменяющееся движение</b> близко к прямолинейному и параллельно струйному, т.е. это движение, при котором кривизна линий тока и угол расхождения между ними весьма малы и в пределе стремятся к нулю. При несоблюдении этого условия имеет место движение резко изменяющееся.	Секин ўзгарув- чи ҳаракат	Smoothly changing movement
<b>Поверхностные силы</b>	<b>Поверхностные силы</b> под поверхностными понимают силы, которые непрерывно распределены по поверхностям и пропорциональны величинам площадей поверхностей, которые ограничивают объемы жидкости, а также	Юза кучлари	Surface forces

	мысленно выделены внутри объемов.		
<b>Подобные потоки жидкости</b>	<b>Подобные потоки жидкости</b> Подобными называют такие потоки жидкости, у которых каждая характеризующая их физическая величина находится для любых сходственных точек в одинаковом отношении.	Сууюклик нинг ўхпаш оқимлари	Similar flows to fluids
<b>Полный гидростатический напор</b>	<b>Полный гидростатический напор</b> – это полная потенциальная энергия, отнесенная к единице веса жидкости.	Тўла гидрос- татик напор	Full hydros- tatics pressure
<b>Полная потеря напора</b>	<b>Полная потеря напора</b> Обусловленное вязкостью снижение полного гидродинамического напора на определенном участке гидромагистрала, определяемое как сумма потерь напора на трение по длине и на всех местных сопротивлениях. Полная потеря напора между сечения потока 1-1 и 2-2 обозначается.	Тўла напор йўқоти- лиши	Full loss of the pressure
	<b>Р</b>		
<b>Равномерное движение</b>	<b>Равномерное движение</b> — это установившееся движение жидкости, при котором скорости частиц в соответствующих точках живых сечений, а также средние скорости не изменяются вдоль потока. При неравномерном движении скорость частиц в	Текис харакат	Uniform movement

	соответствующих точках живых сечений и средние скорости изменяются вдоль потока.		
<b>Расход</b>	<b>Расход</b> - количество жидкости, протекающей через живое сечение потока в единицу времени. Расход может измеряться в единицах объема, веса или массы. Соответственно различают расходы: объемный, весовой и массовый.	Саpф	Expense
	<b>С</b>		
<b>Свободная поверхность</b>	<b>Свободная поверхность</b> – это поверхность раздела между капельной жидкостью и внешней газообразной средой	Эркин сатх	Free surface
<b>Сжимаемость</b>	<b>Сжимаемость</b> — свойство жидкости изменять свой объем под действием давления.	Сикилув- чанлик	Compres- sibility
<b>Средняя скорость</b>	<b>Средняя скорость</b> Воображаемая скорость движения жидких частиц (для них одна и та же в данном сечении), обеспечивающая тот же объемный расход, что и действительное неравномерное распределение местных скоростей в данном сечении.	Ўртача тезлик	Average velocity
	<b>Т</b>		
<b>Температурное расширение жидкостей</b>	<b>Температурное расширение жидкостей</b> количественно характеризуется коэффициентом температур-	Сууюклик нинг ха- роратдан кенгайи- ши	Tempera- ture ex

	ного расширения $\beta_t$ , представляющим относительное изменение объема $V_0$ при изменении температуры $t$ на $1^\circ\text{C}$ .		
<b>Турбулентный режим</b>	<b>Турбулентный режим</b> движения жидкости - слоистость нарушается, движение жидкости сопровождается перемешиванием и пульсациями скорости и давления. Критерием для определения режима движения является безразмерное число Рейнольдса.	Турбулент режим	Turbulent regime
	<b>У</b>		
<b>Установившееся движение жидкости</b>	<b>Установившееся движение жидкости</b> - когда характеристики (скорость, давление и др.) движения во всех точках рассматриваемого пространства не изменяются с течением времени. Движение жидкости, при котором скорость и давление жидкости изменяются во времени, называется <b>неустановившимся</b> .	Суюкликнинг баркарор харакаати	Steady-state fluid motion
	<b>Ф</b>		
<b>Физический закон</b>	<b>Физический закон</b> - это найденная на опыте и установленная путем обобщения опытных данных количественная или качественная объективная зависимость одних физических величин от других	Физик конун	Physical law

	<b>Э</b>		
<b>Энергия</b>	<b>Энергия</b> - это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Энергия независимо от конкретных форм проявления обозначается $E$ . За единицу энергии в СИ принят джоуль (Дж).	Энергия	Energy
	<b>Ц</b>		
<b>Центр давления</b>	<b>Центр давления</b> - это точка пересечения линии действия силы абсолютного гидростатического давления с плоскостью, в которой лежит воспринимающая эту силу стенка.	Босим маркази	Center of pressure-
	<b>Ч</b>		
<b>Число Рейнольдса</b>	<b>Число Рейнольдса</b> - безразмерное выражение, являющееся характеристикой потока жидкости: где - средняя скорость; $d$ - внутренний диаметр; $\nu$ - кинематический коэффициент вязкости.	Рейнольдсони	the reynolds number

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Чугаев Р.Р. "Гидравлика", Изд.3.М.-Л «Энергия», 1975.
2. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. Кисилева П.Г.-М: Изд. «Энергия», 1972
3. Шевелев Ф.А. "Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стальных водопроводных труб". - М.: «Стройиздат», 1973.
4. Агроскин И.Н., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.Н. "Гидравлика", Изд.4 М. -Л «Энергия», 1964.
5. СНиП 2.06.03-97. Оросительные системы. Нормы проектирования. - Т.:1997.
6. Каримов Р.М. «Гидравлический расчет каналов (учебное пособие)». Изд. институт «Узгипрозем», 1976.
7. Чертоусов М.Д. "Гидравлика" (специальный курс), М.,- Л., Госэнергоиздат, 1962.
8. Арифжанов А. и др. Аналитический метод определения критической глубины – Ж.Агро илм, 2009, №3, стр.48-50.
9. Арифжанов А. Гидравлика, 2005.
10. Арифжанов А., Лабораторный практикум по курсу «Гидравлика и гидравлические машины», 2007.
11. Штеренлихт Д.В. Гидравлика.-М.: Энергоатомиздат, 1984.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
<b>1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ</b>	
1.1 Основные физические свойства реальной жидкости и её характеристики.....	5
1.2 Примерный состав задач по теме.....	6
<b>2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТОЧКЕ, СПОСОБЫ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ И ЧИСЛОВОГО ВЫРАЖЕНИЯ</b>	
2.1 Гидростатическое давление в точке, его свойства и размерность .....	9
2.2 Основное уравнение гидростатики в случае действия на жидкость только силы тяжести и его следствия .....	9
2.3 Техническая характеристика гидростатического давления и формулы для его определения.....	12
2.4 Способы числового выражения величины гидростатического давления.....	13
2.5 Определение давления в точке по показаниям приборов .....	13
2.6 Примерный состав задач по теме 2.....	15
<b>3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ ФИГУРЫ</b>	
3.1 Аналитический способ определения величины, линии действия и точки приложения (центр давления) силы гидростатического давления.....	20

3.2	Случай действия силы гидростатического давления на горизонтальную плоскость. Гидростатический парадокс.....	21
3.3	Эпоха гидростатического давления .....	21
3.4	Графоаналитический способ определения величины силы давления, действующей на плоские прямоугольные фигуры с горизонтальным основанием и положения центра давления .....	22
3.5	Примерный состав задач по теме 3.....	22

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

4.1	Величина силы, действующей на цилиндрические поверхности .....	27
4.1.1	Определение горизонтальной составляющей силы.....	27
4.1.2	Определение вертикальной составляющей силы .....	29
4.2	Направление силы $F$ и точка её приложения .....	29
4.3	Примерный состав задач по теме 4 .....	30
4.4	Закон Архимеда. Плавание тел .....	32

#### 5. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ. СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЖИДКОСТИ

5.1	Гидравлические элементы живого сечения потока. Расход и средняя скорость .....	37
5.2	Уравнение Бернулли для идеальной жидкости. Значение слагаемых уравнения .....	38
5.3	Общая схема применения уравнения Бернулли .....	41
5.4	Совместное применение уравнения Бернулли и неразрывности движения при определении расхода .....	42

5.5	Построение напорной $E-E$ и пьезометрической $P-P$ линий для потока идеальной жидкости .....	44
5.6	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости .....	47
5.7	Виды потерь напора при движении реальной жидкости и формулы для их определения .....	47
5.8	Построение напорной $E-E$ и пьезометрической $P-P$ линий для потока реальной жидкости .....	50

#### 6. РАСЧЁТ «КОРОТКИХ» НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОСТОЯННЫМ ДИАМЕТРОМ

6.1	Расчетные зависимости и основные типы задач по расчёту «коротких» трубопроводов с постоянным диаметром .....	55
-----	--	----

#### 7. РАСЧЁТ «ДЛИННОГО» СЛОЖНОГО НЕЗАМКНУТОГО ТРУБОПРОВОДА

7.1	Расчет длинного трубопровода.....	60
7.2	Расчет магистрали сложной незамкнутой водопроводной сети .....	62
7.3	Построение напорной линии $E-E$ .....	63
7.4	Расчет ответвлений .....	65

#### 8. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКОЙ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

8.1	Истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке в атмосферу и под уровень.....	67
8.2	Типы сжатия струи.....	68
8.3	Истечение жидкости из кругло цилиндрического насадка при постоянном напоре .....	69

8.4	Основные типы задач при истечении жидкости при малых отверстий.....	73
8.5	Основные типы задач при истечении из насадов .....	74

## 9. РАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

9.1	Гидравлические элементы живого сечения потока в канале .....	76
9.2	Равномерное движение воды в каналах, его характеристики и условия существования .....	78
9.3	Гидравлически наиболее выгодный поперечный профиль трапециoidalного канала .....	80
9.4	Проверка канала на размыв и заиление .....	80
9.5	Основные задачи при расчете трапециoidalных .....	82

## 10. НЕРАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

10.1	Примеры возникновения плавно изменяющегося движения .....	89
10.2.	1. Удельная энергия сечения.....	89
10.2.2	График удельной энергии сечения. Критическая глубина и способы и определения.....	90
10.2.3	Нормальная глубина.....	93
10.2.4	Критический уклон.....	94
10.2.5	Спокойное и бурное состояние потока.....	94
10.3	Группы и классы призматических водотоков. Зоны течения. Формы кривых свободной поверхности .....	95
10.4	Расчет кривых свободной поверхности в призматических руслах .....	96

## 11. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

11.1	Гидравлический прыжок и его элементы.....	105
11.2	Уравнение гидравлического прыжка. Прыжковая функция и ее график .....	105
11.3	Определение сопряженных глубин в призматических руслах.....	106
11.4	Определение длины гидравлического прыжка и послепрыжкового участка в призматическом русле.....	108
11.5	Определение потерь энергии в гидравлическом прыжке.....	109

## 12. ВОДОСЛИВЫ

12.1	Терминология и классификация водосливов.....	110
12.2	Основная расчетная формула для прямоугольного водослива .....	110
12.3	Расчетные формулы для водосливов с широким порогом .....	111
12.4	Учет факторов, влияющих на пропускную способность водосливов с широким порогом .....	111
12.5	Основные типы задач по теме.....	114
12.6	Водосливы с порогом практического профиля.....	115
12.6.1	Учет факторов, влияющих на пропускную способность водосливов практического профиля.....	115
12.7	Основные указания по выполнению задачи.....	117

## 13. ДОННЫЕ ЩИТОВЫЕ ОТВЕРСТИЯ

13.1	Установление вида истечения из под щита.....	121
13.2	Расчетные зависимости при истечении из под щита.....	121
13.3	Основные типы задач по расчету истечения из под щита .....	123

#### 14. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

- 14.1 Основные задачи сопряжения бьефов..... 126  
14.2 Определение глубины в сжатом сечении..... 126  
14.3 Формы сопряжения потока в нижнем бьефе сооружения.. 127

#### 15. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПРЫЖКОВЫХ ГАСИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

- 15.1 Типы гасителей ..... 130  
15.2 Расчет глубины водобойного колодца..... 130  
15.3 Расчет высоты водобойной стенки ..... 132  
Приложения ..... 135  
Глоссарий..... 144  
Использованная литература..... 160

АРИФЖАНОВ А.М.  
АПАКХУЖАЕВА Т.У.

## ГИДРАВЛИКА

Ташкент – «Инновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи» – 2020

Редактор:	Ш.Купербаева
Тех. редактор:	А.Мойдинов
Художник:	А.Шушунов
Корректор:	Ш.Миркасимова
Компьютерная вёрстка:	Н.Рахматуллаева

E-mail: [nashr2019@inbox.ru](mailto:nashr2019@inbox.ru) Tel.: +998999209035.  
Изд.лиц. АIN№009, 20.07.2018. Разрешено в печать 09.11.2020.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура «Times New Roman».  
Офсетная печать. Усл. печ.л. 10,0. Изд. печ.л. 10,5.  
Тираж 100. Заказ № 129.

14. СОДЕРЖАНИЕ СЪЕДОБЛИТЕЛИ

А.А. АЛМАЗАРОВ  
У.Т. АЛМАЗАРОВА

14.1	Основные данные съедобности	124
14.2	Определение глубины в съедобном слое	126
14.3	Формы съедобности в различных частях	127

15. ГЛАВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

15.1	Таблица показателей	130
15.2	Распределение показателей в различных частях	131
15.3	Различия в показателях в различных частях	132

Иллюстрации	135
Глоссарий	141
Список литературы	151
Содержание	155
Издательство	156
Редактор	157
Художник	158
Корректор	159
Компьютерная верстка	160
И.А. Алмазаров	161

Ушбу китобни 2018 йилда ташкир қилди. Тел: +998777777777  
Қўраш қилди: 2018 йилда ташкир қилди. Тел: +998777777777

Отпечатано в типографии  
«Иновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи».  
100066, г. Ташкент, ул. Алмазар, 171.