

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
КАФЕДРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ МЕЛИОРАЦИЙ

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

*по курсу «Гидравлика»*

для студентов специальности  
**74 05 0 1** «Мелиорация и водное хозяйство»  
заочной формы обучения  
(по сокращенной программе)

Брест 2008

В первой части курса «Гидравлика» изучаются законы равновесия и движения жидкости, рассматриваются способы применения этих законов к решению практических инженерных задач.

Во второй части (специальные вопросы) – изучаются законы движения воды в открытых естественных и искусственных руслах, движение грунтовых вод, а также распространение этих законов на сооружения, устроенные в руслах.

Контрольные задания для выполнения расчетно-графических работ охватывают весь курс «Гидравлика» и позволяют на конкретных практических задачах закрепить полученные теоретические знания.

Составители: Громик Н.В., доцент,  
Мешик О.П., доцент.

Рецензент: Белькевич А.А., заместитель управляющего РУП «Брестводстрой»

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Гидравлика является частью теоретической базы для изучения таких дисциплин, как: «Сельскохозяйственные мелиорации», «Гидротехнические сооружения», «Насосы и насосные станции»; «Комплексное использование водных ресурсов»; «Сельскохозяйственное водоснабжение».

В современных условиях практической задачей специалистов-гидротехников является обеспечение гармоничного взаимодействия общества и природы. Поэтому при изучении дисциплины «Гидравлика» основной задачей является формирование у студентов мировоззрения в усвоении законов гидравлики для решения инженерных задач, специфических для гидротехнического и водохозяйственного комплексов.

В гидравлике изучаются общие законы равновесия и движения жидкостей и газов, а также методы применения этих законов для решения инженерных задач, свойственных для технических отраслей.

Программа курса состоит из двух частей:

1) общие законы гидравлики;

2) специальные разделы дисциплины, наиболее подходящие для специальности 74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство».

Для лучшего усвоения материала студент должен пользоваться методическими указаниями, в которых даны направления и последовательность изучения тем и разделов. Вначале следует изучить теоретическую часть раздела, затем решить и проанализировать задачи, приведенные в учебниках и задачниках. Учебный материал можно считать проработанным и усвоенным только при условии, если студент умеет правильно применять теорию для решения практических задач.

# 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ТЕМАМ КУРСА

## 1.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Определение жидкости. Основные физические свойства жидкости и газа. Силы, действующие на жидкость. Давление в жидкости. Сжимаемость. Закон Ньютона для жидкостного трения. Вязкость. Поверхностное натяжение. Давление насыщенного пара жидкости. Растворение газов и жидкостей. Модель идеальной жидкости.

### *Методические указания*

По своим физическим свойствам жидкости занимают промежуточное положение между твердыми телами и газами. Жидкость весьма мало изменяет свой объем при изменении давления или температуры, в этом отношении она сходна с твердым телом. Жидкость обладает текучестью, благодаря чему она не имеет собственной формы и принимает форму того сосуда, в котором находится. В этом отношении жидкость отличается от твердого тела и имеет сходство с газом. Свойства жидкостей и их отличие от твердых тел и газов обуславливаются молекулярным строением. Следует уяснить, каким образом особенности молекулярного строения влияют на физические свойства жидкости.

Покоящаяся жидкость подвержена действию двух категорий внешних сил: массовых и поверхностных. Массовые силы пропорциональны массе жидкости или для однородных жидкостей - ее объему. Внешние поверхностные силы непрерывно распределены по граничной поверхности жидкости. Следует знать, какие силы относятся к массовым (объемным) и к поверхностным, какие силы называются внешними и какие внутренними.

В покоящейся жидкости может существовать только напряжение сжатия, т.е. давление. Необходимо четко представлять разницу между понятиями среднего гидростатического давления, гидростатического давления в точке, выраженных в единицах напряжения, и понятием суммарного гидростатического давления на поверхность, выраженного в единицах силы.

В гидравлике при изучении законов равновесия и движения широко пользуются различными физическими характеристиками жидкости (например, плотностью). Студенту нужно уметь определять основные физические характеристики жидкости, знать единицы этих характеристик.

Следует также рассмотреть основные физические свойства капельных жидкостей: сжимаемость, тепловое расширение, вязкость и др.

Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление относительному перемещению слоев, вызывающему деформацию сдвига. Это свойство проявляется в том, что в жидкости при ее движении возникает сила сопротивления сдвигу, называемая силой внутреннего трения. При прямолинейном слоистом движении жидкости сила внутреннего трения ( $T$ ) между перемещающимися один относительно другого слоями с площадью соприкосновения ( $S$ ) определяется законом Ньютона

$$T = \pm \mu S \frac{du}{dn} \quad \text{или} \quad \frac{T}{S} = \tau = \pm \frac{du}{dn} . \quad (1.1)$$

Динамический коэффициент вязкости ( $\mu$ ) не зависит от давления и от характера движения, а определяется лишь физическими свойствами жидкости и ее температурой. Как видно из (1.1), сила ( $T$ ) и касательное напряжение ( $\tau$ ) пропорциональны градиенту скорости и по нормали ( $n$ ) к поверхности трения ( $du/dn$ ), который представляет собой изменение скорости жидкости в направлении нормали на единицу длины нормали. Жидкости, для которых зависимость изменения касательных напряжений от скорости деформации отличается от закона Ньютона (1.1), называются неньютоновскими или аномальными жидкостями.

Учет сил вязкости значительно осложняет изучение законов движения жидкости. С другой стороны, капельные жидкости незначительно изменяют свой объем при изменении давления и температуры. В целях упрощения постановки задач и их математического решения создана модель идеальной жидкости. Идеальной жидкостью называется воображаемая жидкость, которая характеризуется полным отсутствием вязкости и абсолютной неизменяемостью объема при изменении давления и температуры. Переход от идеальной жидкости к реальной осуществляется введением в конечные расчетные формулы поправок, учитывающих влияние сил вязкости и полученных, главным образом, опытным путем. При изучении гидродинамики следует проследить особенности перехода от идеальной жидкости к реальной.

В гидравлике жидкость рассматривается как сплошная среда (континуум), т.е. среда, масса которой распределена по объему непрерывно. Это позволяет рассматривать все характеристики жидкости (плотность, вязкость, давление, скорость и др.) как функции координат точки и времени, причем в большинстве случаев эти функции предполагаются непрерывными.

## 1.2. ГИДРОСТАТИКА

Общие законы и уравнения статики жидкости и газа. Абсолютный и относительный покой жидких сред. Гидростатическое давление, его свойства. Уравнения Эйлера и их интегрирование. Основная формула гидростатики. Закон Паскаля. Абсолютное и избыточное давление, вакуум, приборы для измерения. Поверхность уровня. Определение силы давления покоящейся среды на плоские и криволинейные стенки. Относительное равновесие жидкости.

### *Методические указания*

Два свойства гидростатического давления обусловлены тем, что покоящаяся жидкость не воспринимает касательных и растягивающих усилий. Знание этих свойств позволяет понять физический смысл формул статического силового воздействия жидкости на твердые тела.

Наиболее общими уравнениями гидростатики являются дифференциальные уравнения Эйлера, устанавливающие связи между массовыми и поверхностными силами, действующими в жидкости. При изучении этих уравнений следует усвоить физический смысл всех входящих в них величин. Эти уравнения позволяют просто и быстро решать задачи, как в случае абсолютного покоя жидкости, когда на жидкость из массовых сил действует только сила тяжести, так и в случае относительного покоя, когда к силе тяжести присоединяются силы инерции. В случае действия на жидкость одной лишь силы тяжести, интегрирование уравнений Эйлера дает основное уравнение гидростатики

$$p_2 = p_1 + \gamma h, \quad (1.2)$$

где  $p_1$ , и  $p_2$  - давления в точках 1 и 2;  $h$  - глубина погружения точки 2 относительно точки 1;  $\gamma$  - удельный вес жидкости;  $\gamma h$  - весовое давление столба жидкости глубиной ( $h$ ).

В зависимости от способа отсчета различают абсолютное, избыточное (манометрическое) и вакуумметрическое давление. Следует знать взаимосвязи этих величин.

В уравнении (1.2) точка 1 может лежать на свободной поверхности жидкости. При этом весовое давление ( $\gamma h$ ) будет избыточным давлением только в том случае, когда давление на свободную поверхность равно атмосферному давлению.

Весьма важными понятиями в гидравлике являются пьезометрическая высота и гидростатический напор. Пьезометрическая высота выражает в метрах столба жидкости избыточное (или абсолютное) давление в рассматриваемой точке жидкости. Гидроста-

тический напор равен сумме геометрической ( $z$ ) и пьезометрической ( $p/\gamma$ ) высот. Для всех точек данного объема покоящейся жидкости гидростатический напор относительно выбранной плоскости сравнения есть постоянная величина.

Воздействие жидкости на плоские и криволинейные поверхности наглядно отражается эпюрами давления. Площадь (объем) эпюры дает величину силы давления, а центр тяжести этой площади (объема) - точку приложения силы давления. Аналитическое рассмотрение задачи позволяет получить весьма простые расчетные формулы. В случае плоской поверхности любой формы, величина силы гидростатического давления равна смоченной площади этой поверхности, умноженной на гидростатическое давление, в центре тяжести площади. Точка приложения силы гидростатического давления (центр давления) лежит всегда ниже центра тяжести (за исключением давления на горизонтальную плоскость, когда они совпадают). Следует отметить, что формула для определения координаты центра давления дает точку приложения силы только гидростатического давления без учета давления на свободную поверхность (см. вывод формулы в любом учебнике гидравлики).

Для криволинейных цилиндрических поверхностей обычно определяют горизонтальную и вертикальную составляющие полной силы гидростатического давления. Определение вертикальной составляющей связано с понятием «тела давления», которое представляет собой действительный или воображаемый объем жидкости, расположенный над цилиндрической поверхностью. Линия действия горизонтальной составляющей проходит через центр давления вертикальной проекции криволинейной поверхности, а линия действия вертикальной составляющей - через центр тяжести тела давления.

При изучении этого раздела студенту полезно рассмотреть несколько конкретных примеров построения тел давления для цилиндрических поверхностей, определить самостоятельно вертикальную и горизонтальную составляющие силы давления, точки их приложения и результирующую силу.

Необходимо рассмотреть давление жидкости на стенки труб и резервуаров и расчетные формулы для определения толщины их стенок.

### **1.3. ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ**

Два метода описания движения жидкостей и газов. Модель идеальной (невязкой) жидкости. Уравнения Эйлера и их интегралы для различных случаев движения. Три основных вида движения жидкости. Потенциальное движение жидкости. Установившееся и неустановившееся движение жидкости. Понятие о линиях и трубках тока. Расход элементарной струйки. Эпюра скоростей. Уравнение неразрывности. Неравномерное и равномерное, напорное и безнапорное движение. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости, его геометрическая и энергетическая интерпретация. Уравнение Бернулли для целого потока реальной (вязкой) жидкости. Напорная и пьезометрическая линии. Два режима движения реальной жидкости.

#### *Методические указания*

Одним из основных уравнений гидродинамики является уравнение постоянства расхода (уравнение неразрывности), которое для плавно изменяющегося и параллельно-струйного движения может быть представлено в виде  $v \cdot \omega = \text{const}$  (вдоль потока), откуда для двух сечений 1 и 2 получим  $v_1 / v_2 = \omega_2 / \omega_1$ , т.е. средние скорости потока обратно пропорциональны площадям живых сечений.

Следует уяснить, что уравнение постоянства расхода справедливо только при соблюдении ряда допущений, на которых основан логический вывод этого уравнения.

Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера дают общую зависимость между скоростями и ускорениями движущихся частиц жидкости и силами,

действующими на эти частицы. Интегрирование этих уравнений для элементарной струйки идеальной жидкости приводит к основному уравнению гидродинамики - уравнению Бернулли, которое можно получить также, непосредственно применив к бесконечно малому объему жидкости теоремы механики, например, теорему живых сил.

Уравнение Бернулли представляет собой частный случай закона сохранения энергии. Все члены уравнения Бернулли отнесены к единице веса жидкости, поэтому все виды энергии в этом уравнении имеют линейную размерность. При рассмотрении уравнения Бернулли для простейшего случая движения элементарной струйки невязкой (идеальной) жидкости следует уяснить геометрический и физический (энергетический) смысл уравнения в целом и его отдельных членов, а также обратить внимание на условия применимости уравнения Бернулли к элементарной струйке.

При распространении уравнения Бернулли для элементарной струйки на поток реальной жидкости возникает ряд трудностей, которые преодолеваются введением соответствующих ограничений и поправок. Уравнение Бернулли составляется для двух живых сечений потока, в которых течение параллельно-струйное или плавно изменяющееся. Живые сечения здесь плоские, поэтому отсутствуют ускорения вдоль живых сечений, а из массовых сил действует только сила тяжести. Следовательно, в этих сечениях (участках) справедливы законы гидростатики, в частности постоянство гидростатического напора для всех точек живого сечения относительно любой плоскости сравнения. Между плавно изменяющимися течениями (участками) потока, связанными уравнением Бернулли, поток может быть и резко изменяющимся. При определении кинетической энергии потока по средней скорости в данном сечении вводится поправка в виде коэффициента Кориолиса, учитывающего неравномерность распределения скоростей по живому сечению.

При решении практических инженерных задач уравнение Бернулли и уравнение постоянства расхода используются совместно. При этом они составляют систему из двух уравнений, позволяющую решать задачи с двумя неизвестными.

Если для струйки идеальной жидкости уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения механической энергии, то для потока реальной жидкости оно является уравнением баланса энергии с учетом гидравлических потерь. Гидравлическими потерями называется работа сил трения, затраченная на перемещение единицы веса жидкости из одного сечения в другое. Энергия потока, израсходованная на работу сил трения, превращается в тепловую энергию и рассеивается в пространстве.

Для использования уравнения Бернулли при решении практических инженерных задач необходимо знать гидравлические потери (потери напора), имеющие место при движении жидкости. Эти потери в значительной степени зависят от того, будет ли режим движения в потоке турбулентным или ламинарным.

Наличие того или иного режима в трубопроводе обуславливается соотношением трех факторов, входящих в формулу безразмерного критерия Рейнольдса  $Re = \rho v d / \mu$ ,  $\rho$  – средняя скорость движения жидкости;  $d$  - диаметр трубопровода;  $\mu$  - коэффициент кинематической вязкости.

При изучении режимов движения жидкости следует уяснить различия в структуре потоков. Нужно знать формулу числа Рейнольдса и его критическое значение, отчетливо представлять его физический смысл.

#### **1.4. ПОТЕРИ НАПОРА ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ**

Потери напора при установившемся движении. Основная формула равномерного движения. Сопротивления по длине, основная формула потерь. Данные о гидравлическом коэффициенте трения. Законы сопротивления. Ламинарный поток в трубе и приведение его к одномерной модели. Турбулентное течение в трубах. физическая природа

турбулентных напряжений и их представления на основе полуэмпирических теорий. Законы распределения скоростей и сопротивлений при турбулентных течениях в трубах. Сводка наиболее употребительных формул для гидравлического коэффициента трения. Местные гидравлические сопротивления. Общий характер местных потерь напора. Частные виды местных сопротивлений: резкое расширение трубопровода, выход из трубопровода, диффузор, сужение и другие виды сопротивления.

#### Методические указания

##### Потери по длине

В ламинарном потоке частицы жидкости движутся слоями с различными скоростями параллельно оси трубы без перемешивания. В таком потоке касательные напряжения подчиняются закону Ньютона. Используя общий закон распределения касательных напряжений и закон Ньютона, можно получить дифференциальное уравнение, из которого строго математически выводятся основные закономерности ламинарного движения: распределение скоростей по живому сечению трубопровода; максимальная и средняя скорости; коэффициент Кориолиса ( $\alpha$ ); закон сопротивления трения (формула Пуазейля); коэффициент гидравлического трения ( $\lambda$ ) в формуле Дарси, [1] стр.140, 141.

Теоретические результаты хорошо подтверждаются опытом для потоков, в которых отсутствует теплообмен с окружающей средой.

Турбулентный поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением частиц жидкости. Из-за сложности этого явления до сих пор не создано достаточно удовлетворительной теории турбулентного движения, которая непосредственно вытекала бы из основных уравнений гидродинамики и хорошо подтверждалась бы опытом (как для ламинарного движения). Поэтому все выводы и расчетные соотношения получены экспериментально и в результате теоретического исследования упрощенных моделей турбулентного течения.

Прежде всего, следует уяснить механизм турбулентного перемешивания и пульсации скоростей. Далее необходимо рассмотреть структуру и физическую природу касательных напряжений, которые определяются как сумма напряжений, вызванных действием сил вязкости и обусловленных турбулентным перемешиванием. Определение последних основано на полуэмпирических теориях Прандтля и Кармана, получивших дальнейшее развитие в трудах советских ученых.

Потери на трение по длине определяются по формуле Дарси, которая может быть получена из соображений размерности.

Центральным вопросом темы является определение коэффициента гидравлического трения ( $\lambda$ ) в формуле Дарси. В общем случае коэффициент ( $\lambda$ ) является функцией числа Рейнольдса ( $Re$ ) и относительной шероховатости ( $k/d$ )

$$\lambda = f(Re, k/d), \quad (1.3)$$

где  $k$  - абсолютная шероховатость;  $d$  - диаметр трубы.

Наиболее полно зависимость (1.3) раскрывается графиком Никурадзе, который получен экспериментально на трубах с искусственной зернистой равномерной шероховатостью, [1] стр.161. На графике можно выделить пять зон, каждая из которых характеризуется определенной внутренней структурой потока и в соответствии с этим определенной зависимостью ( $\lambda$ ) от ( $Re$ ) и ( $k/d$ ).

1. Зона изменения ( $Re$ ) от 0 до 2320. Ламинарный режим потока. Здесь  $\lambda=f(Re)$ . По Пуазейлю

$$\lambda = 64/Re. \quad (1.4)$$



2. Зона изменения (Re) от 2320 до 4000. Неустойчивая зона перемежающейся турбулентности, когда на отдельных участках возникают области турбулентного режима, которые разрастаются, а затем исчезают и снова появляются. Изменение структуры потока сопровождается колебаниями величины ( $\lambda$ ). Зона не рекомендуется для применения в гидравлических системах.

3. Зона чисел (Re) от 4000 до 10d/k. Поток характеризуется турбулентным ядром и пристенным (пограничным) ламинарным слоем, который затапливает шероховатости внутренней поверхности трубы, ввиду чего коэффициент ( $\lambda$ ) не зависит от (k/d), а зависит только от (Re). Здесь трубы работают как «гидравлически гладкие». Для этой зоны, по Блазиусу

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (1.5)$$

4. Зона, в которой  $\lambda = f(Re; k/d)$ . Пределы зоны определяются соотношением  $10d/k < Re < 500d/k$ . Переходная зона к «гидравлически шероховатым» трубам. Пристенный ламинарный слой равен (или меньше) высоте выступов шероховатости.

5. Зона больших чисел  $Re > 500d/k$  и, следовательно, интенсивной турбулентности. Трубы «гидравлически шероховатые». Коэффициент ( $\lambda$ ) не зависит от (Re) и является функцией только (k/d).

Как показали более поздние исследования, результаты экспериментов Никурадзе для «гидравлически шероховатых» труб нельзя перенести на трубы с естественной шероховатостью. Оказалось, что в четвертой и пятой зонах общий характер зависимости (1.3) сохраняется, но вид кривых на графике для различных типов шероховатостей получается различным, т.е. на ( $\lambda$ ) влияет не только величина (k/d), но и характер шероховатости стенок труб. Для реальных технических труб с естественной шероховатостью для определения ( $\lambda$ ) в четвертой зоне может быть рекомендована формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (1.6)$$

а для пятой зоны — формула Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_2}{d} \right)^{0,25} \quad (1.7)$$

Здесь  $k_3$  - эквивалентная абсолютная шероховатость, т.е. такая равномерная зернистая шероховатость Никурадзе, которая при расчетах дает такой же коэффициент ( $\lambda$ ), как и естественная шероховатость.

Отметим, что при малых  $Re < 10d/k$  формула (1.6) переходит в формулу (1.5) для гидравлически гладких труб, а при больших  $Re > 500d/k$  обращается в формулу (1.7) для вполне «гидравлически шероховатых» труб.

Вместо расчетных формул (1.5), (1.6) и (1.7) для определения ( $\lambda$ ) можно пользоваться графиком Г.А.Мурина.

*Местные сопротивления* представляют собой короткие участки трубопроводов, на которых происходят изменения величины и направления скоростей потока, вызванные изменением размеров и формы сечения трубопровода, а также направления его продольной оси. Потери энергии в местных сопротивлениях, отнесенные к единице веса протекающей жидкости, называются местными потерями напора. Потери в местных сопротивлениях делятся на потери трения и вихревые потери. Следует рассмотреть, как эти факторы проявляются в конкретных местных сопротивлениях.

В общем случае коэффициент местного сопротивления ( $\zeta$ ) в формуле для определения потерь в местных сопротивлениях зависит от формы местного сопротивления, относительной шероховатости стенок, распределения скоростей в граничных сечениях потока перед местным сопротивлением и после него и от чисел Рейнольдса. Следует уяснить, как эта зависимость конкретизируется для различных зон турбулентного течения и при ламинарном течении. Отметим, что в технических установках в большинстве случаев имеет место турбулентный режим, соответствующий пятой зоне квадратичного сопротивления, где коэффициент ( $\zeta$ ) не зависит от ( $Re$ ) и где проявляется автомодальность. Если в трубопроводе до и после местного сопротивления имеет место ламинарный режим (жидкости с повышенной кинематической вязкостью), то в местных сопротивлениях, как правило, возникает турбулентное течение.

Весьма существенен вопрос о взаимном влиянии местных сопротивлений. Простое суммирование потерь в местных сопротивлениях, так называемый принцип наложения потерь, дает правильные результаты, если сопротивления расположены друг от друга на расстоянии, превышающем длину взаимного влияния, составляющую (30 - 40)  $d$ .

### **1.5. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ**

Общие указания. Определение потерь напора. Понятия длинных и коротких трубопроводов. Короткие трубопроводы. Простой трубопровод, особые случаи: сифон, всасывающая труба, горизонтальная водоспускная труба. Различные виды вакуума. Длинные трубопроводы. Последовательное и параллельное соединение труб. Потери при переменном расходе. Расчет сложного трубопровода. Задача о трех резервуарах. Основы расчета замкнутого трубопровода.

#### *Методические указания*

Для гидравлического расчета трубопроводов применяется уравнение Бернулли, формулы для определения потерь напора на трение по длине и в местных сопротивлениях, уравнение постоянства расхода.

Для нахождения различных гидравлических характеристик трубопроводов применяются расчетные таблицы. К числу основных гидравлических характеристик относится расходная характеристика.

В зависимости от гидравлической схемы работы и от методов гидравлического расчета различают трубопроводы: короткие и длинные, простые и сложные, разветвленные и замкнутые, с транзитными и путевыми расходами жидкости. Следует уяснить различие между перечисленными типами трубопроводов и особенности их гидравлических расчетов. Все случаи расчета простых трубопроводов сводятся к трем типовым задачам по определению: 1) расхода, 2) напора, 3) диаметра трубопровода. Следует знать методику решения этих задач.

При расчете сложных трубопроводов составляется система уравнений, которые устанавливают связь между размерами труб, расходами жидкости и напорами. Эта система состоит из уравнений баланса расходов для каждого узла и уравнений баланса напоров (уравнений Бернулли) для каждой ветви трубопровода.

### **1.6. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ**

Истечение из малого отверстия в атмосферу при постоянном напоре. Типы сжатия струи. Величина коэффициентов. Инверсия струи. Траектория струи. Истечение из малого отверстия под уровень. Понятие малого и большого отверстия. Истечение жидкости из насадков при постоянном напоре. Типы насадков. Внешний и внутренний круглоцилиндрический насадок. Истечение в атмосферу и под постоянный уровень жидкости при переменном напоре. Свободные струи.

### *Методические указания*

Отверстие называется малым, если можно пренебречь изменением давления по его площади. Насадками называются небольшие по длине трубы  $\ell = (3 - 6)d$ , присоединенные к таким отверстиям. Прежде всего, следует уяснить характер и особенности движения жидкости в процессе истечения (сжатые струи, образование вакуума).

В гидравлике, в истечениях через отверстия и насадки есть много общего. Скорость истечения и вытекающий расход рассчитываются по общим формулам, выведенным на основе уравнения Бернулли, причем потери при истечении определяются как местные потери. Общими являются также гидравлические характеристики (коэффициенты расхода, скорости, сжатия, сопротивления).

Следует знать физический смысл коэффициентов сжатия, скорости и расхода, зависимость их числовых значений от типа и формы отверстий и насадков и от критерия Рейнольдса. Нужно также обратить внимание на то, что при  $Re > 10^5$  влияние сил вязкостного трения на коэффициенты истечения практически отсутствует (квадратическая зона сопротивления). При этом коэффициенты истечения зависят только от формы отверстий и насадков. Это позволяет с успехом использовать отверстия с острой кромкой и с насадками в качестве измерителей расхода.

При истечении при переменном напоре (опорожнение сосудов) расчетными являются формулы для определения времени опорожнения.

### **1.7. ОДНОМЕРНОЕ НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ**

Неустановившееся напорное движение жидкости. Гидравлический удар. Описание явления гидравлического удара. Расчетные зависимости для величины гидравлического удара и скорости его распространения. Прямой и отраженный гидравлические удары. Случай постепенного закрытия крана. Полный и неполный гидравлический удар.

### *Методические указания*

Гидравлическим ударом называется повышение или понижение давления в напорном трубопроводе, вызванное изменением во времени (в некотором сечении трубопровода) скорости движения жидкости. Явление гидравлического удара было теоретически и экспериментально изучено в конце XIX века Н.Е. Жуковским в связи с многочисленными авариями московского водопровода.

Гидравлический удар чаще всего возникает в случае быстрого закрытия или открытия затвора, управляющего потоком в трубопроводе. Различают: прямой удар, когда время закрытия затвора меньше фазы гидравлического удара (время пробега ударной волны от затвора к резервуару и обратно), и непрямой удар, при котором время закрытия затвора больше фазы гидравлического удара.

Формула Н.Е. Жуковского  $p = \rho \cdot C \cdot v$  дает зависимость величины ударного повышения давления ( $p$ ) от плотности жидкости ( $\rho$ ), скорости распространения ударной волны ( $C$ ), уменьшения скорости в трубе перед краном вследствие его закрытия ( $v$ ). Формула применима для расчета прямого и непрямого удара и учитывает как сжатие жидкости, так и растяжение стенок трубы при ударном повышении давления.

После уяснения физической сущности гидравлического удара и методов его расчета следует рассмотреть меры борьбы с ним.

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.8. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

Равномерное безнапорное установившееся движение воды в каналах. Особенности движения жидкости в каналах. Основное уравнение равномерного движения. Основные зависимости, используемые при расчете каналов. Формулы для определения коэффициента Шези и скоростной характеристики в квадратичной области. Гидравлические элементы живого сечения потока в канале. Гидравлически наивыгоднейший профиль трапециидального канала.

#### Методические указания

В случае равномерного безнапорного движения жидкости, пьезометрическая линия совпадает с поверхностью, т.е. соблюдаются следующие условия

$$i = i_n = J, \quad (1.8)$$

где  $i$  – уклон дна русла;  $i_n$  – уклон свободной поверхности;  $J$  – гидравлический уклон.

Это условие соблюдается при постоянных: расходе ( $Q$ ), площади живого сечения ( $\omega$ ), шероховатости ( $n$ ), смоченной поверхности русла по длине, а также при отсутствии местных сопротивлений.

Расчет каналов производится по формуле Шези:

$$Q = C \cdot \omega \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (1.9)$$

где  $C$  – коэффициент Шези;  $R$  – гидравлический радиус.

При гидравлическом расчете каналов необходимо определять коэффициент Шези ( $C$ ). Для его определения существует ряд формул. Наиболее часто используемые – формулы Н.Н.Павловского и И.И.Агроскина. Кроме того, при расчете каналов используются зависимости:

$$v = C \sqrt{Ri}, \quad (1.10)$$

$$i = \frac{v^2}{C^2 \cdot R}, \quad (1.11)$$

$$h_f = i \ell = \frac{v^2}{C^2 \cdot R} \cdot \ell, \quad (1.12)$$

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}. \quad (1.13)$$

Наиболее часто встречающиеся поперечные сечения – это трапециидальное, прямоугольное, треугольное и параболическое. Гидравлические элементы этих сечений: площадь живого сечения ( $\omega$ ), смоченный периметр ( $\chi$ ), гидравлический радиус ( $R$ ), ширина канала (трапециидального) по дну ( $b$ ), коэффициент заложения откоса (трапециидальный) ( $m$ ). Необходимо знать эти элементы и уметь определять их величины по соответствующим формулам.

Поперечный профиль живого сечения, имеющий наибольший гидравлический радиус и пропускающий расход при наименьшем сечении, называется гидравлически наивыгоднейшим профилем. Для трапециидальных каналов

$$R_{гн} = \frac{\omega_{гн}}{\chi_{гн}} = \frac{h_{гн}}{2}. \quad (1.14)$$

Из сказанного можно сделать следующий вывод о том, что среди ряда рассматриваемых вариантов поперечных сечений имеется такой промежуточный, для которого средняя скорость ( $v$ ) оказывается максимальной

$$v = v_{\text{макс}}, \quad (1.15)$$

а следовательно, площадь живого сечения ( $\omega$ ), равная ( $Q_0 / v$ ) – минимальной

$$\omega = \omega_{\text{мин}}. \quad (1.16)$$

В разделе «Гидравлически наиболее выгодное сечение» необходимо уяснить понятие относительной ширины по дну ( $\beta_{\text{гн}}$ )

$$\beta_{\text{гн}} = (b / h)_{\text{гн}}. \quad (1.17)$$

### **1.9. УСТАНОВИВШЕЕСЯ НЕРАВНОМЕРНОЕ ПЛАВНО ИЗМЕНЯЮЩЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ**

Основные понятия и определения. Основное дифференциальное уравнение установившегося неравномерного режима (первый и второй вид). Второй вид дифференциального уравнения для случая цилиндрического русла. Четыре вспомогательных понятия: удельная энергия сечения, критическая глубина, нормальная глубина и критическое состояние потока. Исследование форм свободной поверхности потока. Методы интегрирования основного дифференциального уравнения неравномерного движения. Гидравлический показатель русла. Построение кривых свободных поверхностей.

#### *Методические указания*

В этом разделе рассматривается только турбулентное движение воды, относящееся к квадратичной области сопротивления.

Неравномерное движение воды в канале возникает в случае, когда мы тем или иным путем нарушаем режим равномерного движения. Известно, что безнапорный неравномерный режим движения воды возникает, когда  $h \neq \text{const}$  (вдоль течения) и  $v \neq \text{const}$  (вдоль течения). Это возможно в том случае, когда в цилиндрическом русле (т.е. имеющим всюду одинаковое поперечное сечение) с прямым уклоном дна ( $i > 0$ ) устроить или плотину, или перепад, или установить щит. В цилиндрических руслах с уклоном ( $i = 0$ ) и ( $i < 0$ ) возможен только неравномерный режим.

В практике случаи неравномерного движения воды встречаются значительно чаще, чем случаи равномерного. При рассмотрении неравномерного плавноизменяющегося движения главным образом занимаются вопросом о построении так называемой кривой свободной поверхности. Построив кривую свободной поверхности, находят глубины ( $h$ ) воды в канале в различных сечениях, благодаря чему, может быть решен вопрос о глубине выемки канала в различных местах и т.п.

Построение кривой свободной поверхности для реки, на которой сооружается плотина, дает возможность определить размеры затопления берегов, обусловленного подпором в разных поперечных сечениях реки. Для построения кривой свободной поверхности пользуются уравнением неравномерного движения. Это уравнение в дифференциальной форме для общего случая (нецилиндрического русла) имеет вид

$$-dz = dh_v + dh_f. \quad (1.18)$$

Из этого уравнения видно, что падение свободной поверхности, т.е. уменьшение удельной потенциальной энергии, равно увеличению удельной кинетической энергии плюс потери напора.

Выражая в уравнении (1.18) каждый член соответствующим параметром, получают первый (I) и второй (II) вид дифференциальных уравнений неравномерного движения в нецилиндрических руслах. Так как в дальнейшем мы будем рассматривать только цилиндрические русла, то для них дифференциальное уравнение (II) упрощается, здесь  $\frac{d\omega}{dS} = 0$ , т.е. приращение площади живого сечения при изменении (S) равно нулю.

Для того, чтобы в дальнейшем проинтегрировать это уравнение, необходимо ввести некоторые новые понятия.

#### 1. Удельная энергия сечения

$$\Xi = h + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g}, \quad (1.19)$$

т.е. удельная энергия сечения ( $\Xi$ ) – это частное значение полной удельной энергии, подсчитанное в предположении, что плоскость сравнения проведена через нижнюю точку сечения русла.

#### 2. Критическая глубина ( $h_k$ ).

Критической глубиной называется глубина, отвечающая минимуму удельной энергии сечения. Для прямоугольного русла величину критической глубины можно получить по формуле:

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{b^2 g}}, \quad (1.20)$$

где  $b$  – ширина русла.

Необходимо знать, как определяется критическая глубина для других русел.

#### 3. Нормальная глубина ( $h_0$ ).

Нормальной глубиной называется глубина, которая при заданном расходе установилась бы в русле, если бы движение в этом русле было равномерным.

Понятия нормальной глубины ( $h_0$ ) и критической глубины ( $h_k$ ) можно рассматривать как воображаемые величины, в действительности они не существуют, однако являются удобными при введении их в дифференциальные уравнения, упрощают их интегрирование.

#### 4. Критический уклон ( $i_k$ ).

Критический уклон – это такой воображаемый уклон, который надо придать рассматриваемому цилиндрическому руслу, чтобы при заданном расходе (Q) и при равномерном движении воды в русле нормальная глубина ( $h_0$ ) оказалась равной ( $h_k$ ), т.е.  $h_0 = h_k$ .

$$i_k = \frac{q}{\alpha C_k^2} \cdot \frac{\chi_k}{B_k}, \quad (1.21)$$

где  $C_k$  – коэффициент Шези при ( $h_k$ );  $\chi_k$  – смоченный периметр при ( $h_k$ );  $B_k$  – ширина русла по верху при ( $h_k$ ).

Прежде чем перейти к интегрированию дифференциального уравнения неравномерного движения, необходимо выяснить, какой вид может иметь искомая свободная поверхность потока.

При ( $i > 0$ ) в цилиндрическом русле возможно восемь различных свободных поверхностей: а) шесть из них являются кривыми подпора; б) две – кривыми спада.

*Кривой подпора* называется такая кривая свободной поверхности, вдоль которой (по течению) глубины потока возрастают; *кривой спада* называется кривая свободной поверхности, вдоль которой глубины потока уменьшаются.

Для того, чтобы проинтегрировать дифференциальное уравнение неравномерного движения, его необходимо привести к виду удобному для интегрирования.

Одним из известных способов интегрирования дифференциального уравнения является способ, предложенный Б.А.Бахметьевым. В результате интегрирования получают так называемое уравнение Бахметьева.

Необходимо уметь применять это уравнение для случаев:  $i > 0$ ,  $i < 0$  и  $i = 0$ .

### 1.10. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

Общие сведения. Совершенный прыжок. Распределение осредненных скоростей по сечению в пределах гидравлического прыжка и послепрыжкового участка. Основное уравнение гидравлического прыжка. Формулы для сопряженных глубин прямоугольных русел. Потери энергии в прыжке. Длина прыжка и послепрыжкового участка. Отогнанный, надвинутый прыжки и прыжок в критическом состоянии.

#### Методические указания

Известно, что переход из бурного состояния в спокойное поток осуществляет через гидравлический прыжок.

Гидравлическим прыжком называется резкое увеличение глубины потока от ( $h'$ ) меньшей ( $h_k$ ), до величины ( $h''$ ) большей ( $h_k$ ). Эти глубины, ограничивающие прыжок, называются сопряженными. Характер движения воды в пределах прыжка различен. Прыжок может двигаться то вправо (вниз по течению), то влево на небольшие расстояния. В нем можно наблюдать поверхность раздела, ниже которой находится так называемая транзитная струя, резко расширяющаяся от глубины ( $h'$ ) до ( $h''$ ); выше поверхности раздела имеем поверхность - валец. Этот валец представляет собой водоворотную область, характеризующуюся беспорядочным движением.

После прыжка существует послепрыжковый участок, на котором происходит затухание пульсаций актуальных скоростей до величин, свойственных равномерному движению. Определение длины послепрыжкового участка имеет интерес при проектировании устройств нижнего бьефа плотин.

При изучении явления гидравлического прыжка необходимо выяснить его энергетическую интерпретацию.

Еще в прошлом столетии Буссинеском было найдено уравнение гидравлического прыжка. Это уравнение получило название основного уравнения прыжка. Необходимо знать вывод этого уравнения.

Используя уравнение Буссинеска, можно прийти к выводу, что при заданном расходе левая и правая части уравнения являются функциями ( $h'$ ) и ( $h''$ ). Эти функции принято называть прыжковыми.

Учитывая сказанное, записывают

$$\theta(h') = \theta(h''), \quad (1.22)$$

где  $\theta(h')$  – значения прыжковой функции, отвечающей глубине ( $h'$ );  $\theta(h'')$  – значение прыжковой функции, отвечающей глубине ( $h''$ ).

Для прямоугольного русла значение прыжковой функции имеет вид

$$\theta(h) = b \cdot \left( \frac{\alpha_0 \cdot q^2}{g \cdot h} + \frac{h^2}{2} \right), \quad (1.23)$$

где  $q$  – удельный (или единичный) расход.

Используя формулу (1.23), можно найти значения сопряженных глубин ( $h'$ ) и ( $h''$ ):

$$h' = \frac{h''}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{h_k}{h''} \right)^3} - 1 \right], \quad (1.24)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{h_k}{h'} \right)^3} - 1 \right]. \quad (1.25)$$

Для определения длины прыжка существует множество формул, однако наиболее простые, дающие средние значения, – это формулы Павловского, Сафранца, Бахметьева.

### 1.11. ВОДОСЛИВЫ

Классификация водосливов. Основная формула расхода водосливов. Коэффициент расхода. Водослив с тонкой стенкой. Типы струй, переливающихся через водослив. Условия подтопления водослива с тонкой стенкой. Учет бокового сжатия и подтопления водослива с тонкой стенкой. Учет бокового сжатия и подтопления. Использование водосливов с тонкой стенкой для измерения расхода.

Водосливы с широким порогом. Форма свободной поверхности на пороге водослива. Условия подтопления. Определение глубины на пороге водослива. Учет бокового сжатия. Водосливы практического профиля. Безвакуумные и вакуумные водосливы. Пропускная способность водослива. Истечение из-под щита. Свободное и затопленное истечение. Глубина в сжатом сечении. Затопленное истечение. Определение глубины над сжатым сечением.

#### Методические указания

Водосливом называется безнапорное отверстие (вырез, сделанный в стене), через которое протекает вода. Сама стенка называется водосливной, а область потока до стенки – верхним бьефом (ВБ); после – нижним бьефом (НБ). Величина напора на водосливе ( $H$ ), измеренная на расстоянии (3 - 5)  $H$  от стенки, называется геометрическим напором на водосливе.

Существует пять классификаций водосливов, основной из них является классификация в зависимости от формы и размеров поперечного сечения водосливной стенки, и в зависимости от влияния нижнего бьефа на истечение.

В первом случае водосливы бывают:

- а) с тонкой стенкой ( $\delta \leq (0,1 - 0,5)H$ );
- б) со стенкой практического профиля ( $0,5H \leq \delta \leq 2H$ );
- в) с широким порогом ( $2H \leq \delta \leq 8H$ ).

Во втором случае водосливы бывают:

- а) неподтопленные, когда ( $Q$ ) и ( $H$ ) не зависят от глубины воды в нижнем бьефе;
- б) подтопленные, когда ( $Q$ ) и / или ( $H$ ) зависят от глубины воды в нижнем бьефе.

Основной расчетной (водосливной) формулой является

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H_0^3, \quad (1.26)$$

где  $m$  – коэффициент расхода водослива;  $b$  – его ширина;  $H_0$  – напор на водосливе с учетом скорости подхода.



При изучении раздела «водосливы» необходимо знать, когда истечение бывает подтопленным, а когда неподтопленным, т.е. нужно знать критерии подтопления для водослива с тонкой стенкой, широким порогом и практического профиля, а также работу водосливов с учетом бокового сжатия и без него.

При расчетах водосливов с широким порогом пользуются и другой расчетной формулой:

$$Q = b \cdot h \cdot \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot (H - h)}, \quad (1.27)$$

где  $h$  – глубина воды на пороге;  $\varphi$  – коэффициент скорости.

Для определения глубины воды на пороге существуют так называемые «старые» и «новые» способы расчета, суть которых заключается в сравнении глубины ( $h$ ) на пороге с критической. Так, по Беланже

$$h = \frac{2}{3} \cdot H_0, \quad (1.28)$$

по Бахметьеву

$$h = h_k, \quad (1.29)$$

а по «новым» способам

$$h < h_k < \frac{2}{3} H_0. \quad (1.30)$$

Водосливы практического профиля разделяются на отдельные группы. Для этих групп водосливов коэффициент расхода различен. Это различие обусловлено очертаниями водосливных стенок. Так, например, водосливая грань безвакуумного водослива нормального очертания (Кригера-Офицерова) проектируется по нижней границе струи.

### **1.12. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПЛОТИНЫ**

Общие понятия и терминология сопряжения бьефов при устройстве плотин. Глубина в сжатом сечении и глубина, ей сопряженная. Формы сопряжения бьефов. Сопряжение свободной струи с потоком в нижнем бьефе; дальность отлета струи. Общие указания о гашении энергии в нижнем бьефе сооружений. Гидравлический расчет водобойных колодцев, водобойных стенок и других гасителей энергии.

#### *Методические указания*

При истечении воды через плотину возможны следующие случаи:

- 1) истечение из-под затвора (щита), установленного на гребне плотины;
- 2) перелив через плотину (затвор полностью открыт);
- 3) истечение через донное отверстие, образованное, например, поднимающимся затвором.

Глубина воды в верхнем бьефе (ВБ), с учетом скорости подхода, есть удельная энергия верхнего бьефа ( $E_0$ ) по отношению к нижнему бьефу, если дно обоих бьефов находится на одном уровне. В том случае, когда дно НБ ниже, то удельная энергия ( $E_0$ ) не является глубиной ВБ.

Толщина струи, ниспадающей с плотины, имеет наименьшее значение в некотором сжатом сечении и обозначается ( $h_c$ ), так называемая сжатая глубина.

Глубину воды, установившуюся в НБ, обозначают обычно ( $h_n$ ).

При расчете сопряжения бьефов возникают следующие задачи:

- а) в выяснении формы свободной поверхности потока, при помощи которой ниспадающая с плотины струя сопрягается с горизонтом воды НБ;

б) в установлении сил воздействия потока на различные бетонные и прочие части сооружения, устанавливаемые в НБ (для укрепления русла, регулирования потока и гашения его энергии);

в) в определении размывающей способности потока за сооружением.

Первое, с чем приходится сталкиваться при расчете сопряжения бьефов, это вопрос о величине глубины ( $h_c$ ) в сжатом сечении.

Для прямоугольного русла сжатую глубину определяют из уравнения:

$$E_0 = h_c + \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot h_c^2 \cdot \varphi_c^2} \quad (1.31)$$

Его решают методом подбора. Коэффициент скорости принимается от 0,90 до 0,98 в зависимости от вида истечения на плотине. Для упрощения расчетов в литературе приводятся специальные расчетные графики для определения ( $h_c$ ).

Сопряжение струи, ниспадающей с плотины, с нижним бьефом может происходить следующим образом (когда уклон нижнего бьефа меньше критического  $i < i_{кр}$ ):

- 1) при помощи отогнанного прыжка, когда  $h_c^* > h_n$ ;
- 2) при помощи затопленного прыжка, когда  $h_c^* < h_n$ ;
- 3) прыжок в сжатом сечении, когда  $h_c^* = h_n$ .

Здесь ( $h_c^*$ ) есть глубина, сопряженная со сжатой.

Руководствуясь экономическими соображениями, отогнанного прыжка за плотиной, в случае нескального основания, как правило, не допускают и практикуют сопряжения бьефов по типу затопленного прыжка. При отогнанном прыжке крепление НБ получается очень длинным, а следовательно, дорогостоящим.

Большая потенциальная энергия ВБ переходит за плотиной в кинетическую, в связи с чем скорости достигают больших значений, и их приходится гасить, чтобы уменьшить крепления. Следовательно, необходимо:

- а) преобразовать кинетическую энергию НБ в потенциальную, доведя ( $h_c$ ) до ( $h_n$ );
- б) погасить оставшуюся часть избыточной кинетической энергии, т.е. рассеять ее.

Специальные устройства, сооружаемые в НБ с целью гашения энергии, называются гасителями энергии.

Различают следующие типы гасителей энергии: 1) водобойный колодец; 2) водобойная стенка; 3) водобойный колодец комбинированного типа; 4) специальные гасители энергии.

При проектировании водобойного колодца необходимо установить его глубину и длину, для чего существуют специальные методы расчетов. При проектировании водобойной стенки необходимо установить ее высоту и место расположения. Комбинированный колодец сочетает в себе принципы колодца и стенки. Специальные гасители не поддаются расчетам, и их устанавливают на основании опытных данных.

При изучении этого раздела необходимо владеть методикой расчета глубины колодца, высоты стенки, а также длины колодца и места расположения стенки.

### **1.13. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СОПРЯГАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ**

Основные понятия. Классификация. Расчет одноступенчатого перепада. Быстротоки. Расчет быстротока по допустимой скорости. Гасители энергии посла быстротока.

#### *Методические указания*

На каналах, трассируемых по местности с большим уклоном, устраиваются перепады или быстротоки, т. е. короткие каналы с весьма большим уклоном, русло которых образовано прочным материалом (бетоном и т.п.).

В практике встречаются:

1) одноступенчатый перепад без водобойного колодца или с колодцем, образованным водобойной стенкой или водобойным уступом;

2) многоступенчатый перепад колодезного типа или безколодезного типа.

Перепад отличается от плотины тем, что он имеет вертикальную стенку падения, и тем, что дно русла верхнего бьефа здесь находится на большой высоте.

При проектировании одноступенчатого перепада стремятся получить затопленный прыжок. В связи с этим за перепадом часто устраивают водобойный колодец или водобойную стенку.

Расчет многоступенчатого перепада сводится к расчету трех ступеней (при любом количестве ступеней, образующих перепад):

1) первую ступень, которая может отличаться от остальных высотой ступени падения или формой верхнего водослива,

2) последнюю ступень, которая может иметь отличную от других ступеней высоту, кроме того, здесь могут быть особые условия сопряжения струи с нижним бьефом;

3) вторую ступень.

Необходимо знать общий ход расчета ступеней.

Короткие каналы, сопрягающие бьефы, в виде лотков называют быстротками (при большом уклоне дна).

Задача расчета коротких каналов обычно сводится к следующему.

*Заданы:* 1) размеры поперечного сечения канала и его продольный профиль; 2) коэффициент шероховатости стенок и дна канала; 3) отметки уровня воды в верхнем и нижнем бьефах.

*Требуется:* 1) найти расход ( $Q$ ) воды в канале; 2) построить кривую свободной поверхности потока в канале.

При построении кривой свободной поверхности потока иногда приходится устанавливать местоположение прыжка в канале.

По рассматриваемому разделу необходимо решить две задачи – одну по перепаду, вторую – по быстротку. Расчет этих сооружений приведен в [2].

#### **1.14. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ (ФИЛЬТРАЦИЯ)**

Плавно изменяющееся установившееся безнапорное движение грунтовой воды. Основной закон фильтрации. Коэффициент фильтрации и методы его определения. Равномерное и неравномерное движение грунтовых вод. Дифференциальное уравнение неравномерного движения грунтовых вод. Формы кривых депрессии. Интегрирование дифференциального уравнения для случая плоской задачи.

Приток грунтовой воды к водосборным сооружениям. Приток к одиночной совершенной галерее и дрене. Приток грунтовой воды к круглым одиночным колодцам. Фильтрация воды через земляные плотины.

##### *Методические указания*

Водопроницаемый грунт состоит из отдельных частиц, между которыми имеются поры. Суммарный объем пор составляет часто 35-40% от объема всего грунта. Явление движения воды в этих порах называется *фильтрацией*.

Скорость фильтрации в случае установившегося движения может быть представлена зависимостью, называемой формулой Дарси и выражающей основной закон ламинарной фильтрации

$$u = k J, \quad (1.32)$$

где  $u$  - скорость фильтрации;  $k$  - коэффициент фильтрации;  $J$  – пьезометрический уклон.

Формулу (1.32) можно представить в виде

$$Q = \omega k J. \quad (1.33)$$

Для определения коэффициента фильтрации существует три метода: 1) лабораторный; 2) расчетный; 3) полевой.

Численные значения ( $k$ ) встречаются в практике самые различные. Они колеблются от 100 (песок крупнозернистый) до 0,001 м/сут (глина).

Неравномерное плавно изменяющееся движение воды описывается формулой Дюпюи:

$$v = -k \frac{dH}{dS}, \quad (1.34)$$

где  $v$  – средняя скорость в рассматриваемом плоском вертикальном живом сечении;  $H$  – возвышение точки кривой депрессии, принадлежащее данному плоскому сечению, под произвольной горизонтальной плоскостью сравнения;  $\frac{dH}{dS}$  – уклон кривой депрессии в точке, принадлежащей данному живому сечению.

Формула Дюпюи выражает среднюю скорость ( $v$ ) в данном плоском вертикальном живом сечении равной уклону свободной поверхности в этом сечении, умноженному на коэффициент фильтрации.

Для построения кривых свободных поверхностей грунтового потока интегрируют дифференциальное уравнение неравномерного плавноизменяющегося движения в цилиндрическом русле. Это уравнение имеет вид

$$Q = \omega \cdot k \cdot \left( i - \frac{dh}{ds} \right), \quad (1.35)$$

где  $h$  – глубина воды в рассматриваемом сечении;  $\omega$  – площадь живого сечения;  $i$  – уклон дна русла.

При интегрировании рассматривают случаи:

1) с прямым уклоном дна; 2) горизонтальное русло.

В практике чаще всего встречаются случаи с горизонтальным уклоном дна. Удельный расход воды, фильтрующийся через грунтовый массив, в этом случае выражается формулой:

$$q = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} k, \quad (1.36)$$

где  $h_1$  – глубина воды в верхнем бьефе;  $h_2$  – глубина воды в нижнем бьефе;  $L$  – расстояние между бьефами.

Используя формулу (1.36), определяют приток воды к водосборным галереям, дренам и колодцам.

При строительстве водохранилищ часто устраивают земляные плотины. Фильтрация воды через тело плотины может быть значительной. Определение расхода фильтрующейся воды через однородную плотину осуществляется в зависимости от условий устройства плотины. Она может быть устроена на водопроницаемом и водонепроницаемом основании. При устройстве плотины на непроницаемом основании, для определения ( $q$ ) используется система уравнений.

## 2. ЗАДАНИЕ

### на расчетно-графические работы по курсу «Гидравлика»

Каждый студент решает 5 задач, объединенных в группу, которая выбирается из таблицы 2.1 по последней цифре номера зачетной книжки.

Таблица 2.1 Номера задач для выполнения расчетно-графических работ

Последняя цифра зачетной книжки	Номера задач					
	1	1	5	9	13	17
2	2	6	10	14	18	
3	3	7	11	15	19	
4	4	8	12	16	17	
5	1	5	12	13	19	
6	2	7	11	14	18	
7	3	6	10	15	20	
8	4	6	9	16	19	
9	3	8	10	14	17	
0	2	8	11	13	18	

Решение задач производится по вариантам, которые представлены в каждой задаче, и выполняется по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

Расчетно - графическое задание выполняется на стандартных листах бумаги формата А4 согласно стандарту БГТУ.

### ЗАДАЧА 1

Открытые сообщающиеся сосуды (рис.2.1) заполнены различными жидкостями ( $\rho_1$ ) и ( $\rho_2$ ). Найти:

- а) расстояние от линии раздела АВ до уровня жидкости в каждом сосуде ( $h_1$ ) и ( $h_2$ ), если разность уровней жидкостей в сосудах ( $h$ );
- б) разность уровней ( $h$ ) при ( $h_1$ ).

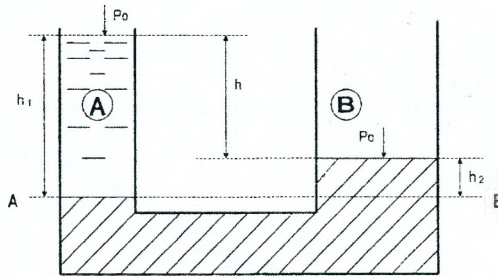


Рис.2.1

Таблица 2.2. Исходные данные к задаче 1.

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Жидкость 1	Эфир этиловый	Спирт этиловый	Спирт метиловый	Скипидар	Ацетон	Бензин	Керосин	Масло веретенное	Масло машинное	Масло трансформаторное
Жидкость 2	Вода, $t=20^\circ\text{C}$	Глицерин	Ртуть	Вода $t=4^\circ\text{C}$	Вода $t=10^\circ\text{C}$	Вода $t=0^\circ\text{C}$	Глицерин безводный	Вода $t=50^\circ\text{C}$	Ртуть	Вода морская
$h_1, \text{см}$	5	8	14	15	18	10	11	15	10	18
$h_2, \text{см}$	20	15	30	25	18	40	18	25	30	40

### ЗАДАЧА 2

Определить силу давления и ее точку приложения на затвор, перекрывающий отверстие донного водовыпуска, в двух случаях:

- 1) затвор прямоугольный (рис. 2.2);
- 2) затвор треугольный, вершиной вверх (рис 2.3).

Ширина затвора ( $b$ ), глубина погружения его верхней кромки ( $a$ ) и нижней ( $h$ ). Угол наклона затвора ( $\alpha$ ). За затвором воды нет.

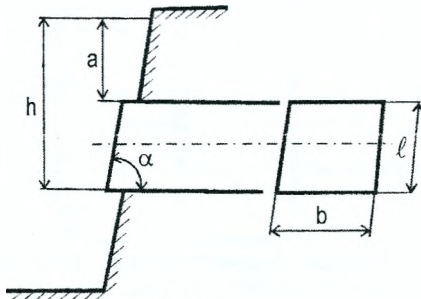


Рис. 2.2

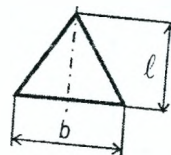


Рис. 2.3

Таблица 2.3 Исходные данные к задаче 2

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$b$ , м	1,0	3,0	2,5	3,0	4,5	6,0	3,2	8,4	5,0	2,5
$a$ , м	0,8	0,9	1,0	1,2	0,7	0,8	0,9	1,4	1,1	0,8
$h$ , м	2,0	4,0	5,0	4,5	6,2	10,0	7,5	10,2	9,5	5,5
$\alpha$ , град	60	45	60	45	60	45	35	45	60	45

### ЗАДАЧА 3

Стальной трубопровод диаметром ( $d$ ) должен выдержать гидростатическое давление ( $p$ ). Допустимое напряжение ( $\sigma$ ).

Определить минимальную толщину стенок трубопровода ( $b$ ).

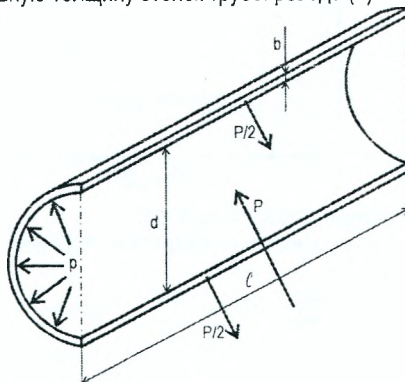


Рис. 2.4

Таблица 2.4 Исходные данные к задаче 3

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d$ , м	0,8	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6	0,7	0,8	0,5	0,7
$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	1400	1200	1300	900	1500	1350	1460	1680	850	1350
$\rho$ , кгс/см <sup>2</sup>	25,0	20,0	22,0	15,0	30,0	28,0	30,0	35,0	25,0	30,0

### ЗАДАЧА 4

Определить аналитическим и графоаналитическим способами положение центра давления и величину силы давления воды на прямоугольную вертикальную стенку шириной ( $b$ ), если глубина воды перед стенкой ( $h_1$ ), а за стенкой ( $h_2$ ).

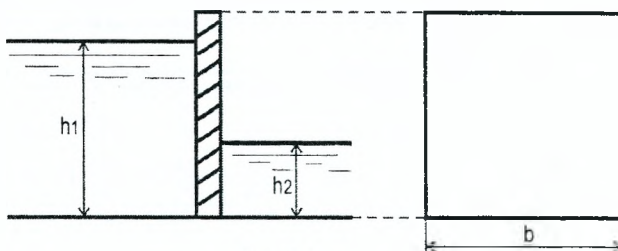


Рис. 2.5

Таблица 2.5 Исходные данные к задаче 4

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$b$ , м	2,0	4,0	5,0	7,0	3,0	5,0	8,0	3,0	4,0	10,0
$h_1$ , м	3,0	6,0	8,0	9,0	7,0	9,0	11,0	6,0	9,0	12,0
$h_2$ , м	6,5	1,0	2,0	2,5	1,5	3,0	3,5	1,6	3,5	4,0

### ЗАДАЧА 5

По трубопроводу, имеющему сужение, протекает идеальная жидкость расходом ( $Q$ ). Показания пьезометров ( $h_1$ ) и ( $h_2$ ), диаметр суженной части ( $d_2$ ). Определить диаметр ( $d_1$ ) трубопровода, построить пьезометрическую и напорную линии для участка трубопровода между пьезометрами.

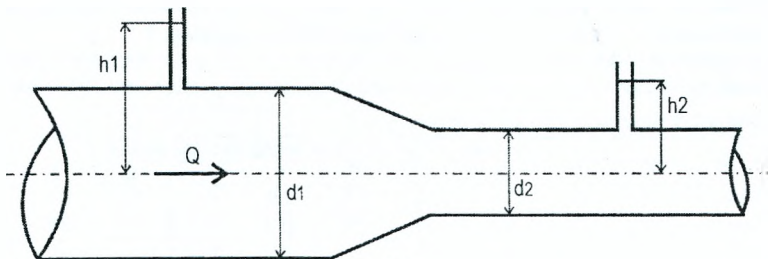


Рис. 2.6

Таблица 2.6 Исходные данные к задаче 5

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , л/с	10	19	80	86	40	6	25	52	20	15
$h_1$ , м	3,0	3,5	4,2	3,6	2,8	1,4	3,5	4,8	2,4	4,0
$h_2$ , м	2,0	3,0	3,4	2,7	2,4	1,1	3,1	3,9	1,8	2,2
$d_2$ , мм	50	80	150	150	125	50	100	125	80	50

### ЗАДАЧА 6

По наклонному трубопроводу диаметром ( $d$ ) подается вода в количестве ( $Q$ ). Давление воды в начальном участке сечения трубопровода ( $p_1$ ). Определить давление во втором сечении, расположенном на расстоянии ( $L$ ) от начального, учитывая, что центр тяжести второго сечения расположен на 5 м ниже центра тяжести начального сечения. Начертить пьезометрическую линию для участка трубопровода между сечениями.

Таблица 2.7 Исходные данные к задаче 6

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d$ , мм	200	250	125	150	250	300	125	100	80	350
$Q$ , л/с	45	70	30	22	70	100	15	12	80	140
$p_1$ , кН/м <sup>2</sup>	100	98	122	58	132	160	180	98,4	105	93,5
$L$ , м	100	190	75	50	150	150	40	45	50	240

### ЗАДАЧА 7

Трубопровод, имеющий в сечении 1–1 диаметр ( $d_1$ ), постепенно расширяется до диаметра ( $d_2$ ) в сечении 2–2. Центр тяжести сечения 1–1 расположен на 3 м ниже центра сечения 2–2. Расход воды, пропускаемый по трубопроводу, равен ( $Q$ ). Принимая величину потерь напора ( $h_f$ ), определить разность давлений между сечениями, построить напорную линию для участка трубопровода между сечениями 1–1 и 2–2.

Таблица 2.8. Исходные данные к задаче 7

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d_1$ , мм	20	20	25	30	30	15	20	25	30	20
$d_2$ , мм	30	50	35	45	50	30	45	45	45	50
$h_f$ , м	3,8	2,4	1,5	2,0	3,3	1,8	2,6	2,9	2,3	4,0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,002	0,003	0,0015	0,0025	0,0034	0,0011	0,0023	0,0035	0,0028	0,0035

### ЗАДАЧА 8

По горизонтальной трубке переменного сечения ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ) протекает идеальная жидкость плотностью  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup> с расходом ( $Q$ ). Давление в сечении 1-1 – ( $p$ ).

Определить пьезометрические высоты в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 и построить напорную и пьезометрическую линии для участка трубопровода между указанными сечениями.

Таблица 2.9 Исходные данные к задаче 8

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$p$ , кг/см <sup>2</sup>	3,0	2,6	3,1	3,3	2,5	2,9	4,0	3,5	4,1	2,7
$d_1$ , мм	100	150	100	200	200	250	250	200	200	250
$d_2$ , мм	25	40	50	50	75	40	100	75	40	50
$d_3$ , мм	75	75	75	100	100	100	150	100	75	75
$Q$ , л/с	10	18	12	24	35	16	40	35	15	20



### ЗАДАЧА 9

Определить диаметр трубы для пропуска расхода воды ( $Q$ ) при заданной глубине ( $h$ ) и длине трубы ( $L$ ) (рис. 2.7). Уровень в резервуаре постоянный, скоростным напором в резервуаре пренебречь. На каком расстоянии от конца трубы находится сечение, в котором вакуум равен  $0,5 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>? Коэффициент Дарси рассчитать по формуле:  $\lambda = 0,02 + 0,0005/d$ .

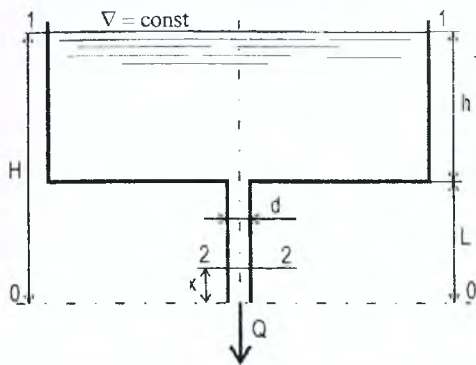


Рис.2.7

Таблица 2.10 Исходные данные к задаче 9

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,010	0,008	0,012	0,006	0,004	0,013	0,011	0,015	0,009	0,016
$h$ , м	0,80	0,90	0,95	1,00	1,20	0,23	0,70	1,10	0,96	1,40
$L$ , м	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5

### ЗАДАЧА 10

Определить напор ( $H$ ), который необходимо поддерживать в резервуаре, чтобы расход воды, пропускаемый по трубопроводу диаметром ( $d$ ), равнялся ( $Q$ ). Угол открытия крана ( $\alpha$ ), длина трубы ( $L$ ). На трубопроводе имеется четыре поворота под углом  $90^\circ$ ,  $r/R_3=0,5$ .

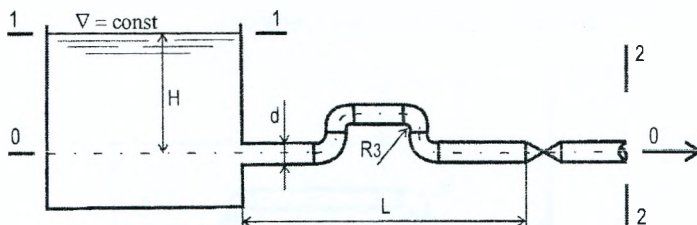


Рис. 2.8

Таблица 2.11 Исходные данные к задаче 10

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,015	0,014	0,012	0,010	0,008	0,006	0,090	0,070	0,050	0,013
$d$ , м	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,09	0,08	0,04	0,11
$\alpha$ , град.	60	50	40	30	20	10	30	20	50	10
$L$ , м	90	80	70	60	50	40	30	20	15	75

### ЗАДАЧА 11

На берегу реки предполагается установить насос для подачи воды из реки расходом ( $Q$ ). Определить расстояние от оси насоса до уровня воды в реке ( $h_a$ ). Длина всасывающей трубы ( $L$ ), трубы стальные новые. На всасывающей трубе установлен приемный клапан с сеткой, имеются три поворота трубы под углом  $90^\circ$ , с закруглением  $r/R_3$ . Допустимая вакуумметрическая высота ( $h_{\text{вак}}$ ).

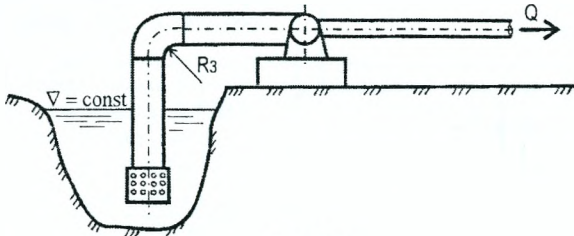


Рис. 2.9

Таблица 2.12 Исходные данные к задаче 11

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,008	0,009	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,025	0,030
$L, \text{ м}$	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8
$r/R_3$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$h_{\text{вак}}, \text{ ДМ}$	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,4	5,8

### ЗАДАЧА 12

Определить разность уровней в баке ( $Z$ ), которая обеспечивает расход воды ( $Q$ ) по трубопроводу диаметром ( $d$ ). Степень открытия задвижки на трубопроводе ( $a/d$ ). Длина трубы ( $L$ ). На трубопроводе имеются четыре поворота с углами  $90^\circ$  со степенью закругления  $r/R_3=0,7$ . Скоростными напорами в баках пренебречь.

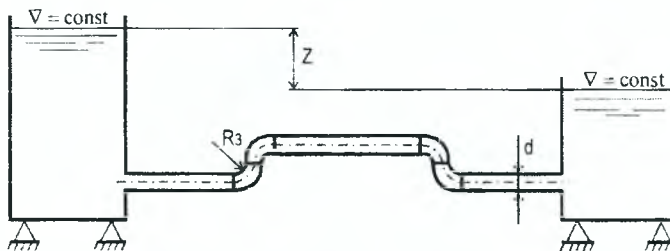


Рис. 2.10

Таблица 2.13 Исходные данные к задаче 12

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022	0,024	0,025
$d, \text{ м}$	0,10	0,08	0,06	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24
$a/d$	1/4	3/8	4/8	5/8	3/4	7/8	1	1/4	3/8	1/2
$L, \text{ м}$	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180

### ЗАДАЧА 13

Какую ширину по дну должен иметь трапецеидальный канал длиной ( $L$ ), если для пропуска расхода ( $Q$ ), при глубине наполнения ( $h$ ) используется разность отметок дна ( $H$ )? Коэффициент шероховатости  $n=0,020$ .

Таблица 2.14 Исходные данные к задаче 13

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$L$ , км	5,0	8,0	10,0	12,0	15,0	6,0	9,0	10,0	12,0	11,0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	10	15	12	19	30	9	18	6	40	5
$h$ , м	1,2	1,8	1,4	2,0	2,7	1,4	1,6	1,1	4,3	1,0
$H$ , м	2,0	3,2	6,0	4,8	3,0	9,6	4,5	4,2	3,6	5,0
Грунты	песок мелк.	супесь	суглинок	песок средн.	супесь плотн.	суглинок	тяж. сугл.	торф	глина	сугл. легкий

### ЗАДАЧА 14

Определить глубину трапецеидального канала, который пропускает расход ( $Q$ ), ширина по дну ( $b$ ). Уклон дна канала ( $i$ ) проверить из условия неразмыва русла канала.

Таблица 2.15 Исходные данные к задаче 14

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,5	0,8	1,2	1,5	3,0	3,5	4,0	2,0	1,0	5,0
$b$ , м	0,4	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	0,8	0,8	0,6	2,0
$i$	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0008	0,001	0,002	0,0008	0,0004	0,001
Грунты	песок пылев.	глина	супесь	суглинок	песок мелк.	песок средн.	песок крупн.	суглинок	гравий	глина
Условия содержания канала	норм. состояние	выше средн.	средние	плохие	средние	сравнительно плохие	выше средн.	норм. сост.	затянут илист. пленкой	выше средн.

### ЗАДАЧА 15

Рассчитать трапецеидальный канал при известных величинах: ( $Q$ ), ( $m$ ), ( $n$ ), ( $i$ ), ( $\beta$ ).

Таблица 2.16 Исходные данные к задаче 15

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	1,0	1,5	1,76	2,0	2,2	1,8	5,0	18,0	20,0	3,0
$i$	0,0003	0,0004	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0007	0,0008	0,0010	0,0006
$n$	0,020	0,014	0,017	0,0275	0,025	0,0275	0,030	0,020	0,025	0,0225
$\beta$	2,6	3,8	2,2	3,1	1,95	2,5	3,4	4,2	4,5	3,0
Грунты	сугл. средн.	супесь	песок мелк.	песок крупн.	супесь плотн.	торф	глина	сугл. легкий	песок крупн.	песок средн.

### ЗАДАЧА 16

Рассчитать параболический канал гидравлически наивыгоднейшего профиля при известных величинах: ( $Q$ ), ( $n$ ), ( $i$ ).

Таблица 2.17 Исходные данные к задаче 16

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	5,0	8,0	12,0	16,0	20,0	25,0	19,0	14,0	9,0	6,0
$i$	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0010	0,0009	0,0015	0,0004	0,0003	0,0006
$n$	0,020	0,0225	0,025	0,020	0,0225	0,025	0,0275	0,0225	0,030	0,020

### ЗАДАЧА 17

Рассчитать быстроток на пропуск расхода ( $Q$ ) при следующих условиях: подводящий и отводящий канал имеют ширину по дну ( $b_k$ ), коэффициент откоса ( $m$ ), бытовая (нормальная) глубина ( $h_0$ ). Ширина быстротока ( $b$ ), длина ( $L$ ), коэффициент откоса  $m=0$ , материал - бетон, коэффициент шероховатости ( $n$ ).

Необходимо:

- определить высоту входного порога из условия обеспечения ( $h_0$ ) в подводящем канале;
- рассчитать кривую свободной поверхности на водоскате;
- определить характер сопряжения в нижнем бьефе (в случае необходимости рассчитать водобойный колодец);
- построить профиль потока по оси сооружения и план по полученным размерам.

Таблица 2.18 Исходные данные к задаче 17

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	16	10	12	14	9	15	13	12	9	15,8
$b_k$ , м	5,0	5,0	6,0	6,4	4,8	6,2	6,2	3,8	6,0	4,2
$m$	2,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	2,0	2,5	1,5	2,0
$h_0=h_0$ , м	2,0	1,5	1,9	1,8	1,6	1,9	1,4	1,8	1,5	1,8
$b$ , м	4,0	4,0	5,0	5,4	3,8	5,2	5,2	2,8	5,0	3,2
$L$ , м	150	148	160	152	140	130	122	155	180	175
$n$	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017

### ЗАДАЧА 18

По лотку прямоугольного сечения шириной ( $b$ ) пропускает расход ( $Q$ ). Часть лотка необходимо запроектировать в виде бетонного быстротока ( $n=0,017$ ) при отметках верхнего бьефа ( $H_1$ ) и нижнего ( $H_2$ ). В лотке перед быстротоком должна быть обеспечена глубина ( $h$ ). Ширина быстротока на всем протяжении одинаковая и равна ширине лотка. Входная часть выполнена водосливом с широким порогом (уклон быстротока определить из условия допустимой скорости на водоскате  $v=10$  м/с).

Выполняя расчет, необходимо определить:

- уклон, с которым необходимо выполнить водоскат и его длину;
- рассчитать кривую свободной поверхности на водоскате;
- рассчитать сопряжение с НБ;
- вычертить продольный профиль и план сооружения по размерам.

Таблица 2.19 Исходные данные к задаче 18

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	5,2	4,8	8,4	5,8	6,2	4,6	5,8	8,4	7,8	7,6
$b$ , м	3,0	2,8	3,2	3,6	2,6	3,2	3,4	3,2	2,9	3,5
$H_1$ , м	18,0	18,4	20,0	24,2	18,6	15,0	12,4	12,6	28,6	32,2
$H_2$ , м	10,0	10,2	12,4	12,8	11,4	8,4	4,2	4,2	21,4	24,6
$h$ , м	1,40	1,20	1,70	1,40	1,32	1,25	1,30	1,50	1,82	1,58

### ЗАДАЧА 19

Выполнить гидравлический расчет быстротока. Расчетные данные: расход быстротока ( $Q$ ), длина ( $L$ ), уклон  $i=0,07$ , коэффициент шероховатости  $n=0,017$ , вход в виде водослива с широким порогом при  $P=0,3$  м. Подводящий и отводящий каналы трапецеидальные с шириной по дну ( $b_k$ ), нормальной глубиной ( $h_0$ ), коэффициент откоса  $m=1,5$ .

Выполняя расчет, определить:

- ширину быстротока ( $b$ ), исходя из условия обеспечения в подводящем канале  $v=1,2$  м/с;
- определить глубину в конце водоската, рассчитав кривую свободной поверхности на быстротоке;
- рассчитать (в случае необходимости) водобойную стенку для создания условий образования подтопленного прыжка в НБ;
- вычертить продольный профиль и план сооружения по размерам.

Таблица 2.20 Исходные данные к задаче 19

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	20,2	18,0	16,0	22,0	20,0	24,0	17,0	16,0	18,0	19,4
$L$ , м	120	124	118	125	110	115	122	110	115	116
$b_k$ , м	6,0	6,4	7,0	7,2	6,2	5,8	7,4	8,0	7,2	6,8
$h_0$ , м	1,8	2,0	2,2	1,8	2,0	2,4	2,3	1,85	1,64	2,1

### ЗАДАЧА 20

Запроектировать быстроток прямоугольный бетонный шириной ( $b$ ) и глубиной ( $h_0$ ), с уклоном  $i=0,15$  для пропуска расхода ( $Q$ ). Коэффициент шероховатости  $n=0,017$ . Ширина канала подводящего и отводящего равна ширине быстротока,  $m=2,0$ .

При этом установить характер сопряжения с нижним бьефом, решить вопрос устройства сооружения для гашения энергии потока (в случае необходимости), рассчитать кривую свободной поверхности, вычертить по расчетным данным профиль сооружения и план.

Таблица 2.21 Исходные данные к задаче 20

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$b$ , м	4,10	2,80	3,20	4,60	2,60	4,20	3,80	3,60	4,00	4,20
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	12,4	12,8	10,4	11,8	12,6	9,4	11,6	10,8	10,2	12,9
$h_0$ , м	1,80	1,40	1,84	1,90	2,00	1,60	1,20	1,34	1,58	1,28

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

#### ЗАДАЧА 1

При решении этой задачи необходимо использовать основное свойство гидростатического давления и записать уравнения равновесия относительно плоскости АВ.

#### ЗАДАЧА 2

Основной способ решения задачи – аналитический. Сила гидростатического давления, действующая, на плоские поверхности равна

$$P = \gamma \cdot h_{\text{цт}} \cdot \omega, \quad (3.1)$$

где  $h_{\text{цт}}$  - глубина погружения центра тяжести данной плоской поверхности (затвора) под уровень воды (для случая прямоугольника центр тяжести находится на пересечении диагоналей; для треугольника – на пересечении медиан, для равностороннего – на расстоянии  $2/3$  от вершины угла);  $\omega$  - площадь плоской поверхности, на которую действует вода.

Зная угол наклона ( $\alpha$ ), необходимо найти величину ( $\ell$ ), которая будет равна

$$\ell = \frac{h - a}{\sin \alpha}. \quad (3.2)$$

По ( $\ell$ ) и (b) определяют площадь прямоугольника и треугольника.

Точка приложения силы гидростатического давления определяется по уравнению

$$h_{\text{цд}} = h_{\text{цт}} + \frac{I}{\omega \cdot h_{\text{цт}}}, \quad (3.3)$$

где  $I$  - момент инерции затвора вокруг горизонтальной оси.

При решении этой задачи необходимо составить расчётную схему.

#### ЗАДАЧА 3

Решение этой задачи нужно произвести, используя пояснение [1] стр. 49, 1972; стр. 62, 1982.

#### ЗАДАЧА 4

Составляется расчётная схема. Равнодействующая сила гидростатического давления, действующая на вертикальную плоскую стенку, будет равна

$$P = P_1 - P_2, \quad (3.4)$$

где  $P_1$  - сила гидростатического давления, действующая слева;  $P_2$  - сила гидростатического давления, действующая справа.

Обе эти силы определяются по формуле, приведённой в задаче 2.

Точку приложения силы гидростатического давления находят из уравнения моментов, составленных для сил, действующих на затвор. Для того чтобы составить уравнение моментов, необходимо вначале определить точки приложения силы ( $P_1$ ) и ( $P_2$ ) (формула в задаче 2).

При графическом способе решения в масштабе составляют расчётную схему затвора. Строят эпюру гидростатического давления. Точка приложения силы находится в плоскости на расстоянии ( $2/3 h$ ) от поверхности воды. Результирующая сила будет равна площади суммарной эпюры. В данном случае – площадь трапеции. Точка приложения результирующей силы будет проходить через центр тяжести трапеции. Графическим способом находят центр тяжести трапеции и проводят силу ( $P$ ).

Величина силы ( $P$ ), найденная обоими способами, должна быть равной.

### ЗАДАЧА 5

При решении этой задачи необходимо использовать уравнение Бернулли для идеальной жидкости и уравнения неразрывности для потока, записанные для двух сечений

$$\left. \begin{aligned} z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} &= z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \\ \omega_1 v_1 &= \omega_2 v_2 = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Для круглой трубы площадь равна  $\left( \frac{\pi d^2}{4} \right)$ .

### ЗАДАЧА 6

Записывается уравнение Бернулли для двух сечений, приняв за плоскость сравнения, плоскость, проходящую через центр тяжести сечения 2-2

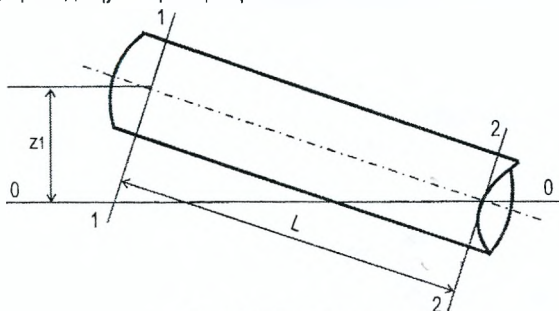


Рис. 3.1. Расчётная схема

Потери напора по длине определяются как для «коротких» труб. Коэффициент гидравлического трения ( $\lambda$ ) зависит от области сопротивления, для чего необходимо найти число Рейнольдса. Трубы принимаются новые, стальные.

### ЗАДАЧА 7

Записывается уравнение Бернулли для двух сечений, приняв за плоскость сравнения плоскость, проходящую через центр тяжести первого сечения. Потери напора при резком расширении определяются по формуле:

$$h_{pp} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (3.6)$$

### ЗАДАЧА 8

Записывается уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2. Отсюда определяется  $\left( \frac{p_2}{\gamma} \right)$ , затем для сечений 2-2 и 3-3 находится  $\left( \frac{p_3}{\gamma} \right)$ . При решении уравнения скорость ( $v$ ) и скоростной напор  $\left( \frac{v^2}{2g} \right)$  определяется по заданному расходу и диаметрам.

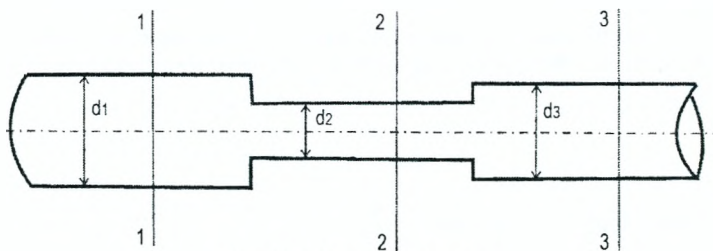


Рис. 3.2. Расчетная схема

### ЗАДАЧА 9

Для определения диаметра трубы составляется уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 0-0, приняв за плоскость сравнения плоскость 0-0

$$h + \ell = \frac{v^2}{2g} + h_f, \quad (3.7)$$

где  $h_f$  - потери напора в трубе

$$h_f = h_j + h_\ell. \quad (3.8)$$

Здесь

$$h_j = \zeta_{\text{вх}} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.9)$$

$h_\ell$  - потери по длине

$$h_\ell = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (3.10)$$

Скорость  $\left( v = \frac{4Q}{\pi d^2} \right)$  зависит от диаметра, поэтому, подставляя необходимые значения в уравнение Бернулли, дальнейшее решение производят методом подбора. Задаваясь стандартным диаметром ( $d$ ), определяют величину правой части уравнения и сравнивают ее с левой.

Для определения расстояния ( $x$ ) до сечения, в котором вакуум равен  $0.5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ , составляют уравнение Бернулли для сечений 2-2 и 0-0. Потери напора от сечения 2-2 до 0-0 принимают как потери по длине на расстоянии ( $x$ ).

### ЗАДАЧА 10

Напор ( $H$ ) находится из уравнения Бернулли, записанного для сечений 1-1 и 2-2, приняв за плоскость сравнения плоскость 0-0

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_f, \quad (3.11)$$

где  $h_f$  - потери напора на участке 1-1 - 0-0

$$h_f = h_j + h_\ell, \quad (3.12)$$



$$h_l = \sum \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.13)$$

где  $\sum \zeta$  - суммарный коэффициент потерь напора в трубе;  $h_l$  - потери по длине (определяются по формуле Дарси-Вейсбаха (см. предыдущую задачу)).

Коэффициент гидравлического трения ( $\lambda$ ) определяется по формуле (1.6) раздела 1.4 настоящих методических указаний.

### ЗАДАЧА 11

Записав уравнение Бернулли для сечения 1–1, проходящего по уровню воды в реке и сечения 2-2, проходящего через ось насоса, (плоскость сравнения 0-0, проходящая через сечение 1-1), можно найти ( $h_B$ )

$$\frac{p_a}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_B + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f, \quad (3.14)$$

$v_1 \approx 0$ , скорость во втором сечении нельзя определить, так как диаметр всасывающей трубы неизвестен. Поэтому вначале принимается рекомендуемая скорость для всасывающих труб  $v = (0,8 - 1,0)$ , м/с и определяется ( $d$ ). Полученный диаметр сравнивают со стандартным (50, 60, 75, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000) мм. Приняв стандартный диаметр, определяют действительную скорость в трубе. Потери ( $h_f$ ) определяются аналогично, как и в задаче 10.

### ЗАДАЧА 12

Составляется уравнение Бернулли для соответствующих сечений при истечении под уровень (см. [1] стр.216) и дальнейшее решение производится по аналогии с задачей 10.

### ЗАДАЧИ 13 - 14

Эти задачи решаются подбором по уравнению  $Q = \omega \cdot c \cdot \sqrt{Ri}$ , задаваясь рядом значений ( $b$ ) или ( $h$ ). Расчет лучше вести в табличной форме (таблица 3.1).

По данным таблицы 3.1 строится график  $Q=f(b)$  и  $Q=f(h)$ . По графику для заданного расхода определяется требуемая величина ( $h$ ) или ( $b$ ).

Таблица 3.1 Расчёт канала

$b(h),$ м	$\omega = (b + mh)h,$ м <sup>2</sup>	$\chi = b + mh\sqrt{1 + m^2},$ м	$R = \frac{\omega}{\chi},$ м	$C = \frac{1}{n} + 17,72 \cdot \lg R,$ м <sup>0,5</sup> /с	$C\sqrt{R}$	$Q = \omega C\sqrt{Ri},$ м <sup>3</sup> /с
1	2	3	4	5	6	7

Правильность расчета можно проверить, например, по способу Н.Н.Агроскина. Вычисляется  $F(R_{гн}) = \frac{1}{4 \cdot m_0} \cdot \frac{Q}{\sqrt{i}}$ , по функции в таблице X [2] находится ( $R_{гн}$ ). Зная ( $R_{гн}$ ), определяет-

ся отношение, например,  $\left(\frac{b}{R_{гн}}\right)$  и по таблице XI находится  $\left(\frac{h}{R_{гн}}\right)$ . Отсюда  $h = \frac{h}{R_{гн}} \cdot h_{гн}$ .

В задаче 13 коэффициент заложения откоса определяют по справочной литературе в зависимости от грунта, например, [3], таблица 8-1.

В задаче 14 коэффициент шероховатости выбирают по условиям содержания канала, например, [2], таблица 2.

### ЗАДАЧИ 15 - 16

Расчет этих задач приведен в [2] стр. 221-224.

### ЗАДАЧИ 17 - 20

При решении этих задач необходимо рассчитать быстроток. Расчет быстроток заключается в расчете входа, водоската и выхода. Расчет входа и выхода аналогичен расчету соответствующих частей перепада. Лишь для задачи 17 глубина водобойного колодца рассчитывается следующим образом:

$$d = h_c^* - h_0, \quad (3.15)$$

$$E_0 = h + d + \frac{v^2}{2g}, \quad (3.16)$$

где  $h$  - глубина воды в конце водоската;  $v$  - скорость на водоскате.

Определяют  $\Phi(\tau_c^*)$ ,  $(h_c^*)$  и новое  $(d)$ .

Уточнение глубины  $(d)$  проводят до тех пор, пока разность между последней и предыдущей величиной составит менее 5%.

Длина водобойного колодца

$$L_k = \ell_{\text{пад}} + \ell_{\text{пр}}, \quad (3.17)$$

$$\ell_{\text{пад}} = v \cdot \sqrt{\frac{2P}{g}}, \quad (3.18)$$

где

$$P = d + \frac{h}{2}, \quad (3.19)$$

$$\ell_{\text{пр}} = 3 \cdot h_c^*. \quad (3.20)$$

Расчет водоската заключается в определении уклона  $(i)$ , в задачах 17, 18; в 19 и 20 он задан, и расчета длины кривой свободной поверхности на водоскате.

Уклон водоската определяют исходя из допустимой скорости, принимая  $v = 10 \text{ м/с}$  находят  $\omega = \frac{Q}{v}$  и тогда глубина  $h = \frac{\omega}{b}$ ;

Используя уравнение Шези, находят

$$i = \frac{v^2}{C^2 \cdot R}, \quad (3.21)$$

или

$$\sqrt{i} = \frac{v}{C \sqrt{R}}, \quad (3.22)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.23)$$

Величину  $(C \sqrt{R})$  можно определить по  $(R)$  в таблице X [2]. В задаче 18 необходимо еще определить длину водоската

$$\ell = \frac{H_1 - H_2}{i} \quad (3.24)$$

В задачах 19 и 20 глубину воды ( $h$ ) на водоскате, которая установится в случае равномерного движения, можно определить по способу Н.Н.Агроскина.

Первоначально определяют функцию от гидравлически наивыгоднейшего радиуса

$$F(R_{гн}) = \frac{1}{4m_0} \cdot \frac{Q}{\sqrt{i}}, \quad (3.25)$$

где  $m_0$  - можно определить по таблице X\* [2] в зависимости от заданного заложения откосов ( $m$ ).

Зная  $F(R_{гн})$ , по таблице X [2] определяют ( $R_{гн}$ ). Находят отношение  $\left(\frac{b}{R_{гн}}\right)$  и по таблице XI [2], определяют  $\left(\frac{h}{R_{гн}}\right)$ , и тогда  $h = R_{гн} \cdot \left(\frac{h}{R_{гн}}\right)$ .

Для построения кривой свободной поверхности на быстротоке необходимо знать граничные глубины ( $h_{гп1}$ ) - начала кривой и ( $h_{гп2}$ ) - конца кривой. В нашем случае для всех задач первоначально принимается  $h_{гп2} = h + 0,01$ , т.е. на определенной длине водоската устанавливается равномерный режим с глубиной ( $h$ ), а кривая свободной поверхности заканчивается (условно) на глубине большей глубины равномерного режима на 1 см.

Глубина начала кривой, т.е. ( $h_{гп1}$ ), будет равна критической глубине, которая устанавливается в начале водоската

$$h_{гп1} = h_k = 3 \sqrt{\frac{\alpha \cdot q^2}{g}}, \quad (3.26)$$

где  $q = \frac{Q}{b}$ , здесь  $b$  - ширина водоската.

Длину кривой можно определить различными методами [2], здесь предлагается способ Бахметьева

$$\ell = \frac{h_0}{i} \{ \eta_2 - \eta_1 - (1-i) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \}, \quad (3.27)$$

где  $j = \frac{\alpha C^2 i b}{g \cdot \chi} = \Gamma_k = \frac{\alpha (Q')^2 b}{g \cdot \omega^3}$ ,  $h_0 = h$  - глубина на водоскате при равномерном режиме.

Вся длина кривой свободной поверхности между граничными глубинами разбивается на несколько участков (например, четыре), т.е. с глубинами  $h_{к1}, h_1, h_2, h_3, h_4 = h + 0,01m$ . По уравнению Бахметьева между этими глубинами определяются длины участков и затем суммируются. Расчет лучше вести в табличной форме (таблица 3.2).

Просуммировав длины участков сравнивают длину кривой с длиной водоската (если она известна) и устанавливают, что если  $\sum \ell < \ell_{\text{водоск}}$ , то на водоскате сформировался равномерный режим, если  $\sum \ell > \ell_{\text{водоск}}$ , то режим не сформировался.

*Расчет выхода*

Для выяснения характера сопряжения потока за водоскатом определяют сопряженную глубину с глубиной в конце водоската ( $h$ )

$$h'' = \frac{h}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_k}{h} \right)^3} - 1 \right]. \quad (3.28)$$

В случае если  $h'' > h_0$ , необходимо запроектировать водобойную стенку.

В задаче 17 необходимо запроектировать водобойный колодец. Глубина водобойного колодца определяется по формуле:

$$d = h_c'' - h_0. \quad (3.29)$$

Длина колодца равна

$$l_k = l_{\text{пад}} + l_{\text{по}}, \quad (3.30)$$

$$l_{\text{пад}} = v \cdot \sqrt{\frac{2P}{g}}, \quad (3.31)$$

где  $v$  - скорость на водоскате.

$$P = d + \frac{h}{2}, \quad (3.32)$$

$$l_{\text{по}} = 3 \cdot h_0^4. \quad (3.33)$$

По полученным размерам строится профиль и план сооружения.

Таблица 3.2 Определение длины кривой свободной поверхности на водоскате

$h_i$ , м <sup>2</sup>	$\eta = \frac{h_i}{h}$	$\Delta\eta$	$\varphi(\eta)$	$\Delta\varphi(\eta)$	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\omega^3$	$\chi$ , м	$R$ , м	$C\sqrt{R}$	$Q'$ , м <sup>3</sup> /с	$(Q')^2$	$\frac{\alpha(Q')^2 \cdot b}{g \cdot \omega^3}$	$\Pi'_{ксп}$	$(1 - \Pi'_{ксп})$	$(1 - \Pi'_{ксп}) \Delta\varphi$	$\Delta\eta - (1 - \Pi'_{ксп}) \Delta\varphi$	$\ell$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$h_k$																	
$h_1$																	
$h_2$																	
$h_3$																	
$h_4$																	

$\sum \ell$

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика.- Л.: Энергия, 1982. - с.672.
2. Андреевская А.В. и др. Задачник по гидравлике.- М.: Энергия, 1970. -с.566.
3. Справочник по гидравлическим расчетам / Под редакцией П.Г.Киселева.- М.: Энергия, 1974 - с. 314.

### *Дополнительная*

4. Курганов А.М. и др. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации.- М.: Стройиздат, 1978.
5. Вильнер Я.М. и др. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам.- Минск: Высшая школа, 1976.
6. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей из труб круглого сечения по формуле Н.Ф.Федорова.- Минск: 1972.
7. Константинов Ю.М. Специальные вопросы гидравлики, систем водоснабжения и водоотведения. –Киев: КИСИ, 1981.
8. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стальных водопроводных труб.– М: Стройиздат, 1986.

Учебное издание

Составители:  
*Громик Николай Васильевич*  
*Мешик Олег Павлович*

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

*по курсу «Гидравлика»*

для студентов специальности  
**74 05 0 1** «Мелиорация и водное хозяйство»  
заочной формы обучения  
(по сокращенной программе)

Ответственный за выпуск: Громик Н.В.  
Редактор: Строкач Т.В.  
Компьютерная верстка: Боровикова Е.А.  
Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 22.04.2008 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Снегурочка». Усл. п. л. 2,5.  
Уч.-изд. л. 13,25. Тираж 100 экз. Заказ 501. Отпечатано на ризографе  
Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».  
224017, г.Брест, ул.Московская, 267.