

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА ПРИРОДООБУСТРОЙСТВА**

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

**по курсу «Гидравлика»**  
**для студентов специальности 1–74 05 01**  
**«Мелиорация и водное хозяйство»**

Брест 2015

УДК 621.226

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 этих руслах.

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Дисциплина «Гидравлика» является частью теоретической базы для изучения таких специальных дисциплин, как «Насосные станции», «Сельскохозяйственные мелиорации», «Комплексное использование водных ресурсов», «Гидротехнические сооружения».

В практической деятельности основной задачей специалистов, овладевших основой знаний, является обеспечение гармоничного взаимодействия человеческого общества и природы. Поэтому задачи дисциплины «Гидравлика» состоят в формировании у студентов современного мировоззрения, в усвоении законов гидравлики для решения инженерных задач, специфических для гидромелиоративного и водохозяйственного строительства.

Предметом изучения в гидравлике являются общие законы равновесия и движения жидкостей и газов, а также методы применения этих законов для решения инженерных задач, свойственных для отрасли техники.

Программа курса состоит из двух частей:

- 1) общие законы механики жидкости («ядро» дисциплины);
- 2) специальные разделы дисциплины («модули»), наиболее подходящие для специальности 1 – 74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство».

При изучении материала по учебнику студент должен особое внимание обратить на проработку основных положений темы (раздела), используя для этой цели методические указания, основные предназначения которых – облегчить работу с книгой.

Курс целесообразно изучать последовательно по темам (разделам), руководствуясь программой и методическими указаниями. Сначала следует изучить теоретическую часть раздела, затем решить и проанализировать приведенные в учебнике и задачниках примеры и задачи с решениями. 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. Неньютоновские жидкости.

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

$$T = \pm \mu \cdot S \cdot \frac{dU}{dn} \quad (1.1)$$

или

$$\frac{T}{S} = \tau = \pm \frac{dU}{dn}. \quad (1.2)$$

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 неьютоновскими 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.

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 сле-

дует 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

$$p_2 = p_1 + \gamma h, \quad (1.3)$$

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 взаимосвязь этих величин.

В уравнении (1.3) 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. Гидростатический 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 указать, 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 «тело давления», которое представляет собой действительный или воображаемый объем жидкости, расположенный над цилиндрической поверхностью. Линия действия горизонтальной составляющей проходит через центр давления верти-



кальной 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.

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  $V_1 / V_2 = \omega_1 / \omega_2$ , 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  $Re = Vd/\nu$ ,  $V$  – средняя скорость движения жидкости;  $d$  – диаметр трубопровода;  $\nu$  – 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 тече-



ние 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.

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.

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

Из формулы Пуазейля следует, что потери напора на трение по длине трубопровода пропорциональны средней скорости потока и коэффициенту кинематической вязкости жидкости.

Турбулентный поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением частиц жидкости. Из-за сложности явления до сих пор не создано достаточно удовлетворительной теории турбулентного движения, которая непосредственно вытекала бы из основных уравнений гидродинамики и хорошо подтверждалась 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 рассмотрите 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 ( $k/d$ )

$$\lambda = f(Re; k/d), \quad (1.4)$$

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

Наиболее полно зависимость (1.4) раскрывается графиком Никурадзе, который получен экспериментально на трубах с искусственной зернистой равно-

мерной шероховатостью. 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

$$\lambda = 64 / Re. \quad (1.5)$$

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 затопливает шероховатости внутренней поверхности трубы, ввиду чего коэффициент ( $\lambda$ ) не зависит от ( $k/d$ ) и зависит только от ( $Re$ ). Здесь трубы работают как «гидравлически гладкие». Для этой зоны, по Блазиусу

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (1.6)$$

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

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (1.7)$$

а для пятой зоны — формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_s}{d} \right)^{0,25}. \quad (1.8)$$

Здесь  $k_s$  – 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 (1.7) переходит в формулу (1.6) для гидравлически гладких труб, а при больших  $Re > 500d/k$  обращается в формулу (1.8) для вполне «гидравлически шероховатых» труб.

Вместо расчетных формул (1.6), (1.7) и (1.8) 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 общая 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 автомодалность. 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  $(30 \dots 40) d$ .

## 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.

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.

Отверстие называется малым, если можно пренебречь изменением давления по его площади. Насадками называются небольшие по длине трубы  $l = (3 \dots 6)d$ , 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.

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 непрямого 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.

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

$$i = i_n = J, \quad (1.9)$$

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

$$Q = C \cdot \omega \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (1.10)$$



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 – это формула Н.Н. Павловского и И.И. Агроскина. Кроме того, при расчете каналов используются зависимости:

$$V = C\sqrt{R \cdot i}, \quad (1.11)$$

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

$$h_t = i \cdot \ell = \frac{V^2}{C^2 \cdot R} \cdot \ell, \quad (1.13)$$

$$Q = C \cdot \omega \cdot \sqrt{R \cdot i}. \quad (1.14)$$

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

$$R_{\text{гн}} = \frac{\omega_{\text{гн}}}{\chi_{\text{гн}}} = \frac{h_{\text{гн}}}{2}. \quad (1.15)$$

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

$$V = V_{\text{макс}}, \quad (1.16)$$

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

$$\omega = \omega_{\text{мин}}. \quad (1.17)$$

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

$$b_{\text{гн}} = (b / h)_{\text{гн}}. \quad (1.18)$$

## 1.9. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЗАДАЧ ПО РАСЧЕТУ КАНАЛОВ

Ограничение скоростей движения воды при расчете каналов. Допустимые максимальные и минимальные скорости. Особенности гидравлического расчета каналов замкнутого сечения. Применение ЭВМ для расчета равномерного движения.



При расчете трапециидальных каналов можно выделить три типа задач:

1. Заданы элементы живого сечения канала, необходимо определить ( $Q$ ).

2. Живое сечение канала не задано, т. е. необходимо найти ( $b$ ) и ( $h$ ).

3. Заданы отдельные элементы живого сечения и скорость, требуется определить ( $Q$ ) и недостающие элементы.

Для решения этих задач разработаны способы нахождения искомых величин и методы решения.

При расчете каналов замкнутого профиля расчет ведут для канализационных труб, дренажных труб и гидротехнических туннелей. Эти водотоки работают как безнапорные.

Замкнутые профили имеют свою особенность. Она заключается в том, что скорость в таких каналах изменяется с изменением глубины потока и имеет максимум, чего не наблюдаем для обычных русел. Непосредственными подсчетами по формуле Шези было показано, что:

а) глубина ( $h_1$ ), отвечающая ( $V_{\max}$ ), лежит обычно в пределах

$$h_1 \approx (0,80 \dots 0,85) \cdot D; \quad (1.19)$$

б) глубина же ( $h_2$ ), при которой мы получаем ( $Q_{\max}$ ), лежит обычно в пределах

$$h_2 \approx (0,93 \dots 0,95) \cdot D. \quad (1.20)$$

Как видно, некоторый расход ( $Q$ ), находящийся в пределах

$$Q_{\Pi} < Q < Q_{\max}, \quad (1.21)$$

имеет место в случае равномерного движения воды в трубе при двух различных глубинах:  $h' < h_2$  и  $h'' > h_2$ .

Таким образом, при расходе, лежащем в указанных пределах, возможно изменение условий протекания воды: глубина ( $h'$ ) может «переклеститься» в глубину ( $h''$ ) и наоборот.

Нужно знать объяснения такого явления, а также методику расчета канализационных труб.

## 1.10. УСТАНОВИВШЕЕСЯ НЕРАВНОМЕРНОЕ ПЛАВНО ИЗМЕНЯЮЩЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

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.

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 в случае, если  $h \neq \text{const}$  (вдоль течения) и  $V \neq \text{const}$  (вдоль течения).

Это возможно в том случае, когда в цилиндрическом русле (т. е. имеющее 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 занимают вопрос о построении так называемой кривой свободной поверхности. Построив кривую свободной поверхности, находят глубины ( $h$ ) воды в канале в различных сечениях и тогда может быть решен вопрос о глубине выемок канала в различных местах и т. п.

Построение кривой свободной поверхности для реки, на которой сооружается плотина, дает возможность определить размеры загошения 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

$$-dz = dh_v + dh_r, \quad (1.22)$$

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 (1.21) 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, поэтому 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

$$\mathcal{E} = h + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g}, \quad (1.23)$$

т. е. удельная энергия сечения ( $\mathcal{E}$ ) – 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

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{b^2 g}}, \quad (1.24)$$

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 есть 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.  $h_0 = h_k$

$$i_k = \frac{g}{\alpha C_k^2} \cdot \frac{\chi_k}{B_k}, \quad (1.25)$$

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  $i = 0$ .

## 1.11. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

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.

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 это уравнение, 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

$$\theta(h') = \theta(h''), \quad (1.26)$$

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

$$\theta(h) = b \cdot \left( \frac{\alpha_0 \cdot q^2}{g \cdot h} + \frac{h^2}{2} \right), \quad (1.27)$$

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

Используя формулу (1.27), можно найти значения сопряженных глубин ( $h'$ ) и ( $h''$ ):

$$h' = \frac{h''}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{h_k}{h''} \right)^3} - 1 \right], \quad (1.28)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{h_k}{h'} \right)^3} - 1 \right], \quad (1.29)$$

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

С явлением прыжка весьма часто встречаемся на практике в частности при строительстве плотин. Здесь приходится сталкиваться иногда с прыжком особого вида: а) затопленным; б) несвободным.

При резком изменении уклона дна канала возможны случаи возникновения прыжка:

- 1) оба уклона дна канала ( $i_1$ ) и ( $i_2$ ) меньше критического (возникновение гидравлического прыжка невозможно);
- 2) оба уклона ( $i_1$ ) и ( $i_2$ ) больше критического (прыжок тоже невозможен);
- 3)  $i_1 < i_k$ ,  $i_2 > i_k$  (прыжок невозможен);
- 4)  $i_1 > i_k$ ,  $i_2 < i_k$  – здесь свободная поверхность, поднимаясь по течению, должна пересечь линию критических глубин К-К (следовательно, в русле возникает прыжок).

Четвертый случай характеризует переход бурного течения в спокойное, причем можно получить одну из схем свободной поверхности:

- а) прыжок на первом участке русла ( $i_1$ );
  - б) прыжок на втором участке русла ( $i_2$ );
  - в) промежуточная схема – прыжок устанавливается в месте перелома.
- Необходимо усвоить условия местонахождения прыжка.

## 1.12. 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.

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 (Н), измеренная на расстоянии (3...5) Н 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) водослив со стенкой практического профиля ( $0,5H \leq \delta \leq 2H$ );
- в) водослив 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

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0^3}, \quad (1.30)$$

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

$$Q = b \cdot h \cdot \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot (H - h)}, \quad (1.31)$$

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

$$h = \frac{2}{3} \cdot H_0, \quad (1.32)$$

по Бахметьеву

$$h = h_k, \quad (1.33)$$

а по «современным» способам

$$h < h_k < \frac{2}{3} H_0. \quad (1.34)$$

Водосливы практического профиля разделяются на отдельные группы. Для этих групп водосливов коэффициент расхода различен. Это различие обусловлено очертаниями водосливных стенок. Так, например, водосливная грань безвакуум-



ного водослива нормального очертания (Кригера-Офицерова) проектируется по нижней границе струи.

### 1.13. 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.

При истечении воды через плотину возможны следующие случаи:

- 1) истечение из-под затвора (шита), 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

$$E_0 = h_c + \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot h_c^2 \cdot \varphi_c^2} \quad (1.35)$$

Его решают методом подбора. Коэффициент скорости принимается от 0,90 до 0,98 в зависимости 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 получится 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 (рассеять) оставшуюся часть избыточной кинетической энергии.

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.

## 1.14. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СОПРЯГАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

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 бесколодезного 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 быстротоками (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 быстротоку. Расчет этих сооружений приведен в [2].

## 1.15. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ИСКУССТВЕННЫХ РУСЛАХ

Существует множество различного вида волн: сейсмические, звуковые, электромагнитные и т. п. Однако мы будем рассматривать только волны на свободной поверхности воды, вызванные ветром, т. е. так называемые ветровые волны.

Теория ветровых волн показывает, что способность их перемещения – скорость (с) в общем случае зависит: а) от ускорения силы тяжести; б) от физических свойств жидкости. При этом оказывается, что в частном случае расчета достаточно больших волн зависимостью их параметров от физических свойств жидкости практически можно пренебречь. Такие волны называются гравитационными. Различают следующие виды ветровых гравитационных волн: 1) вынужденные; 2) свободные волны (зыбь).

К элементам ветровых волн относятся: высота волны ( $h_w$ ); длина волны ( $\lambda$ ); скорость распространения волны (с); крутизна волны  $\left(\frac{h_w}{\lambda}\right)$ .

Волны возникают в водоемах. Водоемы бывают:

1) глубокие, глубиной  $h \geq \frac{\lambda}{2}$ , в этом случае дно водоема не оказывает влияния на волны;

2) мелкие, когда  $h < \frac{\lambda}{2}$ ; в этом случае дно водоема ощутимо влияет на формирование волн.

При рассмотрении прибрежной зоны необходимо еще выделить прибойную и приурезную зоны.

Если в данную точку среды в один и тот же момент времени приходят две волны, то они соответствующим образом налагаются друг на друга, частный случай этого явления, когда волна увеличивается в результате наложения волн, называется интерференцией.

### 1.16. 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.

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

$$u = k \cdot J, \quad (1.36)$$

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

Формулу (1.36) можно представить в виде

$$Q = k \cdot J \cdot \omega. \quad (1.37)$$

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 (несок крупнозернистый) до 0,001 м/сут (глина).

Неравномерное плавно изменяющееся движение воды описывается формулой Дюпюи

$$V = -k \frac{dH}{dS}, \quad (1.38)$$

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, равную 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

$$Q = \omega \cdot k \cdot \left( i - \frac{dh}{ds} \right), \quad (1.39)$$

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

$$q = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} k, \quad (1.40)$$

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

Используя формулу (1.39), 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.

## 1.17. ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Двухфазными потоками жидкости обычно называют потоки, содержащие:

а) или частицы твердого тела, находящиеся во взвешенном состоянии; б) или капли другой более легкой или более тяжелой жидкости; в) или, наконец, пузыри газа, в частности, пузыри, заполненные воздухом и парами данной жидкости.

Иногда двухфазные или многофазные потоки могут представлять потоки:

1) так называемые неньютоновские жидкости, для которой продольные касательные напряжения трения ( $\tau$ ) выражаются не зависимостью Ньютона, а зависимостью  $\tau = \left(\frac{dU}{dn}\right)^k$ , где  $k$  – число, отличное от единицы;

2) так называемые аномальные жидкости, эти жидкости в отличие от обычных жидкостей в состоянии покоя могут иметь касательные напряжения ( $\tau$ ), меньшие или равные некоторой величине ( $\tau'$ ).

Известно, что песчинки, лежащие на дне русла, в результате воздействия на них движущейся воды могут попасть в нижний (придонный) слой потока.

В турбулентном потоке, благодаря действию поперечных пульсационных скоростей, с течением времени (при наличии русла, подлающего размыву) будет его постепенное насыщение песчинками на большую высоту. Через определенное время происходит стабилизация насыщения потока. В этот период объем твердой фазы, поднимаемый со дна, равняется объему, осаждающемуся на дно.

Транспортирующей способностью безнапорного потока называется твердый весовой расход, который получается, если мы представим себе, что этот поток насытился песчинками до предела, причем степень насыщения стабилизировалась.

Транспорт гидросмеси по напорному трубопроводу (пульпопроводу) осуществляется с помощью насосов.

При движении гидросмеси по пульпопроводу в общем случае получаем условия, когда одна часть твердой фазы движется во взвешенном состоянии, а другая часть, образованная более крупными фракциями, – непосредственно по дну трубопровода. Если в какой-то момент эксплуатации пульпопровода средняя скорость ( $V$ ) движения гидросмеси в нем окажется меньше некоторой скорости ( $V_{\min}$ ), т. е.  $V < V_{\min}$ , то рассматриваемый пульповод начнет интенсивно заполняться за счет выпадения на дно взвешенных частиц грунта.

## 1.18. ОСНОВЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Различают два вида моделирования: 1 – физическое моделирование; 2 – математическое моделирование.

Мы будем рассматривать только физическое моделирование, т. е. в этом случае на модели воспроизводится изучаемое явление с сохранением его физических свойств.

Основой такого моделирования, относящегося к механике жидкости и газа, является «теория подобия».

При физическом моделировании гидравлических явлений удобно различать геометрическое, кинематическое, динамическое. Эти подобия необходимо изучить и уметь применять при исследованиях на практике.



## 2. ЗАДАНИЕ

### на расчётно-графическую работу по курсу «Гидравлика»

Расчётно-графическая работа выполняется согласно заданию. Работа состоит из решения отдельных задач, перечень которых определяются студентом по номеру зачетной книжки на основе таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Номера задач для выполнения курсовой работы

Последняя цифра зачетной книжки	Номера задач							
	1	5	9	13	17	21	25	29
1	2	6	10	14	18	22	26	30
2	3	7	11	15	19	23	27	31
3	4	8	12	16	20	24	28	29
4	1	5	11	16	19	21	26	31
5	2	7	12	15	18	22	27	30
6	3	6	9	14	17	23	28	32
7	4	6	10	13	20	24	25	31
8	3	8	9	14	19	23	26	29
9	2	8	10	15	17	22	27	30

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

Оформление задач сопровождается пояснительным текстом по ходу решения. При использовании в расчетах справочных данных, дается обязательная ссылка на источник информации. Для решения каждой задачи составляется расчетная схема с указанием всех используемых расчетных параметров, в случае необходимости задача сопровождается чертежом либо графиком, оформленными в соответствии со стандартом УО «БрГТУ»

Краткие методические рекомендации по решению задач расчётно-графической работы приведены в третьем разделе настоящих методических указаний.

### ЗАДАЧА 1

Определить, во сколько раз увеличится сила манометрического давления на дно сосуда диаметром ( $D$ ), наполненного жидкостью на высоту ( $h$ ), если к его крышке присоединить трубку диаметром ( $d$ ) и наполнить ее на высоту ( $h_1$ ) (рис. 2.1). Чему равна сила ( $G$ ), передаваемая на пол, если масса сосуда 28 кг (массой трубки пренебречь)?

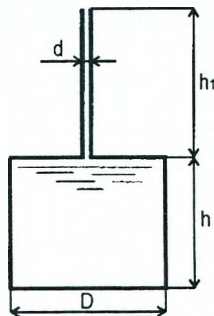


Рисунок 2.1

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 1

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
D, м	1,0	2,0	3,0	2,6	4,1	2,5	2,0	3,0	1,2	6,1
d, см	2,0	3,0	4,0	3,5	5,1	4,2	4,0	3,0	2,8	2,3
h <sub>1</sub> , м	9,0	8,0	7,0	8,2	9,1	7,3	8,0	7,4	3,6	6,6
h, м	4,0	2,0	3,0	2,5	4,1	2,5	2,0	5,0	1,2	6,1
Жидкость	вода	керосин	бензин	скипидар	глицерин	спирт этиловый	нефть натуральная	масло машинное	вода морская	вода

### 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.

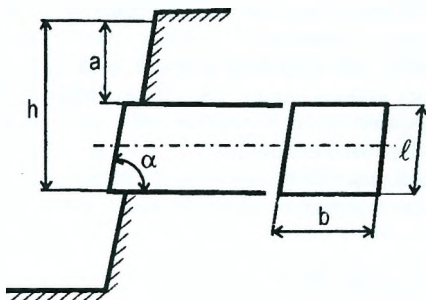


Рисунок 2.2

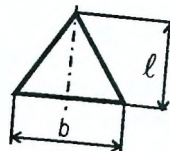


Рисунок 2.3

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

Сила давления воды через обшивку прямоугольного щита высотой H и шириной b передается на четыре горизонтальные балки. На какие расстояния x от свободной поверхности следует их расположить, чтобы они были нагружены одинаково? Найти силу давления воды P на весь щит и максимальный изгибающий момент M на балках, считая их свободно опертыми на концах.

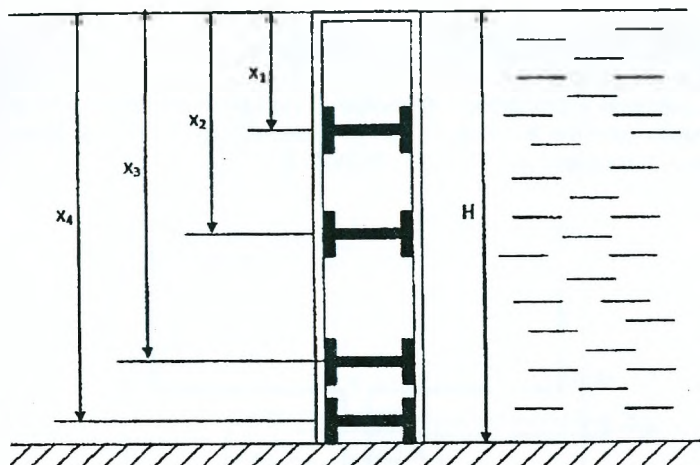


Рисунок 2.4

Таблица 2.4 – Исходные данные к задаче №3

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
H, м	4	5	4,5	8	7	6	7	5,5	9	8,5
b, м	5	7	6,5	6	7	4	5	6	6	5

#### 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 ( $h_1$ ) и за стенкой ( $h_2$ ).

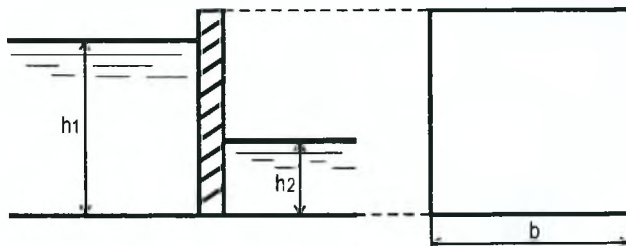


Рисунок 2.5

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

Определить диаметр трубы для пропуска расхода воды ( $Q$ ) при заданной глубине ( $h$ ) и длине трубы ( $L$ ) (рис. 2.6). Уровень в резервуаре постоянный, скоростным напором в резервуаре пренебречь. На каком расстоянии от конца трубы находится сечение, в котором вакуум равен  $0,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ ? Коэффициент Дарси рассчитать по формуле:  $\lambda = 0,02 + 0,0005 / d$ .

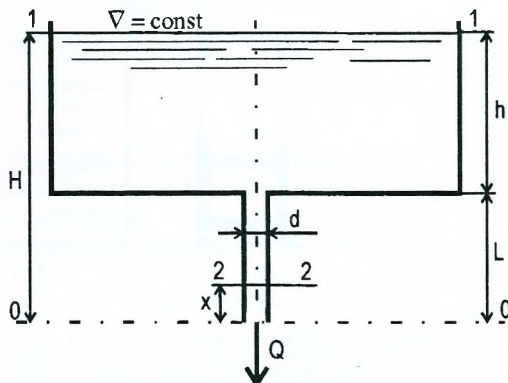


Рисунок 2.6

Таблица 2.6 – Исходные данные к задаче 5

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

### ЗАДАЧА 6

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

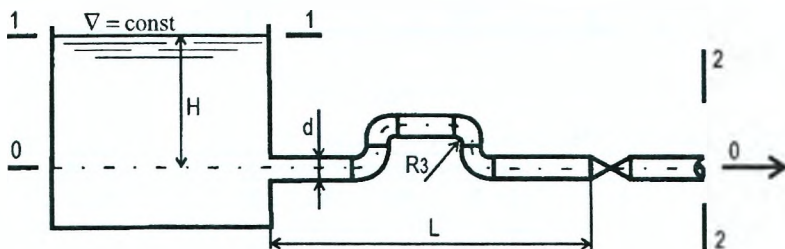


Рисунок 2.7

Таблица 2.7 – Исходные данные к задаче 6

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,015	0,014	0,012	0,01	0,008	0,006	0,03	0,02	0,05	0,013
$d, \text{ м}$	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,09	0,08	0,2	0,11
$\alpha, \text{ грал}$	60	50	40	30	20	10	30	20	50	10
$L, \text{ м}$	90	80	70	60	50	40	30	20	15	75

### ЗАДАЧА 7

На берегу реки предполагается установить насос для подачи воды из реки расходом ( $Q$ ). Определить расстояние от оси насоса до уровня воды в реке ( $h_B$ ). 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 ( $h_{\text{вак}}$ ).

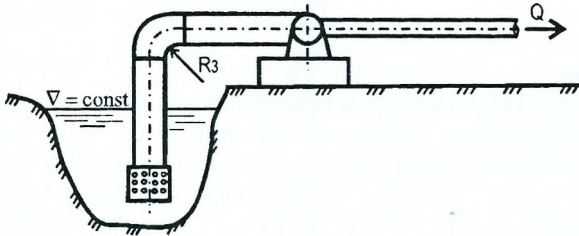


Рисунок 2.8

Таблица 2.8 – Исходные данные к задаче 7

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 8

Вода течет по трубопроводу диаметром  $d$  со скоростью  $V$ . Внизу вода растекается во все стороны по радиусу между двумя круглыми параллельными пластинками диаметром  $D$ , расположенными на расстоянии  $a$  одна от другой. Пренебрегая потерями напора, определить давление в точках В, отстоящих на расстоянии  $D/4$  от центра А, считая, что вода вытекает в атмосферу.

Таблица 2.9 – Исходные данные к задаче №8

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d, \text{ мм}$	150	175	200	250	300	100	125	150	175	200
$V, \text{ м/с}$	5	6	3	3	3	6	5	4	5	3
$D, \text{ мм}$	800	825	850	900	1000	700	725	650	775	800
$a, \text{ мм}$	30	35	40	30	30	30	35	35	40	40

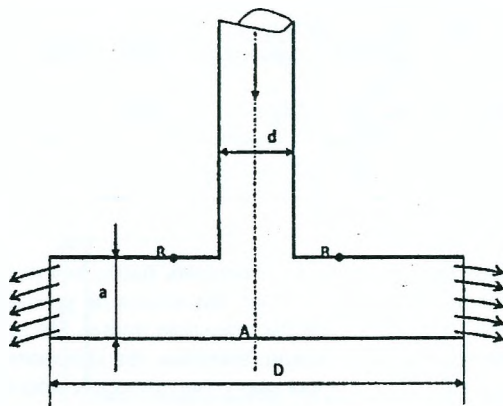


Рисунок 2.9

### ЗАДАЧА 9

По сифонному трубопроводу, для которого задан напор  $H$ , необходимо подавать расход воды  $Q$  при условии, что вакуумметрическая высота в сечениях трубопровода не превосходила  $h_{\text{вак}}=7$  м. Опасное сечение С–С расположено выше начального уровня воды на  $h$ , длина восходящей линии трубопровода до этого сечения равна  $L_1$ , а нисходящей линии  $L_2$ . Трубопровод снабжен задвижкой и приёмным клапаном с сеткой. Повороты трубы в вертикальной плоскости равны  $\alpha_1=30^\circ$  и  $\alpha_2=40^\circ$ .

Определить диаметр трубопровода  $d=d_1=d_2$  и коэффициент сопротивления задвижки  $\zeta$ , удовлетворяющие условиям задачи. Построить напорную линию по длине трубопровода.

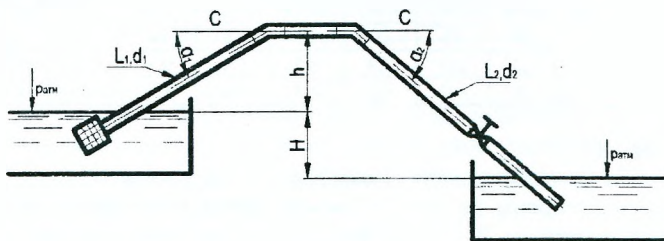


Рисунок 2.10

Таблица 2.10 – Исходные данные к задаче 9

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H, \text{ м}$	6	7	5	8	6,5	9	7,5	5,5	10	8,5
$Q, \text{ л/с}$	50	55	45	60	70	65	75	60	80	60
$h, \text{ м}$	4	4,5	4	5	4	5	5	4	4	4
$L_1, \text{ м}$	100	120	100	150	100	120	100	150	140	120
$L_2, \text{ м}$	60	70	50	60	50	70	60	80	70	60



### ЗАДАЧА 10

Вода подается в открытый верхний бак с глубиной воды  $h$  по вертикальной трубе диаметром  $d$ , длиной  $L$  за счет избыточного давления  $M$  в нижнем замкнутом баке.

Определить давление  $M$ , при котором расход будет равен  $Q$ . Коэффициент сопротивления полностью открытого вентиля  $\zeta=9,3$ , потери на трение по длине трубопровода определить для новых стальных цельнотянутых труб. Построить график напоров по высоте трубы.

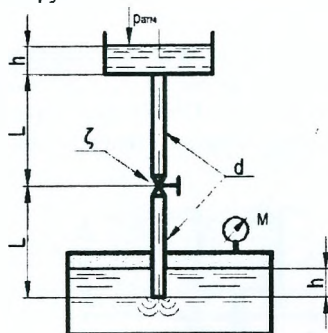


Рисунок 2.11

Таблица 2.11 – Исходные данные к задаче 10

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	25	30	35	40	50	25	30	35	40	50
$Q$ , л/с	1,5	2,0	3,0	3,2	5,0	1,0	1,5	2,0	2,5	4,5
$h$ , м	0,5	0,6	1,0	1,0	1,0	0,6	0,5	0,5	1,2	0,7
$L$ , м	3,0	3,5	3,5	4,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0

### ЗАДАЧА 11

При истечении воды из большого резервуара в атмосферу по горизонтальной трубе, диаметр которой  $d$  и длина  $L$  при статическом напоре  $H$ , получено, что уровень в пьезометре, установленном по середине длины трубы, равен  $h$ .

Определить расход  $Q$  и коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  трубы. Сопротивлением трения входа пренебречь.

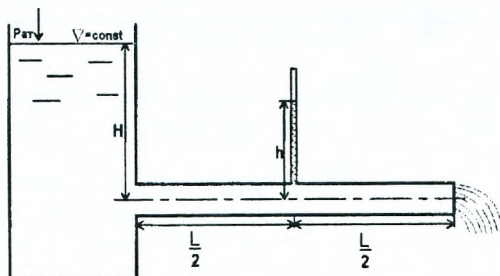


Рисунок 2.12

Таблица 2.12 – Исходные данные к задаче 11

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
d, мм	40	50	60	80	100	40	50	60	80	100
L, м	10	12	16	20	24	14	14	20	25	30
H, м	10	11	14	18	20	11	15	12	17	19
h, м	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	5,0	3,5	4,0	4,5	4,0

### ЗАДАЧА 12

Вода сливается из бака А в бак В по трубопроводу диаметром  $d$  и полной длиной, равной  $2L$ . Из бака В вода выливается в атмосферу через цилиндрический насадок такого же диаметра  $d$ . Определить, какой напор  $H$  нужно поддерживать в баке А, чтобы уровень в баке В находился на высоте  $h$ .

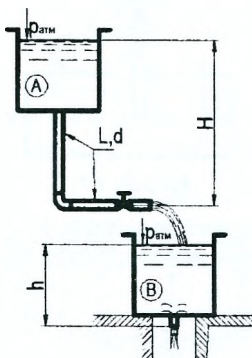


Рисунок 2.13

Таблица 2.13 – Исходные данные к задаче 12

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, мм	50	60	80	25	32	40	75	60	50	80
h, м	2,0	1,0	1,5	2,5	2,2	2,0	1,8	2,0	1,5	2,0
$2L$ , м	8	9	10	5	6	7	8	8	10	11

### ЗАДАЧА 13

Определить расход воды через отверстие с острой кромкой диаметром  $d$ , если показания манометра  $M$  перед отверстием  $r_m$  и высота расположения манометра над осью трубы  $h$ .

Как изменится расход, если к отверстию присоединить цилиндрический насадок (пунктиром)? Для насадка найти показания манометра, при котором произойдет срыв режима работы, принимая, что срыву соответствует абсолютное давление в сжатом сечении струи, равное нулю. Давление на выходе из насадка атмосферное.

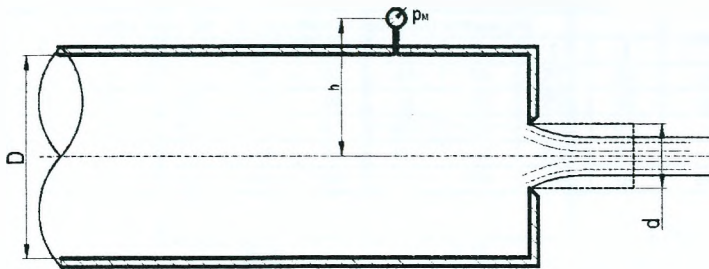


Рисунок 2.14

Таблица 2.14 – Исходные данные к задаче 13

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	120	100	125	150	80	60	100	120	125	80
$D$ , мм	200	200	200	250	250	175	300	300	250	200
$p_m$ , МПа	0,1	0,15	0,12	0,2	0,15	0,1	0,2	0,15	0,2	0,17
$h$ , м	0,8	0,7	0,65	0,6	0,5	0,4	0,45	0,55	0,65	0,75

#### ЗАДАЧА 14

Вода из верхней секции замкнутого бака перетекает в нижнюю секцию через отверстие  $d_1$ , а затем через цилиндрический насадок  $d_2$  вытекает в атмосферу.

Определить расход через насадок, если при установившемся режиме известно показание манометра  $M$ , а уровни в водомерных стеклах для каждой секции соответственно равны  $h_1$  и  $h_2$ .

Найти при этом избыточное давление  $p_x$  над уровнем воды в нижней секции бака.

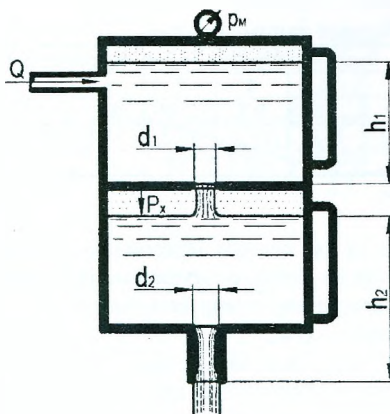


Рисунок 2.15

Таблица 2.15 – Исходные данные к задаче 14

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_1$ , мм	30	35	40	45	50	30	25	35	20	40
$d_2$ , мм	20	25	30	35	40	25	20	25	10	32
$h_1$ , м	2,0	1,8	1,5	1,0	1,0	3,0	2,1	1,8	2,0	1,0
$h_2$ , м	3,0	2,8	2,5	2,0	2,0	4,0	3,1	3,5	3,0	2,5
$P_M$ , кПа	50	45	40	35	30	60	65	50	60	40

### ЗАДАЧА 15

Через цилиндрический насадок, расположенный в вертикальной стенке, пропускается расход воды  $Q$ . Длина насадка  $L$ , диаметр  $d$ .

Определить напор  $H$  над центром насадка, а также скорость  $v_c$  и давление  $p_c$  в сжатом сечении насадка.

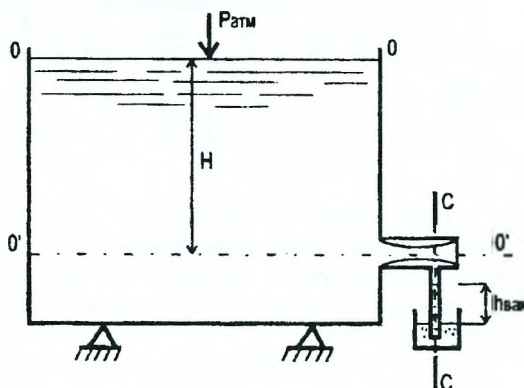


Рисунок 2.16

Таблица 2.16 – Исходные данные к задаче 15

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q$ , л/с	6,0	8,0	7,5	9,5	10,0	8,5	7,0	6,0	5,5	6,0
$L$ , см	15,0	12,0	15,0	14,0	11,5	15,0	14,0	13,0	14,5	14,0
$d$ , см	4,0	3,5	6,0	3,5	7,0	3,8	4,0	3,5	3,6	3,8

### ЗАДАЧА 16

В бак, разделенный на две секции перегородкой, имеющей круглое отверстие диаметром  $d$  с острой кромкой, поступает вода в количестве  $Q$ . Из каждой секции вода вытекает через цилиндрический насадок, диаметр которого равен диаметру отверстия в перегородке.

Определить расход через каждый насадок при установившемся режиме, предполагая, что отверстие в перегородке является затопленным.

Как надо изменить диаметр насадка в левой секции, чтобы расходы через оба насадка стали равными между собой?



Продолжение таблицы 2.18

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l_{3.6}, \text{ м}$	350	150	300	150	180	250	180	320	240	210
$q_4, \text{ л/с}$	6	8	9	10	6,5	7	7,5	8,5	9,5	11
$q_6, \text{ л/с}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$q_5, \text{ л/с}$	4	5	6	7	8	9	10	11	3	4
$\nabla_4', \text{ м}$	10	6	4	4	8	4	8	4	6	4
$\nabla_6', \text{ м}$	12	8	8	6	10	10	10	6	10	12
$\nabla_5', \text{ м}$	8	10	10	8	6	12	10	12	10	10

**Примечание:** для задач 18, 19, 20 табличные значения задачи 17 умножить, соответственно, на 1,1; 1,2; 1,3.

### ЗАДАЧА 21

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

Таблица 2.19 – Исходные данные к задаче 21

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$L, \text{ км}$	5,0	8,0	10,0	12,0	15,0	6,0	9,0	10,0	12,0	11,0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	10	15	12	19	30	9	18	6	40	5
$h, \text{ м}$	1,2	1,8	1,4	2,0	2,7	1,4	1,6	1,1	4,3	1,0
$H, \text{ м}$	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 22

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

Таблица 2.20 – Исходные данные к задаче 22

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	4,5	5,8	3,2	7,5	6,0	9,5	8,0	8,5	3,0	5,0
$b, \text{ м}$	0,8	1,0	0,6	1,2	1,0	1,4	1,2	1,2	0,8	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. состоя- стояние	выпе средн.	сред- ние	плохие	сред- ние	сравни- тельно плохие	выше средн.	норм. сост.	заты- нут илист. плен- кой	выше средн.



### ЗАДАЧА 23

Определить глубину наполнения судоходного канала полигонального сечения для пропуска расхода  $Q$ , если известен уклон  $i$  и шероховатость  $n$ .

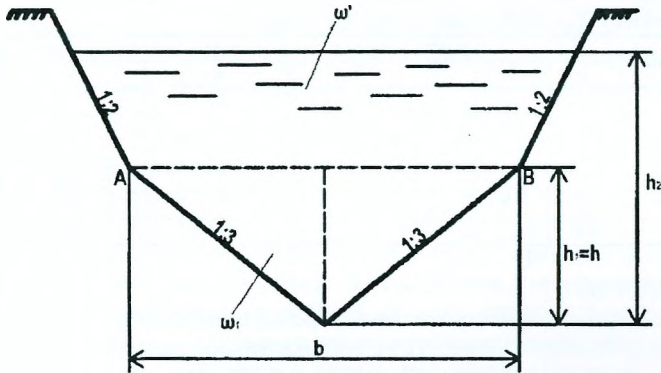


Рисунок 2.19

Таблица 2.21 – Исходные данные к задаче 23

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	90	100	110	60	150	160	80	90	120	70
$i$	0,0001	0,0002	0,0001	0,0003	0,0004	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0002
$n$	0,02	0,018	0,025	0,0225	0,03	0,035	0,018	0,0225	0,018	0,02
$b_1, \text{ м}$	18	24	30	12	36	42	18	24	30	12
$h, \text{ м}$	3	4	5	2	6	7	3	4	5	2

### ЗАДАЧА 24

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

Таблица 2.22 – Исходные данные к задаче 24

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	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 25

Рассчитать двухступенчатый перепад прямоугольного сечения с входной частью в виде водослива с широким порогом ( $P=0$ ) с закруглениями в плане. Расход воды ( $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ ). Разность отметок дна верхнего и нижнего бьефов ( $P, \text{ м}$ ). Ширина подводящего трапециевидального канала ( $b_k$ ), коэффициент откоса ( $m$ ), нормальная глубина в подводящем канале и нижнем бьефе ( $h_0$ ). Ширину пере-

пада принять равной ( $b$ ). В случае отгона прыжка за перепадом рассчитать водобойный колодец.

Начертить план сооружения и профиль по оси с указанием всех размеров, определенных расчетом.

Таблица 2.23 – Исходные данные к задаче 25

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	15	18	9	14	12	20	8	17	22	11
$P, \text{ м}$	6,0	7,0	8,0	4,5	8,2	5,6	4,8	7,8	6,4	4,5
$b_k, \text{ м}$	5,0	8,0	5,0	8,6	6,5	5,8	8,2	7,0	8,2	7,2
$m$	1,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	2,0	1,5	1,5	2,0
$h_0, \text{ м}$	2,0	1,8	1,2	1,7	1,6	2,1	1,3	1,9	2,6	2,0
$b, \text{ м}$	4,0	5,0	4,0	6,0	4,0	6,0	4,2	5,0	6,4	5,0

### ЗАДАЧА 26

Проектируется двухступенчатый перепад на сбросном канале для пропуска расхода ( $Q$ ). Высота перепада ( $P$ ) с вертикальными стенками падения. Входная часть выполнена в виде водослива с широким порогом ( $P_0=0$ ). Канал трапецидального сечения с коэффициентом откоса ( $m$ ) имеет ширину ( $b_k$ ) и глубину ( $h_0$ ) при равномерном движении. Бытовая глубина в НБ  $h_6=h_0$ .

Рассчитать:

а) перепад и входную часть, исходя из условия сохранения в канале скорости ( $v_0$ ), т. е. в канале перед перепадом не должно быть ни подпора, ни спада;

б) глубину и длину водобойного колодца за перепадом исходя из условия сопряжения с отводящим каналом в форме надвинутого прыжка;

в) начертить разрез по оси и план сооружения с указанием всех размеров, определенных расчетом.

Таблица 2.24 – Исходные данные к задаче 26

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	5,5	4,8	6,2	8,1	5,2	4,4	5,0	4,2	4,6	5,2
$P, \text{ м}$	4,1	3,8	4,0	3,8	4,0	4,2	5,0	4,4	4,6	4,8
$b_k, \text{ м}$	4,2	4,6	5,2	6,4	4,8	5,2	4,6	5,0	4,8	5,4
$m$	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0
$h_0=h_6, \text{ м}$	1,2	1,4	1,6	1,1	1,0	1,4	1,3	1,4	1,6	1,5

### ЗАДАЧА 27

Рассчитать одноступенчатый перепад на трапецидальном канале для пропуска расхода ( $Q$ ). Стенка падения вертикальная высотой ( $P$ ). Входная часть перепада выполнена в виде прямоугольного порога ( $P_0=0$ ). В канале нормальная глубина ( $h_0$ ), ширина ( $b_k$ ), коэффициент откоса ( $m$ ).

Определить ширину перепада из условия обеспечения в канале равномерного движения, а также размеры водобойной части (глубину и длину колодца) из условия сопряжения с надвинутым прыжком. Начертить разрез по оси и план сооружения с указанием всех размеров, определенных расчетом.

Таблица 2.25 – Исходные данные к задаче 27

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	6,2	8,4	7,5	6,6	8,2	8,0	6,0	5,8	6,2	6,4
$P, \text{ м}$	3,0	1,8	2,4	2,6	3,2	2,6	2,2	3,0	2,3	2,8
$b_k, \text{ м}$	5,2	6,0	5,8	4,2	6,0	5,4	5,6	6,2	4,8	5,2
$m$	1,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	1,5	1,5
$h_0=h_6, \text{ м}$	1,2	1,5	1,0	1,1	2,0	2,2	1,8	1,5	1,6	1,7

**ЗАДАЧА 28**

На сбросном трапецидальном канале, разность отметок дна которого в верхнем и нижнем бьефах ( $P$ ), необходимо запроектировать перепад.

Ширину перепада ( $b$ ) принять из условия пропуска удельного расхода ( $q$ ) на 1 м ширины. Перепад в поперечном сечении и плане – прямоугольный.

Рассчитать входную часть перепада (в виде стенки с закругленной передней гранью, коэффициент расхода  $m=0,45$ ), ступени перепада и сопряжение с нижним бьефом. В случае отогнанного прыжка рассчитать водобойную стенку.

Составить продольный профиль и план по полученным размерам.

Таблица 2.26 – Исходные данные к задаче 28

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$q, \text{ м}^3/\text{с м}$	2,0	2,2	2,5	1,8	2,4	0,9	1,8	2,3	0,9	1,2
$b, \text{ м}$	4,0	4,2	3,8	4,6	5,2	4,0	3,6	4,3	5,8	5,4
$P, \text{ м}$	10,0	12,0	10,2	12,3	10,2	9,6	14,1	12,6	11,4	13,2
$b_k, \text{ м}$	6,0	5,4	4,8	6,0	6,4	5,8	6,2	6,8	7,2	7,0
$m$	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0
$h_0=h_6, \text{ м}$	1,42	1,48	1,20	1,38	1,30	1,80	1,64	1,82	1,25	1,40

**ЗАДАЧА 29**

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 ( $n$ ).

Таблица 2.27 – Исходные данные к задаче 29

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	16	10	12	14	9	15	13	12	9	15,8
$b_k, \text{ м}$	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
$h_0=h_6, \text{ м}$	2,0	1,5	1,9	1,8	1,6	1,9	1,4	1,8	1,5	1,8
$b, \text{ м}$	4,0	4,0	5,0	5,4	3,8	5,2	5,2	2,8	5,0	3,2
$L, \text{ м}$	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

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.

### ЗАДАЧА 30

По лотку прямоугольного сечения шириной ( $b$ ) пропускается 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  $v=10\text{м/с}$ ).

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 2.28 – Исходные данные к задаче 30

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

### ЗАДАЧА 31

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  $P=0,3\text{м}$ . Подводящий и отводящий каналы трапециевидальные с шириной по дну ( $b_*$ ), нормальной глубиной ( $h_0$ ), коэффициент откоса  $m=1,5$ .

Выполняя расчет, определить:

ширину быстротока ( $b$ ), исходя из условия обеспеченности в подводящем канале  $v=1,2\text{ м/с}$ ;

определить глубину в конце водоската, рассчитав кривую свободной поверхности на быстротоке;

рассчитать (в случае необходимости) водобойную стенку для создания условий для образования подтопленного прыжка в НБ;

вычертить продольный профиль и план сооружения по размерам.

Таблица 2.29 – Исходные данные к задаче 31

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

### ЗАДАЧА 32

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

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 2.30 – Исходные данные к задаче 32

Величины	Варианты (предпоследняя цифра зачетной книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$b, \text{ м}$	4,10	2,80	3,20	4,60	2,60	4,20	3,80	3,60	4,00	4,20
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	12,4	12,8	10,4	11,8	12,6	9,4	11,6	10,8	10,2	12,9
$h_0, \text{ м}$	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

Сила манометрического давления, действующая на пол в общем случае, будет равна

$$P = p \cdot S, \quad (3.1)$$

где  $p$  – давление на дно сосуда.

Необходимо вначале определить давление ( $p$ ), когда столб жидкости равен ( $h$ ), а затем ( $p$ ), когда столб жидкости станет равным ( $h+h_1$ ). Соответственно, при этих давлениях необходимо найти и силы ( $P$ ) и ( $P_1$ ). Увеличение силы будет равно

$$n = \frac{P_1}{P}, \quad (3.2)$$

Сила ( $G$ ) будет равна

$$G = G_1 + G_2 + G_3, \quad (3.3)$$

где  $G_1$  – вес жидкости в сосуде;  $G_2$  – вес жидкости в трубке;  $G_3$  – вес сосуда.

#### ЗАДАЧА 2

При решении этой задачи необходимо использовать аналитический способ. Сила гидростатического давления, действующая на плоские поверхности равна

$$P = \gamma \cdot h_{\text{цт}} \cdot \omega, \quad (3.4)$$

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

$$\ell = \frac{h - a}{\sin \alpha}. \quad (3.5)$$

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

Точка приложения силы гидростатического давления определяется по уравнению

$$h_{\text{цт}} = h_{\text{цт}} + \frac{I}{\omega \cdot h_{\text{цт}}}, \quad (3.6)$$

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

При решении этой задачи необходимо составить расчётную схему.



### ЗАДАЧА 3

Определяем силу давления воды в нижней точке затвора по формуле:

$$P = \gamma \cdot h_{\text{вр}} \cdot \omega = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot b. \quad (3.7)$$

На каждый ригель действует сила

$$P_i = \frac{P}{n}. \quad (3.8)$$

Строим эпюру гидростатического давления на затворе делим ее на четыре равновесные части и находим расстояния от свободной поверхности до нижней границе эпюры, приходящейся на расположенные выше ригеля.

Для первого ригеля

$$P_1 = \frac{P}{n} = \frac{\gamma \cdot H^2 b}{n} = \frac{1}{2} \gamma \cdot h_1 b, \quad (3.9)$$

где  $n$  – число ригелей;  $h_1$  – расстояние от поверхности воды до нижней границы эпюры первого ригеля

$$h_1 = H \sqrt{\frac{1}{n}}. \quad (3.10)$$

Проанализировав остальные ригели, можно получить:

$$\begin{aligned} h_2 &= H \sqrt{\frac{2}{n}}, \\ h_3 &= H \sqrt{\frac{3}{n}}, \\ h_4 &= H \sqrt{\frac{4}{n}}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Для первого ригеля центр тяжести эпюры (прямоугольный треугольник) определим по формуле:

$$x_1 = \frac{2}{3} h. \quad (3.12)$$

Для остальных ригелей эпюрами являются прямоугольные эпюры. Центры тяжести определяем по формуле

$$x_i = \ell_{\text{ут}} + \frac{I}{\omega \cdot \ell_{\text{ут}}}. \quad (3.13)$$

Или, иначе, для второго ригеля

$$x_2 = \frac{h_2 - h_1}{2} + \frac{b(h_2 - h_1)^3 \cdot 2}{12b(h_2 - h_1)(2h_1 + h_2 - h_1)}. \quad (3.14)$$

Величины  $x_3$  и  $x_4$  определяются аналогично предыдущей формуле с учетом глубин  $h_2$ ,  $h_3$  и  $h_4$ .

#### ЗАДАЧА 4

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

$$P = P_1 - P_2, \quad (3.15)$$

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

Обе эти силы определяются по формуле (3.4).

Точку приложения силы гидростатического давления находят из уравнения моментов, составленных для сил, действующих на затвор. Для того чтобы составить уравнения моментов, необходимо вначале определить точки приложения силы ( $P_1$ ) и ( $P_2$ ) (формула (3.6)).

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 – 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

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

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

где  $h_f$  – потери напора в трубе

$$h_f = h_j + h_r, \quad (3.17)$$

здесь

$$h_j = \sum \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.18)$$

где  $\sum \zeta$  принимаем равным  $\zeta_{\text{сум}}$

$$h_r = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (3.19)$$

Скорость  $\left( v = \frac{4Q}{\pi d^2} \right)$  зависит от диаметра, поэтому, подставляя необходи-

мые значения в уравнение Бернулли, дальнейшее решение производят методом подбора. Задавая 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 6

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

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_f, \quad (3.20)$$

где  $h_f$  – потери напора на участке 1-1 – 0-0, формула (3.17).

Потери напора по длине определяют по формуле (3.19).

Потери напора на местных сопротивлениях определяют по формуле (3.18), где  $\sum \zeta$  – суммарный коэффициент потерь напора в трубе.

Коэффициент гидравлического трения ( $\lambda$ ) определяется по формуле (1.7).

### ЗАДАЧА 7

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, проходящую через сечение 1-1), можно найти ( $h_n$ )

$$\frac{P_a}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_n + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f, \quad (3.21)$$

$v_1 \approx 0$ , скорость во втором сечении нельзя определить, так как диаметр всасывающей трубы неизвестен. Поэтому в начале 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 6.

### ЗАДАЧА 8

Необходимо записать уравнение Бернулли для сечения 1-1, проходящего через точку В, и 2-2 – на выходе из пластин.

Скорость в сечении 1-1 необходимо определить из условия, что площадь живого сечения равна

$$\omega_1 = \frac{\pi D}{4} a. \quad (3.22)$$

Для второго сечения

$$\omega_2 = \pi D \cdot a. \quad (3.23)$$

### ЗАДАЧА 9

Необходимо составить уравнение Бернулли вначале для восходящей части сифона, а затем для нисходящей. Слева первое сечение назначить по уровню воды в резервуаре, второе – по опасному сечению С–С.

Справа – для сечения С–С и сечения, назначенного по уровню приёмного резервуара.

Из уравнения Бернулли для восходящей части сифона определяют диаметр трубы  $d$ , считая, что трубы новые стальные, а коэффициент сопротивления  $\lambda=0,02$ .

Из уравнения Бернулли для нисходящей части сифона определяют  $\zeta_{\text{зад}}$  при заданном  $Q$  и определённом диаметре трубы  $d$ .

### ЗАДАЧА 10

Записывают уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 – первое сечение проходит по уровню воды в верхнем баке, второе – по низу трубы нижнего бака. За плоскость сравнения принять плоскость, проходящую через второе сечение.

Решаем уравнение относительно  $p_2$ . Зная  $p_2$ , можно найти показания манометра.

$$p_m = p_2 - \gamma h. \quad (3.24)$$

Потери напора определяют по формуле Вейсбаха-Дарси (3.19), а  $\lambda$  по формуле Альтшуля (1.7).

### ЗАДАЧА 11

При истечении из короткой трубы в атмосферу расход равен

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_r}} \cdot \sqrt{2gH}, \quad (3.25)$$

где  $\zeta_r = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} + \sum \zeta$ .

Так как по условию задачи местных сопротивлений нет, то

$$\zeta_r = \lambda \cdot \frac{\ell}{d}. \quad (3.26)$$

Следовательно, потери напора в трубе будут равны

$$h_f = h_r = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (3.27)$$

Потери напора от резервуара до середины трубы, где установлен пьезометр, будут равны

$$h_{\ell/2} = \lambda \cdot \frac{\ell}{2d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.28)$$

или

$$H - h = \lambda \cdot \frac{\ell}{2d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (3.29)$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{(H - h) \cdot 2d \cdot 2g}{\ell \cdot v^2} = \frac{4(H - h) \cdot d \cdot g}{\ell \cdot v^2} = \frac{(H - h) \cdot d^5 \cdot g \cdot \pi^2}{\ell \cdot 4 \cdot Q^2}. \quad (3.30)$$

Уравнение (3.25) можно представить как

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \cdot \frac{\ell}{d}}} \cdot \sqrt{2gH}. \quad (3.31)$$

Решая совместно уравнения (3.30) и (3.31), определим Q и  $\lambda$

### ЗАДАЧА 12

При истечении из бака В через цилиндрический насадок при напоре h расход равен

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (3.32)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода цилиндрического насадка.

Для определения H составляется уравнение Бернулли для сечений по уровню воды в баке А и выходному сечению трубы. Решая это уравнение, определяются H.

### ЗАДАЧА 13

При истечении из отверстия расход определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0}, \quad (3.33)$$

где  $H_0$  – полный напор над центром отверстия, м.

$$H_0 = \frac{P}{\gamma} + h + \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (3.34)$$

здесь  $v$  – скорость подхода к отверстию.

Замена отверстия насадком меняет коэффициент расхода  $\mu$  в расходной формуле, т. е.  $\mu = \mu_n$ , который нужно применять по справочной литературе.

#### ЗАДАЧА 14

Количество воды вытекающей из отверстия, определится по формуле (3.33), где в данном случае  $H_0 = h_1 + \frac{P_x}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}$ .

Так как режим установившийся, то количество воды, вытекающей из насадка  $Q_2$ , должно быть равно количеству воды поступающей из верхней секции в нижнюю секцию из отверстия  $Q_1 = Q_2$ :

Расход воды, вытекающей из насадка, определим по следующим формулам:

$$Q_2 = \mu_n \cdot \omega_n \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0}, \quad (3.35)$$

где

$$H_0 = \frac{P_x}{\gamma} + h_2, \quad (3.36)$$

тогда

$$Q_2 = \mu_n \cdot \omega_n \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{P_x}{\gamma} + h_2 \right)}. \quad (3.37)$$

Здесь  $p_x$  – давление на поверхности воды во второй секции. Из этого уравнения определяется  $p_x$ .

#### ЗАДАЧА 15

Напор над центром тяжести сечения насадка ( $H$ ) определяется из основной формулы при истечении из отверстий и насадков (см. задачу 10). Здесь считается, что ( $v_0 \approx 0$ ), тогда ( $H_0 = H$ ), и коэффициент расхода принимается для цилиндрического насадка.

Для того, чтобы определить ( $p_c$ ) и ( $v_c$ ), необходимо записать уравнение Бернулли для сечений 0-0 и С-С относительно плоскости сравнения  $O'-O'$ , проходящей через центр тяжести сечения

$$H = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = \frac{p_c}{\gamma} + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + h_f. \quad (3.38)$$

Здесь  $p_1 = p_a$ ,  $v_0 = 0$ ,  $h_f$  – потери напора в насадке

$$h_f = h_{сж} + h_{вр}, \quad (3.39)$$

где  $h_{сж}$  – потери напора на сжатие струи при входе в насадок при  $\zeta_{сж} = 0,06$



$$h_{\text{суж}} = \zeta_{\text{суж}} \cdot \frac{v_c^2}{2g} \quad (3.40)$$

и  $h_{\text{вр}}$  – потери напора при внезапном расширении струи

$$h_{\text{вр}} = \left( \frac{\omega}{\omega_c} - 1 \right) \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.41)$$

где  $v$  – скорость струи в выходном сечении, соотношение  $\left( \frac{\omega_c}{\omega} \right)$  принимается равным 0,64.

Скорость в сжатом состоянии ( $v_c$ ) определяют из уравнения неразрывности потока  $v_c \cdot \omega_c = v \cdot \omega$  и, наконец, подставляют полученные значения в уравнение Бернулли и выражают ( $p_c$ ).

### ЗАДАЧА 16

При истечении из затопленного отверстия перепад будет равен:

$$z = \frac{Q^2}{\mu^2 \cdot \omega^2 \cdot 2 \cdot g} \quad (3.42)$$

При установившемся режиме истечения из насадков рассчитать по основной формуле

$$Q = \mu_n \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (3.43)$$

где  $H$  – напор на цилиндрическом насадке.

Длину насадков считать одинаковой.

### ЗАДАЧИ 17 – 20

При решении этих задач необходимо учесть то, что табличные данные варианта необходимо умножить на соответствующий коэффициент, указанный под таблицей.

Затем устанавливают расчетные расходы для участков сети. Учитывая, что по условию задачи магистраль задана 1–2–3–4, расходы определяют для нее, а затем для ответвлений 2–5 и 3–6.

Расчетный расход какого-либо участка сети равняется сумме расходов, забираемых из сети ниже по течению. Так, для участка 4–3 (расчет начинают с конца магистрали) расчетный расход равен  $Q_{4-3} = q_4$ ; 3–2 –  $Q_{3-2} = Q_{4-3} + q_6 = q_4 + q_6$ ; 2–1 –  $Q_{2-1} = Q_{3-2} + q_5 + q' \cdot \ell_{2-5} = q_4 + q_6 + q_5 + \ell \cdot q'$ . Расчетный расход для ответвления 2–5 будет равен  $Q_{2-5} = q_5 + 0,5 \cdot q' \cdot \ell_{2-5}$ .

Определение расходов удобнее вести в табличной форме (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Определение расчетных расходов

Узлы	Узловые расходы $q$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Участки	Расчетные расходы на участках $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$
1	2	3	4
4			
		4-3	
3			
		3-2	
2			
		2-1	
1			

Расчет магистрали ведут по расходам, установленным в таблице 3.1. Длины участков даны по схеме в таблице 2.18.

Порядок расчета по всей задаче приведен в [2] стр. 186-187.

### ЗАДАЧИ 21 – 22

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 3.2).

По данным таблицы 3.2 строится график  $Q=f(b)$  и  $Q=f(h)$ . По графику для заданного расхода определяется требуемая величина ( $h$ ) или ( $b$ ).

Таблица 3.2 – Расчет канала

$b$ (h), м	$\omega = (b + mh)h$ , $\text{м}^2$	$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$ , м	$R = \frac{\omega}{\chi}$ , м	$C = \frac{1}{n} + 17,72 \cdot \lg R$ , $\text{м}^{0,5}/\text{с}$	$C\sqrt{R}$	$Q = \omega C\sqrt{Ri}$ , $\text{м}^3/\text{с}$
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 ( $R_{гн}$ ), определяется отношение, например  $\left(\frac{b}{R_{гн}}\right)$ , и по таблице XI на-

ходится  $\left(\frac{h}{R_{гн}}\right)$ . Отсюда  $h = \frac{h}{R_{гн}} \cdot h_{гн}$ .

В задаче 21 коэффициент заложения откоса определяют по справочной литературе в зависимости от грунта, например [3], таблица 8-1.

В задаче 22 коэффициент шероховатости выбирают по условиям содержания канала, например [2], таблица 2.

### ЗАДАЧА 23

Задача решается подбором глубины наполнения канала  $h$ , определяемой из уравнения равномерного движения жидкостей в канале

$$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R} \cdot i. \quad (3.44)$$

Первоначально определяется пропускная способность при глубине  $h = h_1$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{b_1 \cdot h_1}{2}, \\ \chi_1 &= 2h\sqrt{1+m^2}, \\ R_1 &= \frac{\omega_1}{\chi_1}, \\ C_1 &= \frac{1}{n} + 17,72 \cdot R_1 \end{aligned} \quad (3.45)$$

или сразу  $C\sqrt{R}$  по табл. X [2] и

$$Q_1 = \omega_1 C_1 \sqrt{R} \cdot i \quad (3.46)$$

или

$$Q_1 = \omega_1 \cdot C_1 \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt{i}. \quad (3.47)$$

Если  $Q_1 < Q$ , то назначается новая глубина  $h = h_2$ . В этом случае площадь живого сечения будет состоять из двух площадей – площади треугольника и трапеции:

$$\omega_2 = \omega_1 + \omega'; \quad (3.48)$$

$$\omega' = [b + m(h_2 - h)](h_2 - h); \quad (3.49)$$

$$\chi' = b + 2(h_2 - h)\sqrt{1+m^2}; \quad (3.50)$$

$$R' = \frac{\omega'}{\chi'}; \quad (3.51)$$

$$Q_2 = \omega' \cdot C' \cdot \sqrt{R'} \cdot i. \quad (3.52)$$

Если  $Q_2 < Q$  назначаем новую величину  $h = h_3$ . В результате такого расчёта получим функцию  $Q = f(h)$ . Построив график этой зависимости, снимаем искомую величину  $h$  (рис. 3.1)

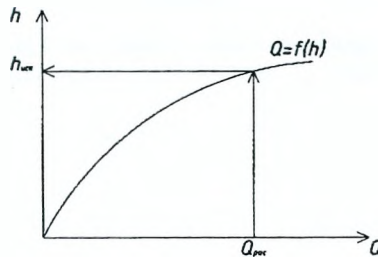


Рисунок 3.1 – График зависимости расхода  $Q$  от глубины воды в канале  $h$ .

### ЗАДАЧА 24

Расчет этой задачи приведен в [2] стр. 221-224.

### ЗАДАЧИ 25 – 28

При решении этих задач необходимо в начале определить количество и высоту ступеней, если их количество не задано. Принимая, что высота ступени не должна быть более, примерно, 3 м, определяют количество ступеней. Например, задан перепад отметок 15,6 м, тогда количество ступеней  $n = \frac{15,6}{3} = 5,2$  штук.

Принимают количество ступеней равным 5 и уточняют высоту ступени

$P_1 = \frac{15,6}{5} = 3,12$  м. После этого приступают к расчету входной части перепада.

#### Расчет входной части

Она рассчитывается, как правило, как водослив с широким порогом (в задаче 28 как водослив практического профиля). Суть расчета заключается в том, что необходимо определить ширину водослива (задача 26, 27) по основной водосливной формуле

$$b = \frac{Q}{m \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}}, \quad (3.53)$$

где  $m$  – коэффициент расхода, который в первом приближении назначают в зависимости от соотношения  $\left(\frac{b}{b_k}\right)$ , используя справочную литературу, например [2], таблицу 8-6. Затем по полученному  $\left(\frac{b}{b_k}\right)$  уточняется ( $m$ ), по той же

таблице и находится новое значение ( $b$ ).

Для задач 25 и 28 необходимо определить высоту входного порога водослива. Для этого определяют полный напор на водосливе

$$H_0 = \left( \frac{Q}{m \cdot b \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3}. \quad (3.54)$$

Здесь коэффициент расхода можно принять  $m=0,366$  (низкий порог), в 25 задаче, а в 28 он задан. Скорость подхода к водосливу определяют по формуле

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{(b + m \cdot h_0) \cdot h_0}. \quad (3.55)$$

А геометрический напор равен

$$H = H_0 - \frac{v_0^2}{2g}. \quad (3.56)$$

Высота входного порога

$$P_{вх} = h_0 - H. \quad (3.57)$$

Если окажется, что  $h_0 < H$ , то необходимо при дальнейших расчетах (расчет сопряжения с нижним бьефом) принять глубину воды  $h_0 = H$ .

### Расчет ступеней

При многоступенчатом перепаде (задача 28) рассчитывают три ступени – первую, вторую, и последнюю.

Расчет первой ступени заключается в определении высоты водобойной стенки на ступени ( $P_{ст.1}$ ) и длины водобойного колодца ( $L_k$ ) (для задач 25, 26, 28). Для задачи 27 необходимо рассчитать глубину водобойного колодца ( $d$ ) и длину ( $L_k$ ).

Высота ( $P_{ст.1}$ ) может быть определена следующим образом.

Удельная энергия ступени без входного порога

$$E_{01} = H_0 + P_1 \quad (3.58)$$

или

$$E_{01} = H_0 + P_{вх} + P_1. \quad (3.59)$$

Вторая сопряженная глубина ( $h''$ ) может быть определена различными способами. Табличный способ приводится ниже.

Определяется функция

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi_c \cdot E_{01}^{3/2}}, \quad (3.60)$$

где  $\varphi_c = 0,98$ .

По  $\Phi(\tau_c)$  и ( $\varphi_c$ ) из таблицы XXIX [2] определяют ( $\tau_c''$ ) и тогда  $h_c'' = \tau_c'' \cdot E_{01}$ .

Напор над стенкой (полагая  $m=0,42$ )

$$H_{01} = \left( \frac{q}{m \cdot \sqrt{2g}} \right)^{3/5}, \quad (3.61)$$

здесь

$$q = \frac{Q}{b}, \quad (3.62)$$

$$H_1 = H_{01} - \frac{v_1^2}{2g}, \quad (3.63)$$

$$v_1 = \frac{q}{h_c}. \quad (3.64)$$

Высота водобойной стенки на первой ступени

$$P_{ст.1} = \sigma \cdot h_{c1}'' - H_1, \quad (3.65)$$

где  $\sigma$  – коэффициент запаса,  $\sigma = (1,05-1,1)$ .

Длина водобойного колодца ( $L_{к1}$ ) определяется по формуле

$$L_{к1} = \ell_{пад} + \ell_{сп}, \quad (3.66)$$

где

$$\ell_{пад} = 1,64 \cdot \sqrt{H_0 \cdot (P + 0,24 \cdot H_0)}, \quad (3.67)$$

здесь  $P$  – высота падения струи;  $H_0$  – напор на входном водосливе.

Эта формула справедлива, если входной водослив, водослив с широким порогом при  $P_{вх}=0$ . Если входной водослив имеет порог, то длина падения струи определится по формуле

$$\ell_{пад} = 1,33 \sqrt{H_0 \cdot (P + 0,3H_0)}, \quad (3.68)$$

или

$$\ell_{пад} = 3 \cdot h_c''. \quad (3.69)$$

Расчет второй ступени ведется аналогично первой. Третья ступень перепада принимается равной второй. Так как на четвертой ступени необходимо запроектировать водобойную стенку, то она также принимается равной второй. В то же время четвертая ступень является выходной и необходимо провести проверку сопряжения потока за стенкой ( $P_{ст4}$ ).

Удельная энергия перед стенкой будет

$$E_{05} = P_{ст4} + H_{04}. \quad (3.70)$$

Определяется ( $h_c''$ ) и сравнивается с бытовой глубиной  $h_0 = h_6$ . Если  $h_c'' < h_6$ , то прыжок надвинут и расчет окончен. Если  $h_c'' > h_6$ , то рассчитывают вторую стенку. Если проверка покажет, что условие  $h_c'' < h_6$  не соблюдается – проектируют третью стенку и т. д.

В задачах 25 – 26 двухступенчатый перепад. Расчет первой ступени аналогичен расчету многоступенчатого перепада.

Вторая ступень рассчитывается следующим образом.

Определяют

$$E_{02} = P_{ст1} + H_{01} + P_1, \quad (3.71)$$

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi \cdot E_{02}^{3/2}}, \quad (3.72)$$

$$h_c'' = \tau_c'' \cdot E_{02}. \quad (3.73)$$

Если окажется, что  $h_c'' < h_0$ , то сопряжение с нижним бьефом производится с помощью надвинутого прыжка, и тогда устройство колодца не требуется. Если  $h_c'' > h_0$ , то прыжок отогнан, и требуется устройство колодца.



В первом приближении глубина водобойного колодца будет равна

$$d = h_c'' - h_6. \quad (3.74)$$

При наличии колодца глубина ( $h_c''$ ) изменится, так как энергия потока изменится на величину ( $d$ ).

Зная новую величину ( $E_0$ ), находят ( $h_c''$ ) и ( $d$ ) во втором приближении. Пересчет энергии и глубины колодца делают в третьем приближении.

Если разница в глубине колодца второго и третьего приближения менее 5 %, то дальнейшее уточнение глубины колодца не выполняют.

После этого производят расчет глубины водобойного колодца с учетом перепада ( $\Delta Z$ ) при выходе из колодца в канал и принимая коэффициент запаса  $\sigma = 1,05$ .

Расчет ведут по формуле

$$d = \sigma \cdot h_c'' - (h_0 + \Delta Z), \quad (3.75)$$

где

$$\Delta Z = \frac{q^2}{2g \cdot h_0^2} - \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (3.76)$$

здесь  $v$  – скорость в канале.

Из полученных двумя способами глубин водобойного колодца принимают большую. Длину водобойного колодца определяют по формуле

$$L_k = \ell_{\text{пад}} + \ell_{\text{пр}}, \quad (3.77)$$

где

$$\ell_{\text{пад}} = 1,33 \sqrt{H_0 (P + 0,3H_0)}. \quad (3.78)$$

В задаче 27 одноступенчатый перепад. Его расчет ведут аналогично расчету второй ступени предыдущих задач (25, 26).

### ЗАДАЧИ 29 – 31

При решении этих задач необходимо рассчитать быстроток. Расчет быстротока заключается в расчете входа, водоската и выхода. Расчет входа и выхода аналогичен расчету соответствующих частей перепада. Лишь для задачи 29 глубина водобойного колодца рассчитывается следующим образом:

$$d = h_c'' - h_0, \quad (3.79)$$

$$E_0 = h + d + \frac{v^2}{2g}, \quad (3.80)$$

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

$$L_k = \ell_{\text{нал}} + \ell_{\text{оп}}, \quad (3.81)$$

где

$$\ell_{\text{нал}} = v \cdot \sqrt{\frac{2P}{g}}, \quad (3.82)$$

здесь

$$P = d + \frac{h}{2}; \quad (3.83)$$

и

$$\ell_{\text{оп}} = 3 \cdot h_c^* \quad (3.84)$$

Расчет водоската заключается в определении уклона ( $i$ ), в задачах 29, 30, (в 31 и 32 он задан), и расчета длины кривой свободной поверхности на водоскате.

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

Используя уравнение Шези, находят

$$i = \frac{v^2}{C^2 \cdot R}, \quad (3.85)$$

или

$$\sqrt{i} = \frac{v}{C\sqrt{R}}, \quad (3.86)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.87)$$

Величину ( $C\sqrt{R}$ ) можно определить по ( $R$ ) в таблице X [2]. В задаче 30 необходимо еще определить длину водоската

$$\ell = \frac{H_1 - H_2}{i}. \quad (3.88)$$

В задачах 31 и 32 глубину воды ( $h$ ) на водоскате, которая установится в случае равномерного движения, можно определить по способу Н.Н. Агроскина (см. задачи 21–22).

Первоначально определяют функцию от гидравлически наивыгоднейшего радиуса

$$F(R_{гн}) = \frac{1}{4m_0} \cdot \frac{Q}{\sqrt{i}}, \quad (3.89)$$

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

$$h_{гп1} = h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot q^2}{g}}, \quad (3.90)$$

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

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

$$\ell = \frac{h_0}{i} \{ \eta_2 - \eta_1 - (1-j) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \}, \quad (3.91)$$

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

Вся длина кривой свободной поверхности между граничными глубинами разбивается на несколько участков (например – четыре), т. е. с глубинами  $h_{кр}$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4 = h + 0,01$  м. По уравнению Бахметьева между этими глубинами определяются длины участков и затем суммируются. Расчет лучше вести в табличной форме (таблица 3.3).

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

### Расчет выхода

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

$$h^* = \frac{h}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_k}{h} \right)^3} - 1 \right]. \quad (3.92)$$

В случае если  $h^* > h_0$  необходимо запроектировать водобойную стенку.

В задаче 29 необходимо запроектировать водобойный колодец. Расчет высоты водобойной ступени и длины ее колодца аналогичен как и для перепада, однако длина колодца  $\ell_k = \ell_{пр}$ .

Глубина водобойного колодца ( $d$ ) определяется как и для перепада, а длина

$$\ell_k = \ell_{пад} + \ell_{пр} \quad (3.93)$$

$$\ell_{пад} = v \cdot \sqrt{\frac{2P}{g}}, \quad (3.94)$$

где  $v$  – скорость на водоскате,

$$P = d + \frac{h}{2}, \quad (3.95)$$

$$\ell_{пр} = 3 \cdot h_0^4. \quad (3.96)$$

По полученным размерам строится профиль и план сооружения.

Таблица 3.3 – Определение длины кривой свободной поверхности на водоскате

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

$\Sigma \ell$

## *ЛИТЕРАТУРА*

### *Основная*

1. Чугаев, Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1982. – С. 672.
2. Андреевская, А.В. Задачник по гидравлике / А.В. Андреевская [и др.]. – 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. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А.М. Курганов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1978.
5. Вильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер [и др.]. – 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. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стальных водопроводных труб / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. – М.: Стройиздат, 1986.



Учебное издание

*Составители:*

*Громик Николай Васильевич*

*Мешик Олег Павлович*

*Шешко Николай Николаевич*

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

**по курсу «Гидравлика»  
для студентов специальности 1–74 05 01  
«Мелиорация и водное хозяйство»**

Ответственный за выпуск: Громик Н.В.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано в печать 16.12.2015 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 3,72. Уч. изд. л. 4 0. Заказ № 1275. Тираж 100 экз.  
Опечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.