

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ  
АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**Общие сведения**

1.	Кафедра	<b>Горного дела, наук о Земле и природообустройства</b>
2.	Специальность	<b>21.05.04 «Горное дело» специализация №2 «Подземная разработка рудных месторождений»</b>
3.	Дисциплина (модуль)	<b>Б1.Б.14 Гидромеханика</b>
4.	Количество этапов формирования компетенций (ДЕ, разделов, тем и т.д.)	<b>10</b>

**Перечень компетенций**

– готовностью с естественнонаучных позиций оценивать строение, химический и минеральный состав земной коры, морфологические особенности и генетические типы месторождений твердых полезных ископаемых при решении задач по рациональному и комплексному освоению георесурсного потенциала недр (ОПК-4).

### Критерии и показатели оценивания компетенций на различных этапах их формирования

Этап формирования компетенции (разделы, темы дисциплины)	Формируемая компетенция	Критерии и показатели оценивания компетенций			Формы контроля сформированности компетенций
		Знать:	Уметь:	Владеть:	
1. Введение. Свойства и параметры состояния жидкости	ОПК-4	Основные свойства жидкого и газообразного состояния вещества	Понять поставленную задачу, собрать необходимую информацию для ее решения		Опрос
2. Гидростатика	ОПК-4	Основные свойства жидкого и газообразного состояния вещества	Уметь решать задачи взаимодействия покоящейся жидкости со стенками сосуда, в котором она находится	Основными законами равновесия вязких жидкостей и газов	Решение задач
3. Кинематика потенциальных и вихревых потоков	ОПК-4	Основные свойства жидкого и газообразного состояния вещества	Применять модели течения жидкости и газа	Методикой расчета трубопроводов для жидкости и газа	Опрос
4. Основные законы и уравнения статики и динамики идеальных и реальных жидкостей. Гидромеханика упругой невязкой жидкости	ОПК-4	Условия использования гидравлического горнодобывающего оборудования применительно к конкретным задачам	Применять основное уравнение гидростатики и уравнение Бернулли для решения практических задач	Методикой расчета трубопроводов для жидкости и газа	Решение задач, лабораторная работа
5. Движение напорных потоков вязкой жидкости	ОПК-4	Методы решения базовых задач гидростатики и гидродинамики реальных жидкостей	Решать прямую и обратную задачи гидравлики	Навыками оценки реальности получаемых или исследуемых гидромеханических параметров в их числовом выражении	Решение задач, лабораторная работа
6. Гидравлические сопротивления	ОПК-4	Методы расчёта простых и сложных гидравлических сетей	Применять основные законы механики жидких и газообразных сред при работе на горнорудных предприятиях Определять энергетические потери при движении реальных жидкостей в гидравлических системах	Расчётами на основании типовых методик.	Решение задач, лабораторная работа
7. Взаимодействие тел с потоком жидкости	ОПК-4	Методы расчёта простых и сложных гидравлических	Расчислять характеристики процесса	Решением проблем при разведке месторождений	Опрос, лабораторная работа

Этап формирования компетенции (разделы, темы дисциплины)	Формируемая компетенция	Критерии и показатели оценивания компетенций			Формы контроля сформированности компетенций
		Знать:	Уметь:	Владеть:	
		сетей	истечения жидкостей из отверстий и насадок	полезных ископаемых и определении предварительных границ горных отводов для строительства и эксплуатации горных предприятий	
8. Основы теории фильтрации	ОПК-4	Методы расчёта простых и сложных гидравлических сетей и основы расчёта фильтрационных задач, встречающихся в горном деле	Использовать методы выполнения гидравлических экспериментов, имеющих место в технологических процессах подземной разработки полезных ископаемых, обобщать полученные результаты	Знанием закономерностей поведения и управления свойствами горных пород и состоянием массива в процессах добычи и переработки твердых полезных ископаемых, а также при строительстве и эксплуатации подземных сооружений	Опрос
9. Моделирование гидравлических процессов	ОПК-4	Знать теорию подобия гидромеханических процессов	Применять основные законы механики жидких и газообразных сред и модели течения жидкости и газа	Моделировать безопасные производственные процессы	Опрос
10. Элементы теории размерностей	ОПК-4	Приближенное подобие и моделирование	Применять основные законы механики жидких и газообразных сред и модели течения жидкости и газа	Методами теории подобия и размерностей в процессах движения жидкости и газа и основ моделирования гидромеханических явлений	Опрос

## Критерии и шкалы оценивания

### 1. Опрос

Процент правильных ответов	До 60	60-80	81-100
Количество баллов	1.2	1.6	2

### 2. Решение задач

6 баллов – студент решил все рекомендованные задачи, правильно изложил все варианты их решения, аргументировав их, с обязательной ссылкой на соответствующие нормативы (если по содержанию это необходимо).

4 балла – студент решил не менее 85% рекомендованных задач, правильно изложил все варианты решения, аргументировав их, с обязательной ссылкой на соответствующие нормативы (если по содержанию это необходимо).

2 балла – студент решил не менее 65% рекомендованных задач, правильно изложил все варианты их решения, аргументировав их, с обязательной ссылкой на соответствующие нормативы (если по содержанию это необходимо).

0 баллов – студент выполнил менее 50% задания, и/или неверно указал варианты решения.

### 3. Лабораторная работа

Структура лабораторной работы	Максимальное количество баллов
<b>Содержание</b>	
Выполнение работы в отчете изложено полно, четко и правильно	2
Иллюстрации усиливают эффект восприятия текстовой части информации	2
Сделаны выводы	2
<b>Максимальное количество баллов</b>	<b>6</b>

*Типовые контрольные задания и методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы*

#### 1) Типовые вопросы к опросу

##### 1. Капельные и упругие жидкости

*Ответ:* В теории гидромеханики под термином «жидкость» подразумеваются капельные и упругие жидкости (газы и пары) благодаря их общему физическому свойству – текучести. Поэтому, прежде всего, в гидравлике и гидромеханических процессах жидкости рассматриваются как текучие среды (вещества), способные самопроизвольно занимать и принимать форму всего объема сосуда, в котором они заключены. Кроме того, жидкости представляются как сплошные среды с непрерывно распределенной плотностью. Под этим понятием имеется в виду среда, частицы которой равномерно распределены по всему ее объему без «разрывов», т.е. в любой точке объема существуют частицы среды и обладают определенной плотностью.

Различают следующие виды жидкостей:

– Идеальная жидкость – обладает абсолютной текучестью, абсолютно несжимаема и в ней полностью отсутствуют силы сцепления между частицами.

– Реальная жидкость – обладает всеми указанными выше свойствами. Главные и основные свойства жидкости – текучесть и вязкость.

– Гомогенная жидкость – жидкость, состоящая из одного или нескольких компонентов, не имеющих границу раздела между собой (истинные растворы).

– Гетерогенная жидкость – жидкость, состоящая из одного или нескольких компонентов, которые имеют границу раздела между собой – двух или трехфазные системы (суспензии, дымы, пыли, туманы и эмульсии).

## 2. Силы, действующие в реальной жидкости

*Ответ:* Жидкости, находящиеся в покое или движении постоянно находятся под воздействием различных сил. Все действующие силы подразделяются на объемные и поверхностные силы.

*Объемные силы.* Эта категория сил относится к массовым силам, поскольку их величина зависит от массы жидкости, и действуют они на каждую частицу данного объема жидкости. К этим силам относятся силы тяжести и силы инерции, в т.ч. центробежные силы.

Характеристикой интенсивности силы тяжести  $G$ , действующей на конкретный объем  $V$ , является удельный вес  $\gamma$  жидкости:

$$\gamma = \lim G/V = \lim (mg/V) = \rho g \text{ Н/м}^3.$$

*Поверхностные силы.* Эти силы действуют на поверхности, ограничивающие данный объем. К таким силам относятся силы давления и поверхностного натяжения. Обычно в теории оперируют понятием напряжения, т.е. отношением силы к величине поверхности, на которую они действуют. При этом необходимо помнить, что любая действующая сила на поверхность, как векторная величина, может быть разложена на нормальную и касательную составляющие (нормальное и касательное напряжение). Нормальная составляющая направлена перпендикулярно поверхности и результатом ее действия является сжатие (растяжение), а касательная направлена по касательной к поверхности, т.е. вдоль нее, и результатом ее действия является сдвиг слоев. В трехмерных декартовых координатах рассматриваются проекции векторов сил на соответствующие координатные плоскости.

## 3. Вязкость жидкости

*Ответ:* Свойство жидкости оказывать сопротивление усилиям, вызывающим относительное перемещение ее слоев. Вязкость определяется в соответствии с законом внутреннего трения Ньютона:

$$\tau = \frac{T}{S} = -\mu \left( \frac{\partial w}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0},$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Коэффициент динамической вязкости определяется экспериментально в соответствии со стандартами и для большинства жидкостей является справочной величиной. При отсутствии справочных данных вязкость может быть рассчитана по полуэмпирическим уравнениям.

Кроме коэффициента динамической вязкости на практике широко используется показатель кинематической вязкости, равный отношению динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right].$$

## 4. Закон Ньютона для внутреннего трения в жидкости

*Ответ:* Касательная сила  $T$ , которую необходимо приложить к верхнему слою жидкости для его равномерного сдвига относительно нижнего слоя (или противоположно направленной силе трения  $T$ , с которой нижний слой сопротивляется перемещению верхнего), тем больше, чем больше чем больше градиент скорости.

Согласно такому определению напряжение внутреннего трения, возникающее между слоями жидкости при ее течении, прямо пропорционально градиенту скорости:

$$\tau = -\mu \left( \frac{dw}{dn} \right).$$

Знак минус в правой части уравнения указывает на то, что касательное напряжение тормозит слой, движущейся с относительно большей скоростью на величину  $\Delta w$ .

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  в уравнении называется динамическим коэффициентом вязкости. Часто вязкость жидкостей характеризуется кинематическим коэффициентом вязкости  $\nu$ , который определяется отношением динамического коэффициента к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma}.$$

## 5. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости

Ответ:  $\frac{P}{\rho g} + z + \frac{w^2}{2g} = H = \text{const}$

Физический смысл уравнения Бернулли состоит в том, что оно выражает закон сохранения энергии движущейся жидкости: сумма потенциальной и кинетической энергий есть величина постоянная. Первый член уравнения  $P/\rho g$  – статический, или **пьезометрический напор**, равный давлению столба жидкости над рассматриваемым уровнем, относительно точки отсчета, выражает удельную энергию давления в этой точке; второй  $z$  – **нивелирная высота, или геометрический напор**, который равен геометрической высоте данной точки и который выражает удельную потенциальную энергию положения точки. Сумма два первых членов уравнения – полная потенциальная энергия жидкости в данной точке есть величина постоянная (закон сохранения энергии – основной закон гидростатики). Третье слагаемое  $w^2/2g$  – **скоростной (динамический) напор**, который выражает удельную кинетическую энергию в данной точке.

### 2) Примеры задач

1. Определить объем воды, который необходимо дополнительно подать в водовод диаметром  $d = 500$  мм и длиной  $l = 1$  км для повышения давления до  $\Delta p = 5 \cdot 10^6$  Па. Водовод подготовлен к гидравлическим испытаниям и заполнен водой при атмосферном давлении. Деформацией трубопровода можно пренебречь. Значения коэффициента объемного сжатия воды  $\beta_v = 5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/Н.

Решение: Вместимость водовода

$$V_g = \frac{\pi d^2}{4} l = 196.2 \text{ м}^3.$$

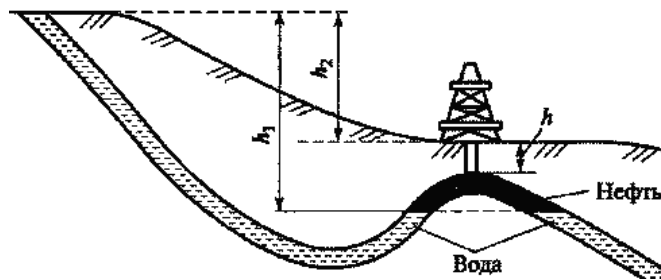
Объем воды  $\Delta V$ , необходимый для подачи в водовод для повышения давления, найдем из соотношения для коэффициента объемного сжатия:

$$\beta_v = \frac{\Delta V}{V \Delta P} = \frac{\Delta V}{(V_g + \Delta V) \Delta P}.$$

Тогда  $\Delta V = \frac{V_g \cdot \beta_v \Delta P}{1 - \beta_v \Delta P} = 0.492 \text{ м}^3.$

Ответ:  $\Delta V = 0.492 \text{ м}^3.$

2. Грунтовые воды, формирующие систему с нефтяным пластом, выходят на поверхность (рис.). Какова должна быть плотность глинистого раствора, применяемого при бурении ( $\rho_{\text{min}}$ ), чтобы не было фонтанирования нефти при вскрытии пласта? Глубина скважины  $h = 2500$  м; расстояние между уровнем выхода подземных вод на поверхность и границей вода–нефть  $h_1 = 3200$  м; расстояние между уровнем выхода грунтовых вод на поверхность и устьем скважины  $h_2 = 600$  м; плотность подземных вод  $\rho_v = 1100$  кг/м<sup>3</sup>; плотность нефти  $\rho_n = 850$  кг/м<sup>3</sup>.



Решение: Составим уравнение равновесия системы грунтовые воды – нефть:

$$\rho_e g h_1 = \rho_{\min} g h + \rho_n g (h_1 - h_2 - h).$$

Тогда

$$\rho_{\min} = \frac{\rho_e g h_1 - \rho_n g (h_1 - h_2 - h)}{g h} = \frac{1100 \cdot 10 \cdot 3200 - 850 \cdot 10 \cdot 100}{10 \cdot 2500} = 1374 \text{ кг/м}^3.$$

Ответ:  $\rho_{\min} = 1374 \text{ кг/м}^3$ .

### 3) Пример лабораторной работы

#### Лабораторная работа

#### Гидравлический расчет напорных трубопроводов

#### Задание

На рисунках изображены системы, состоящие из гидробака (резервуара) и трубы переменного (постоянного) сечения. Движение жидкости плотностью  $\rho$  происходит под действием давления, создаваемого баком. Согласно варианту определить:

1. Скорость истечения жидкости, расход и потери напора вдоль трубы, предполагая турбулентное движение.
2. Уточнить режим движения жидкости в трубе, если кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).
3. Построить линию полных напоров и пьезометрическую линию (в масштабе).

Исходные данные для выполнения студентами лабораторной работы приведены в таблице 1.1.

#### Значения исходных данных к лабораторной работе

Таблица 1.1

Варианты Дано	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высота от сечения трубы до поверхности ж-ти $H$ , м	4	3	5	4	3	5	4	3	5
Плотность жидкости $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	950	720	780	1000	800	900	850	820	720
Длина первой трубы $l_1$ , м	5	4	3	5	4	3	4	4,8	4
Диаметр первой трубы $d_1$ , мм	40	50	32	40	80	50	32	40	40
Длина второй трубы $l_2$ , м	5	4	4	3,5	4,5	3	4,4	3,3	3,5
Диаметр второй трубы $d_2$ , мм	32	25	20	30	50	30	20	25	20
Коэффициент гидравлического сопротивления трения $\lambda$	0.04	0.03	0.04	0.03	0.035	0.04	0.03	0.04	0.035
Коэффициент местного сопротивления (крана) $\xi_{\text{кр}}$	2	1	3	1,5	2	2,5	1,5	1,0	2
Кинематическая вязкость жидкости $\nu \cdot 10^4$ , $\text{м}^2/\text{с}$	0.01	0.0065	0.0065	0.01	0.8	0.8	0.015	0.15	0.8

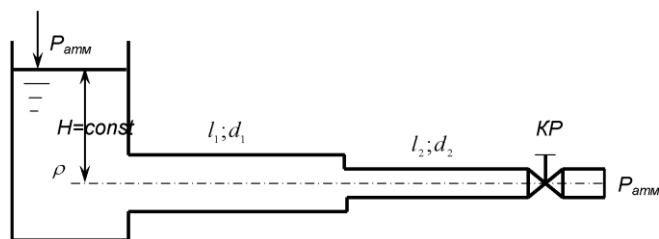


Рисунок 1.1 – Схема системы, состоящей из гидробака и трубы переменного сечения.

КР – кран

### Пример выполнения работы

Рассмотрим методику выполнения поставленной задачи для нижеприведенной трубопроводной системы (рис.1.4).

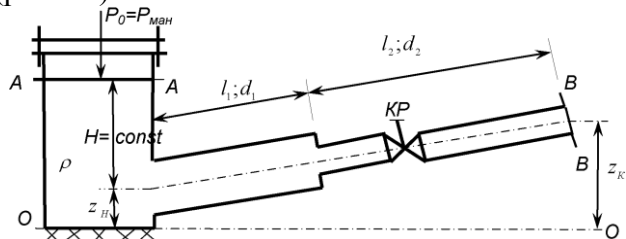


Рисунок 1.2 – Схема трубопроводной системы

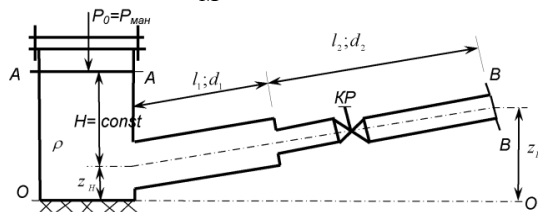
На схеме изображена система, состоящая из гидробака (резервуара) и трубы переменного сечения. Движение жидкости плотностью  $\rho$  происходит под действием давления, создаваемого баком.

Определить:

1. Скорость истечения жидкости  $v$ , расход  $Q$  и потери напора вдоль трубы, предполагая турбулентное движение.
2. Уточнить режим движения жидкости в трубе, если кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).
3. Построить линию полных напоров и пьезометрическую линию (в масштабе).

Дано:

$H = 4 \text{ м};$	$d_1 = 32 \text{ мм}$	$z_1 = 1 \text{ м};$	$l_2 = 12 \text{ м}$	$\nu \cdot 10^4 = 0.025 \text{ м}^2/\text{с}$	Определить: $v_1, v_2, Q$ , режим движения жидкости (Re)
$P_0 = P_{\text{ман}} = 0.05 \text{ МПа} = 50000 \text{ Па};$	$d_2 = 20 \text{ мм}$	$z_2 = 2 \text{ м}$	$\xi_{\text{кр}} = 2$		
$\rho = 800 \text{ кг/м}^3$	$\lambda = 0.03$	$l_1 = 8 \text{ м}$			



### Решение.

1. Определяем скорости истечения жидкости  $v$ , расход  $Q$  и потери напора вдоль трубы, предполагая турбулентное движение.

Запишем уравнение Бернулли относительно сечений А-А (на свободной поверхности бака) и В-В на выходе жидкости из трубы в атмосферу.

$$z_A + \frac{P_A}{\rho g} + \alpha_A \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\rho g} + \alpha_B \frac{v_B^2}{2g} + \sum h_{\text{ном}}^{A-B}, \quad (1)$$

т.к. предполагается движение жидкости турбулентным, то коэффициенты Кориолиса  $\alpha_A = \alpha_B = 1$ .



В свернутом виде (1):

$$H_A = H_B + \sum h_{nom}^{A-B},$$

где  $H_A, H_B$  – полный напор в сечениях А-А и В-В соответственно;  $\sum h_{nom}^{A-B}$  – общие потери напора между ними.

Напоры определяем относительно плоскости сравнения, проходящей через линию О-О.

Определяем граничные условия:

$$z_A = z_H + H; \quad p_A = p_{атм} + p_{ман}; \quad v_A = 0 \text{ м/с (при } H = const);$$

$z_B = z_K; \quad p_B = p_{атм}; \quad v_B = v_2$  – скорость истечения из второй трубы;  $\alpha_A = \alpha_B = 1$ , т.к. режим движения турбулентный.

Подставим в уравнение (1) граничные условия:

$$z_A + H + \frac{P_{атм} + P_{ман}}{\rho g} = z_K + \frac{P_{атм}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_{nom}^{A-B}$$

после преобразований получаем

$$z_A + H + \frac{P_{ман}}{\rho g} = z_K + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_{nom}^{A-B}. \quad (2)$$

Т.к. заданный трубопровод простой, состоящий из двух последовательно соединенных труб, то общие потери следует определять как арифметическую сумму всех потерь:  $h_{вх}$  – потери на вход в трубу;  $h_{l1}$  и  $h_{l2}$  – потери по длине на соответствующих участках;  $h_{в.с}$  – потери на внезапное сужение потока в сечении при изменении диаметров трубы от  $d_1$  к  $d_2$ ;  $h_{кр}$  – потери в кране.

Общие потери напора  $\sum h_{nom}^{A-B}$  складываются из потерь по длине  $h_{дл}$  и местных потерь  $h_m$ . Основной расчетной формулой для определения потерь напора по длине (потерь на трение) в круглых трубах является универсальная формула Вейсбаха-Дарси:

$$h_{дл} = \lambda \frac{d}{l} \frac{v^2}{2g}, \quad (3)$$

где  $l, d$  – длина и диаметр трубопровода;  $\frac{v^2}{2g}$  – скоростной напор;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения (коэффициент Дарси), который зависит от режима движения и шероховатости стенок трубы.

Любая местная потеря напора определяется по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления, который определяется режимом движения жидкости и видом местного сопротивления в сечении (изменение сечения, трубопроводная арматура и т. п.).

Таким образом, имеем:  $h_{вх} = \xi_{вх} \frac{v_1^2}{2g}; \quad h_{l1} = \lambda \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g}; \quad h_{l2} = \lambda \frac{l_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2g}; \quad h_{в.с} = \xi_{в.с} \frac{v_2^2}{2g}; \quad h_{кр} = \xi_{кр} \frac{v_2^2}{2g}.$

Согласно формулам 3 и 4 определяем общие потери напора  $\sum h_{nom}^{A-B}$  в сечении В-В:

$$\begin{aligned} \sum h_{nom}^{A-B} &= h_{вх} + h_{l1} + h_{l2} + h_{в.с} + h_{кр} = \xi_{вх} \frac{v_1^2}{2g} + \lambda \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} + \lambda \frac{l_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{в.с} \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{кр} \frac{v_2^2}{2g} = \\ &= \frac{v_1^2}{2g} (\xi_{вх} + \lambda \frac{l_1}{d_1}) + \frac{v_2^2}{2g} (\lambda \frac{l_2}{d_2} + \xi_{в.с} + \xi_{кр}). \end{aligned} \quad (5)$$

Из (2) можно определить располагаемый напор  $H_{\text{расп.}}$ , который затрачивается на преодоление всех сопротивлений и сообщение скорости  $v_2$  на выходе жидкости из трубы.

$$z_A - z_K + H + \frac{P_{\text{ман}}}{\rho g} = H_{\text{расп.}},$$

где  $H_{\text{расп.}} = \sum h_{\text{ном}}^{A-B} + \frac{v_2^2}{2g}$  – располагаемый напор.

В (5) неизвестны параметры: коэффициенты местного сопротивления на внезапное сужение потока  $\xi_{\text{вх}}$  и  $\xi_{\text{в.с}}$ , скорости жидкости  $v_1$  и  $v_2$ . Скорости жидкости выразим через объемный расход  $Q$ , который не изменяется вдоль потока:

$$Q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \text{const},$$

где площади живых сечений  $S_1$  и  $S_2$  можно определить по формулам:

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}, \quad S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}.$$

Следовательно,  $v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2}$ ,  $v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2}$ . Тогда с учетом (5)

$$\begin{aligned} H_{\text{расп.}} &= \sum h_{\text{ном}}^{A-B} + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g} (\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{l_1}{d_1}) + \frac{v_2^2}{2g} (\lambda \frac{l_2}{d_2} + \xi_{\text{в.с}} + \xi_{\text{кр}}) + \frac{v_2^2}{2g} = \\ &= \frac{16Q^2}{\pi^2 d_1^4 2g} (\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{l_1}{d_1}) + \frac{16Q^2}{\pi^2 d_2^4 2g} (\xi_{\text{в.с}} + \lambda \frac{l_2}{d_2} + \xi_{\text{кр}} + 1). \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения коэффициентов местного сопротивления  $\xi$  необходимо помнить, что в трубе может быть внезапное сужение или расширение трубопровода.

Внезапное расширение трубопровода. Потери на внезапное расширение  $h_{\text{в.р}}$  согласно закону Борда находят по формуле:

$$h_{\text{в.р.}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g},$$

где  $v_1$  – скорость до расширения;  $v_2$  – скорость потока после расширения потока.

Из формулы Борда следует, что потери напора при внезапном расширении равны скоростному напору от потерянной скорости  $(v_1 - v_2)$ .

Используя универсальную формулу Вейсбаха, получим

$$h_{\text{в.р.}} = \xi_1 \frac{v_1^2}{2g} = \xi_2 \frac{v_2^2}{2g},$$

где  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – коэффициенты, отнесенные к скоростному напору до и после расширения и соответственно равны

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2, \quad \xi_2 = \left(\frac{d_1^2}{d_2^2} - 1\right)^2. \quad (7)$$

Т.к  $v_1 > v_2$ , следовательно,  $\xi_1 < \xi_2$ .

Внезапное сужение трубопровода. Для практических расчетов можно пользоваться полуэмпирической формулой И.Е. Идельчика

$$\xi_{\text{в.с}} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot 0.5 = 0.5 \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2}\right), \quad (8)$$

где  $n = \frac{d_1^2}{d_2^2}$  – степень сужения;  $d_1$ ,  $d_2$  – диаметры трубопроводов до и после сужения. Потеря напора  $h_{\text{вс}}$  определяется долей скоростного напора после сужения, т.е.

$$h_{в.с} = \xi_{в.с} \frac{v_2^2}{2g} = 0.5 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) \cdot \frac{v_2^2}{2g}.$$

Теперь определяем значение неизвестного коэффициента местного сопротивления для случая внезапного сужения трубопровода согласно (8):

$$\xi_{в.с} = 0.5 \left( 1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right) = 0.5 \left( 1 - \frac{20^2}{32^2} \right) = 0.3,$$

$$\xi_{вх} = 0.5.$$

Рассчитываем располагаемый напор  $H_{расп.}$ , объемный расход  $Q$  и скорости жидкости  $v_1$  и  $v_2$ . Все линейные величины должны быть подставлены в метрах (м), ускорение свободного падения принимаем  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

$$H_{расп.} = z_A - z_K + H + \frac{P_{ман}}{\rho g} = 1 - 2 + 4 + \frac{50000}{800 \cdot 9.81} = 9.37 \text{ м},$$

$$Q = \sqrt{\frac{2gH_{расп.}}{\left( \xi_{вх} + \lambda \frac{l_1}{d_1} \right) / d_1^4 + \left( \xi_{в.с} + \lambda \frac{l_2}{d_2} + \xi_{кр} + 1 \right) / d_2^4}} \cdot \frac{\pi}{4} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 9.37}{\left( 0.5 + 0.03 \frac{8}{32 \cdot 10^{-3}} \right) / (32 \cdot 10^{-3})^4 + \left( 0.3 + 0.03 \frac{12}{20 \cdot 10^{-3}} + 2 + 1 \right) / (20 \cdot 10^{-3})^4}} \cdot \frac{3.14}{4} =$$

$$= 0.000897 \text{ м}^3 / \text{с} = 0.897 \text{ л/с} \approx 0.9 \text{ л/с}.$$

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0.000897}{3.14 (32 \cdot 10^{-3})^2} = 1.116 \text{ м/с};$$

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 0.000897}{3.14 (20 \cdot 10^{-3})^2} = 2.857 \text{ м/с}.$$

Определяем скоростные напоры

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{1.116^2}{2 \cdot 9.81} = 0.0635 \text{ м}; \quad \frac{v_2^2}{2g} = \frac{2.857^2}{2 \cdot 9.81} = 0.416 \text{ м}.$$

2. Уточним режим движения по безразмерному критерию числу Рейнольдса – Re.

Возможны два различных по своему характеру режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

При ламинарном режиме жидкость движется слоями без поперечного перемешивания, причем пульсация скорости и давления отсутствуют.

При турбулентном режиме слоистость нарушается, движение жидкости сопровождается перемешиванием и пульсациями скорости и давления.

Критерием для определения режима движения является безразмерное число Рейнольдса – Re.

Для труб круглого сечения число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = v d / \nu,$$

для потоков произвольного поперечного сечения

$$Re_{R_{\Gamma}} = \frac{v \cdot R_{\Gamma}}{\nu},$$

где  $v$  – средняя скорость жидкости;  $d$  – диаметр трубы;  $R_{\Gamma}$  – гидравлический радиус;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Режим будет ламинарным, если  $Re \leq Re_{кр}$ , и турбулентным, если  $Re > Re_{кр}$ . Для круглых труб обычно принимают  $Re_{кр} = 2300$ , и  $Re_{кр} = 580$  для некруглых.

Определяем число Рейнольдса для первой трубы

$$Re_1 = \frac{1.116 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{0.025 \cdot 10^{-4}} = 14285.$$

Режим турбулентный, т.к.  $Re_1 > Re_{кр} = 2300$ .

Для второй трубы

$$Re_2 = \frac{2.857 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{0.025 \cdot 10^{-4}} = 22856.$$

$Re_2 > Re_{кр}$  – режим турбулентный.

3. Последовательность построения графика Бернулли.

**Замечание.** Для построения графика А.Д. Бернулли следует выбрать масштаб длин и масштаб высот (напоров).

Проводим плоскость сравнения О-О и на ней отмечаем характерные точки: 0; 1 – вход в трубу  $l_1$  (перед выходом и после входа соответственно); 2 – внезапное сужение; 3 – кран; 4 – выход из трубы. Через эти точки проводим вспомогательные вертикальные линии. Точка  $O'$  соответствует значению полного (начального) напора. Перед входом в трубу  $H_{нач} = z_H + H + P_{ман}/(\rho g) = 11.37$  м. Проводим через точку  $O'$  горизонтальную линию  $H_A - H_A$  начального напора, которая по физической сущности является линией полной удельной энергии в случае движения идеальной жидкости, т.е. при движении без потерь напора (энергии).

После входа потока в трубу (точка 1) произойдет потеря на вход  $h_{вх} = \xi_{вх} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = 0.0318$  м. От точки  $O'$  вниз следует отложить  $h_{вх}$ , получим точку  $1'$ . Высота  $1-1'$  будет соответствовать напору в начале трубы  $l_1$ . К концу трубы  $l_1$  напор уменьшится постепенно на  $h_{l_1} = \lambda \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} = 0.476$  м. После прохождения внезапного сужения произойдет

потеря напора на величину  $h_{в.с.} = \xi_{в.с.} \frac{v_2^2}{2g} = 0.125$  м, получим точку  $2'$  и т.д. Линия

$O'-1'-2'-3'-4'$  будет линией полного напора реальной жидкости, вязкость и плотность которой заданы значениями кинематической вязкости  $\nu$  и давлением  $P$ . Потери напора при движении потока по трубе показаны заштрихованной областью.

Для построения пьезометрической линии необходимо отложить вниз от линии полного напора в соответствующих точках значения скоростных напоров  $\frac{v_1^2}{2g}$  в первой трубе,  $\frac{v_2^2}{2g}$  во второй трубе. Линия  $O''-1''-2''-3''-4''$  – пьезометрическая линия.



Рисунок 1.3 – График Бернулли

## Вопросы к экзамену

1. Определение науки «гидромеханика».
2. Реальные и идеальные жидкости.
3. Единицы измерения физических величин, применяемых в гидромеханике. Основные физико-механические свойства жидкости.
4. Силы, действующие в жидкости вязкость.
5. Закон Ньютона для внутреннего трения в жидкости.
6. Зависимость вязкости от температуры и давления. Вискозиметры.
7. Гидростатическое давление.
8. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости.
9. Интеграл уравнений Эйлера для несжимаемой жидкости.
10. Уравнение поверхности равного давления. Методы и приборы для измерения давления.
11. Абсолютное и избыточное давление. Вакуум.
12. Гидростатический напор и энергетический закон для жидкости, находящейся в равновесии. Основное уравнение гидростатики.
13. Сила давления жидкости на плоскую стенку.
14. Сила давления жидкости на криволинейные стенки.
15. Прямолинейное равноускоренное движение сосуда с жидкостью.
16. Равномерное вращение сосуда с жидкостью.
17. Простые гидравлические машины. Гидравлический пресс.
18. Гидравлический аккумулятор. Закон Архимеда.
19. Основные кинематические понятия и определения.
20. Два метода исследования движения жидкости.
21. Траектории частиц и линии тока. Установившееся движение.
22. Струйчатая модель движения жидкости. Трубка тока.
23. Расход жидкости. Средняя скорость.
24. Дифференциальные уравнения линий тока.
25. Плоское движение. Функции тока.
26. Вихревое и безвихревое потенциальное течение жидкости.
27. Уравнение неразрывности в переменных Эйлера в декартовой системе координат.
28. Дифференциальные уравнения движения идеальной (невязкой) жидкости (уравнения Навье-Стокса).
29. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.
30. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости.
31. Графическая иллюстрация уравнения Бернулли для потока реальной жидкости.
32. Практическое применение уравнения Бернулли.
33. Трубка Прандтля. Трубка Вентури, сопло, диафрагма.
34. Установившееся движение. Безвихревое движение.
35. Установившееся безвихревое движение.
36. Ограничения, налагаемые на скорость. Формула Торричелли.
37. Вихревые движения идеальной жидкости: теорема Томсона, теорема Лагранжа, теоремы Гельмгольца
38. Уравнения Навье - Стокса.
39. Физический и геометрический смысл уравнения Бернулли. Напор жидкости.
40. Интеграл Бернулли для вязкой жидкости при установившемся движении.
41. Коэффициент Кориолиса.
42. Общие сведения о местных сопротивлениях.
43. Поворот русла. Местные сопротивления при ламинарном течении.
44. Кинематические условия в случае одного тела.
45. Коэффициент присоединенной массы. Выражение для гидродинамических сил.
46. Три постоянных направления движения; устойчивость.
47. Движение тела вращения. Устойчивость движения, параллельного оси симметрии.

48. Влияние вращения. Другие случаи установившегося движения.
49. Движение винтовой поверхности. Коэффициент при соединенной массы жидкости, заключенной в движущейся твердой оболочке.
50. Уравнения Лагранжа в обобщенных координатах.
51. Принцип Гамильтона. Применение в гидродинамике.
52. Движение сферы вблизи твердой стенки.
53. Основные уравнения динамики подземных вод.
54. Законы фильтрации, коэффициенты фильтрации, водонасыщенность и водоотдача, уравнение Дарси.
55. Уравнение неразрывности фильтрационного потока.
56. Напорная и безнапорная фильтрация.
57. Стационарные задачи фильтрации.
58. Фильтрационный расход через прямоугольную перемычку.
59. Приток воды к совершенному круглому одиночному колодцу.
60. Приток воды к совершенному артезианскому колодцу.
61. Дифференциальное уравнение нестационарной фильтрации.
62. Приток воды к галерее, расположенной на водоупоре (нестационарная задача).
63. Приток воды к совершенному колодцу, расположенному на водоупоре (нестационарная задача).
64. Фильтрация в пласте в напорном и безнапорном случае.
65. Водоприток к совершенным и несовершенным скважинам, депрессионные кривые, радиус влияния скважины.
66. Гидравлический расчет трубопроводов: назначение и классификация трубопроводов; расчет и проектирование трубопроводов; гидравлический расчет простого трубопровода; метод эквивалентных потерь; гидравлический расчет сложных трубопроводов; гидравлические характеристики трубопроводов; гидроэнергетический баланс насосной установки; сифонные трубопроводы; гидравлический удар в трубах; кавитация.
67. Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке.
68. Истечение жидкости через большое отверстие.
69. Истечение жидкости через затопленное отверстие.
70. Истечение жидкости при переменном напоре.
71. Истечение жидкости через насадки.
72. Гидравлический расчет открытых русел. Взаимодействие потока и твердого тела.
73. Классификация водосливов. Гидравлический расчет водосливов.
74. Подобие физических явлений.
75. Анализ размерностей и П-теорема.
76. Числа гидрогазодинамического подобия.
77. Моделирование движения жидкости и газа.
78. Приближенное подобие и моделирование.