



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

**Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство,
водный транспорт и гидравлика»**

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Практикум

**Минск
БНТУ
2025**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство,
водный транспорт и гидравлика»

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Практикум

для студентов специальности

7-07-0732-02 «Инженерные сети, оборудование зданий и сооружений»
профилизаций «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»
и «Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2025

УДК 532
ББК 22.253я7
М55

А в т о р ы:

*И. В. Качанов, М. К. Щербакова,
И. М. Шаталов, Б. Б. Хасанов*

Р е ц е н з е н т ы:

А. И. Голоскок, А. С. Дмитриченко

М55 **Механика** жидкости и газа: практикум для студентов специальности 7-07-0732-02 «Инженерные сети, оборудование зданий и сооружений» профилизаций «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» и «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» / И. В. Качанов [и др.] – Минск : БНТУ, 2025. – 91 с.
ISBN 978-985-31-0101-0.

В практикуме изложены задания, требования к содержанию и объему расчетно-графической работы, даны рекомендации по ее выполнению; приведены примеры решения задач по всем темам расчетно-графической работы.

При подготовке практикума были использованы материалы учебников и учебных пособий следующих авторов: А. Д. Альтшуля, А. И. Богомолова, В. И. Калицуна, Н. М. Константинова, Р. Р. Чугаева, С. Ф. Рапинчук и т. д.

УДК 532
ББК 22.253я7

ISBN 978-985-31-0101-0

© Качанов, И. В., Щербакова, М. К.,
Шаталов, И. М., Хасанов, Б. Б., 2025
© Белорусский национальный
технический университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ	5
2. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ № 1 «ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА»	12
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ № 2 «СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА»	19
3.1. Гидравлический расчет сложного длинного трубопровода	19
3.2. Гидравлика открытых потоков	34
4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ	40
4.1. Общий курс «Механика жидкости и газа»	40
4.2. Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода	59
4.3. Гидравлика открытых потоков	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	91

ВВЕДЕНИЕ

Практикум разработан для выполнения расчетно-графических работ по дисциплине «Механика жидкости и газа» для специальности 7-07-0732-02 «Инженерные сети, оборудование зданий и сооружений» профилизаций «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» и «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна».

Практикум содержит методические рекомендации, исходные цифровые данные и примеры решения задач для выполнения двух расчетно-графических работ.

Первая расчетно-графическая работа посвящена общим вопросам дисциплины «Механика жидкости и газа» и содержит 5 задач по разделам «Гидростатика», «Гидродинамика», включающих в себя определение силы гидростатического давления на плоские и криволинейные поверхности, а также гидравлический расчет простых трубопроводов и газопроводов (воздуховодов), истечение жидкости через отверстия и насадки.

Вторая расчетно-графическая работа посвящена специальному разделу дисциплины «Механика жидкости и газа» и содержит 6 задач по гидравлическому расчету сложных длинных трубопроводов; каналов и водопропускных сооружений в виде перепадов, выполняющих функцию гасителей энергии открытых потоков.

В разделе «Примеры решения задач» приведены методы расчета в цифровых величинах вышеуказанных задач.

Практикум также содержит перечень основной нормативной и учебной литературы, необходимой для выполнения расчетно-графических работ.

В практикуме использовались материалы учебных пособий и методических указаний по «Механике жидкости и газа» и «Гидравлике и аэродинамике» разных лет изданий и разных авторов, в том числе А. Д. Альтшуля, А. И. Богомолова, Н. М. Константинова и т. д.

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

По дисциплине «Механика жидкости и газа» обучающиеся выполняют две расчетно-графические работы:

1. Основы механики жидкости и газа.
2. Специальный раздел механики жидкости и газа.

Расчетно-графическая работа № 1 включает в себя 5 задач (табл. 1.1) по следующим темам: сила давления на плоские поверхности; сила давления на криволинейные поверхности; расчет простого трубопровода; истечение жидкости из малых отверстий в тонкой стенке и через насадки; расчет газопровода (воздуховода).

Расчетно-графическая работа № 2 включает в себя 6 задач (табл. 1.2) по следующим темам: расчет сложного длинного трубопровода; расчет и построение кривых свободной поверхности в открытых водотоках; определение основных гидравлических параметров потока и размеров (длины) укрепления водотока; гидравлический расчет основных геометрических размеров гасителей энергии в виде перепада.

Расчетно-графическая работа имеет 100 вариантов. Номер варианта назначает преподаватель. Например, в РГР № 1 варианту 48 соответствуют задачи под номерами 8, 28, 48, 73, 88 (см. табл. 1.1). Оформление каждого пункта РГР должно начинаться с указания номера задачи.

Краткие требования по оформлению расчетно-графической работы:

1. Текст набирается на компьютере в формате Microsoft Word и распечатывается на принтере на листах бумаги формата А4 с одной стороны. **Размеры полей страниц: верхнее 20 мм, нижнее 20 мм, левое 30 мм, правое 15 мм.**

2. Текст набирается шрифтом Times New Roman Cyr. Размер шрифта 14 пт с межстрочным интервалом 1,0 (одинарный). **Выравнивание текста – по ширине.**

3. Буквы русского и греческого алфавитов (в том числе индексы), а также цифры необходимо набирать прямым шрифтом, а буквы латинского алфавита – курсивом. Аббревиатуры и стандартные функции (Re, sin, cos и т. п.) набираются прямым шрифтом.

4. Формулы набираются **только с использованием редактора формул Microsoft Word**. Шрифт формул должен соответствовать требованиям, предъявляемым к основному тексту работы (см. выше).

5. Текст может включать таблицы, а также графические материалы (рисунки, графики, и др.). Данные материалы должны иметь сквозную нумерацию и названия. На все таблицы и графические материалы должны быть сделаны ссылки в тексте РГР. Шрифт надписей внутри рисунков, таблиц и др. графических материалов Times New Roman Сут, размер 12 пт, межстрочный интервал 1,0 (одинарный). Подписи «**Таблица**» (выравниваются по правому краю) и «**Рисунок 1 – Название рисунка**» (по центру) выделяются *полужирно*.

6. Нумерация страниц вверху справа. Титульный лист не нумеруется. Содержание начинается со 2 страницы.

7. Библиографический список литературных источников размещается в конце текста, при этом нумерация дается в порядке последовательности ссылок. На все литературные источники должны быть ссылки в тексте (в квадратных скобках). ***Библиографический список должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008.***

Буквенные обозначения, входящие в расчетные формулы, должны быть один раз пояснены. Числовые значения подставляются в формулу в последовательности ее написания. Аналитические и эмпирические формулы, различные справочные величины, применяемые в расчетах, должны сопровождаться ссылками (однократно) на литературные источники, из которых они взяты.

Расчеты необходимо выполнить в Международной системе единиц измерений. При подстановке величин в формулы нужно следить за соблюдением размерностей. Единицы измерения получаемых в расчетах физических величин должны быть обязательно указаны.

При необходимости выполнения большого количества однотипных расчетов в пояснительной записке показывается в полном объеме только один пример расчета; результаты остальных сводят в таблицу. В тексте нужно дать пояснение к составлению таблицы и выводы по полученным результатам.

Таблица 1.1

Номера контрольных заданий по вариантам к РГР № 1

Варианты																			
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61
95	96	97	98	99	100	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
Варианты																			
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	81	82	83	84
Варианты																			
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Варианты																			
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
53	54	55	56	57	58	59	60	60	59	58	57	56	55	54	70	69	68	67	66
80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	61	80
100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
Варианты																			
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
56	57	58	59	60	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	41	42	43	44	45
79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	62
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Таблица 1.2

Номера контрольных заданий по вариантам к РГР № 2

Варианты																			
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода																			
1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58
61	67	73	79	85	91	97	103	109	115	120	114	108	102	96	90	84	78	72	66
Гидравлика открытых потоков																			
137	138	139	140	131	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
157	158	159	160	151	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155
177	178	179	180	171	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175
197	198	199	200	191	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195
Варианты																			
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода																			
59	56	53	50	47	44	41	38	35	32	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2
119	113	107	101	95	89	83	77	71	65	64	70	76	82	88	94	100	106	112	118
Гидравлика открытых потоков																			
136	137	138	139	140	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126
156	157	158	159	160	160	159	158	157	156	155	154	153	152	151	150	149	148	147	146
176	177	178	179	180	180	179	178	177	176	175	174	173	172	171	170	169	168	167	166
196	197	198	199	200	200	199	198	197	196	195	194	193	192	191	190	189	188	187	186

Варианты																			
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода																			
3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
68	74	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140	146	152	158	164	170	176	182
Гидравлика открытых потоков																			
125	124	123	122	121	120	119	118	117	116	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106
145	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126
165	164	163	162	161	160	159	158	157	156	155	154	153	152	151	150	149	148	147	146
185	184	183	182	181	180	179	178	177	176	175	174	173	172	171	170	169	168	167	166
Варианты																			
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода																			
2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	56	59
73	85	68	91	97	81	88	117	66	75	83	93	99	111	119	61	70	109	63	79
Гидравлика открытых потоков																			
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155
156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175
176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195
196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215

Варианты																			
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода																			
1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58
80	94	98	105	115	69	110	85	76	113	86	107	87	71	77	74	112	82	95	92
Гидравлика открытых потоков																			
137	138	139	140	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136
157	158	159	160	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156
177	178	179	180	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
197	198	199	200	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196

2. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ № 1 «ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА»

Условие к задачам 1–20. Определить по данным табл. 2.1 равнодействующую силу избыточного давления воды на плоский затвор (см. рис. 2.1), перекрывающий отверстие трубы. Определить координату z_d точки приложения силы избыточного давления воды на указанную сторону затвора (для своего варианта).

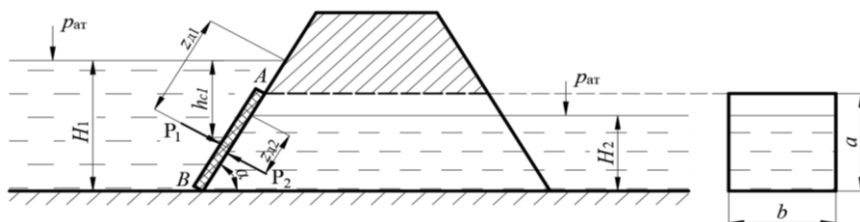


Рис. 2.1.

Условие к задачам 21–40. По данным табл. 2.2 определить равнодействующую сил избыточного давления на 1 пог. м длины (нормально к плоскости чертежа) заданной поверхности (рис. 2.2). Найти угол наклона линии действия сил избыточного давления воды на заданную поверхность.

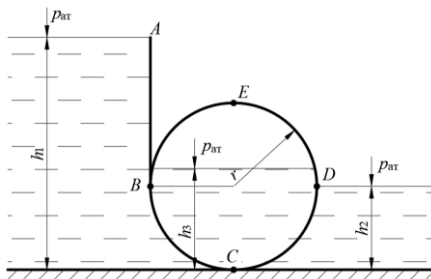


Рис. 2.2.

Условие к задачам 41–60. Определить расход воды, проходящей по трубе переменного сечения (рис. 2.3–2.6), и давления в сечении $x-x$, используя данные табл. 2.3. Построить пьезометриче-

скую линию и линию энергии (напорную). В расчетах коэффициент Дарси рассчитать по формуле Шифринсона; $d_1 = d_4 = 5$ м. У колена с закруглением принять радиусы закругления $R = d_2$.

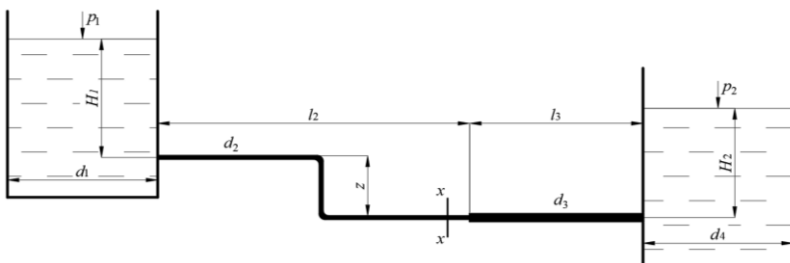


Рис. 2.3

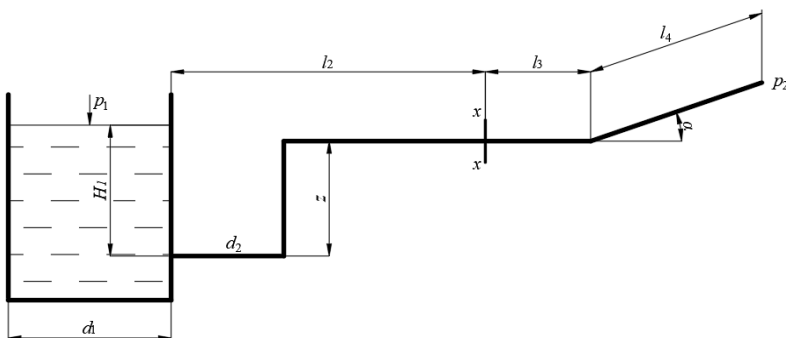


Рис. 2.4

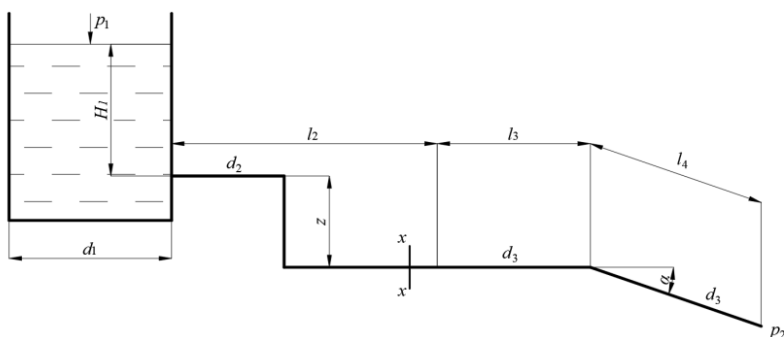


Рис. 2.5

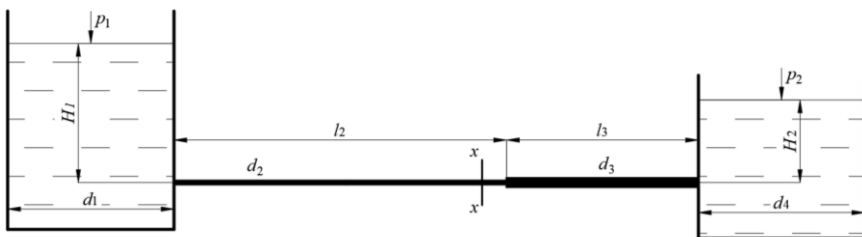


Рис. 2.6

Условие к задачам 61–80. Определить расход воды, протекающей через насадок (рис. 2.7), по данным табл. 2.4. Во всех вариантах, кроме варианта 8, задан диаметр входного сечения. В варианте 8 задан диаметр выходного сечения.

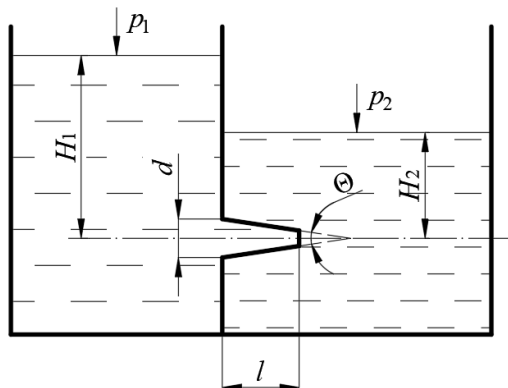


Рис. 2.7

Условие к задачам 81–100. В стальной трубопровод диаметром d и длиной L поступает сжатый воздух под давлением (избыточным) p_1 . Температура воздуха 20°C . Скорость в начале трубопровода V_1 . Определить массовый расход воздуха M и давление в конце трубы p_2 по данным табл. 2.5. Кинематический коэффициент вязкости воздуха $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Абсолютная эквивалентная шероховатость стенок трубопровода $\Delta_s = 0,15 \text{ мм}$.

Таблица 2.1

Исходные данные к задачам 1–20

Номер задачи	H_1 , м	H_2 , м	α , град	Форма поперечного сечения трубы	Размеры поперечного сечения трубы, м		Определить координату точки приложения силы давления z_D на сторону затвора
					a	b	
1	4	1	90	Прямоугольник с основанием b и высотой a	1	2	Левую z_{D1}
2	5	3	90		1	2	Левую z_{D1}
3	4	2	90		2	1	Правую z_{D2}
4	5	3	90		2	1	Правую z_{D2}
5	5	1	90		1	2	Левую z_{D1}
6	4	3	60		2	1	Левую z_{D1}
7	5	2	60		1	2	Левую z_{D1}
8	4	2	60		2	1	Левую z_{D1}
9	5	0	90	Круг диаметром a	2	–	Левую z_{D1}
10	5	2	90		2	–	Правую z_{D2}
11	4	1	90		1	–	Правую z_{D2}
12	4	2	90		1	–	Левую z_{D1}
13	5	2	90	Квадрат с основанием a	2	–	Правую z_{D2}
14	4	1	90		1	–	Левую z_{D1}
15	4	2	60		2	–	Левую z_{D1}
16	3	1	60		1	–	Правую z_{D2}
17	4	1	60	Квадрат с основанием a	2	–	Правую z_{D2}
18	5	3	60		1	–	Левую z_{D1}
19	5	1	60		2	–	Правую z_{D2}
20	3	1	60		2	–	Правую z_{D2}

Таблица 2.2

Исходные данные к задачам 21–40

Номер задачи	Заданная поверхность	r , м	h_1 , м	h_2 , м	h_3 , м	Номер задачи	Заданная поверхность	r , м	h_1 , м	h_2 , м	h_3 , м
21	BC	2	3	0	0	31	BC	1	2	0	1
22	BC	2	1	0	0	32	BC	2	2	0	3
23	BCD	2	3	2	0	33	CD	1	0	2	1
24	BCD	2	2	3	0	34	BCD	2	0	0	3
25	BCD	2	2	2	0	35	BCD	1	3	3	0
26	BC	2	3	0	2	36	CD	1	0	1	2
27	CD	2	0	3	2	37	CD	2	0	0	2
28	CD	1	0	3	0	38	CD	2	0	0	4
29	CD	2	0	1	0	39	BCD	1	0	0	1
30	BED	1	0	2	0	40	CD	2	0	2	4

Исходные данные к задачам 41–60

Номер задачи	Схема	p_1	p_2	H_1	H_2	d_2	d_3	l_2	z	l_3	l_4	α	Δ_3
		МПа		м		мм		м		м		град	мм
41	Рис. 2.3	$p_{\text{абс}} = 0,18$	$p_{\text{бак}} = 0,02$	5	12	75	100	200	1	200	—	—	0,5
42		$p_{\text{гид}} = 0,1$	$p_{\text{абс}} = 0,21$	4	0	65	75	50	2	300	—	—	0,5
43		$p_{\text{абс}} = 0,02$	$p_{\text{гид}} = 0,11$	10	3	75	100	200	1	200	—	—	0,5
44		$p_{\text{гид}} = 0,12$	$p_{\text{ат}}$	0	16	75	65	300	1	50	—	—	0,5
45		$p_{\text{бак}} = 0,03$	$p_{\text{абс}} = 0,14$	20	0	75	50	100	2	50	—	—	0,5
46		$p_{\text{абс}} = 0,15$	$p_{\text{бак}} = 0,02$	12	12	50	75	50	2	100	—	—	0,5
47	Рис. 2.4	$p_{\text{абс}} = 0,28$	$p_{\text{гид}} = 0,02$	14	—	125	—	200	1	100	20	20	1
48		$p_{\text{гид}} = 0,21$	$p_{\text{ат}}$	7	—	75	—	100	2	50	20	20	1
49		$p_{\text{бак}} = 0,02$	$p_{\text{ат}}$	25	—	100	—	200	3	50	15	30	1
50		$p_{\text{абс}} = 0,07$	$p_{\text{бак}} = 0,02$	24	—	75	—	50	1	20	15	15	1
51	Рис. 2.5	$p_{\text{гид}} = 0,05$	$p_{\text{абс}} = 0,12$	18	—	75	100	50	5	200	15	20	1,5
52		$p_{\text{абс}} = 0,18$	$p_{\text{ат}}$	4	—	100	75	200	8	50	10	20	1,5
53		$p_{\text{бак}} = 0,01$	$p_{\text{ат}}$	10	—	65	75	100	5	100	20	30	1,5
54		$p_{\text{гид}} = 0,02$	$p_{\text{бак}} = 0,01$	5	—	75	65	100	7	100	30	15	1,5
55	Рис. 2.6	$p_{\text{бак}} = 0,03$	$p_{\text{ат}}$	30	6	75	100	100	—	200	—	—	0,1
56		$p_{\text{абс}} = 0,08$	$p_{\text{гид}} = 0,02$	28	4	75	100	75	—	100	—	—	0,1
57		$p_{\text{гид}} = 0,2$	$p_{\text{бак}} = 0,04$	5	6	75	65	100	—	50	—	—	0,1
58		$p_{\text{абс}} = 0,12$	$p_{\text{ат}}$	0	20	100	75	200	—	50	—	—	0,1
59		$p_{\text{ат}}$	$p_{\text{абс}} = 0,16$	22	0	75	50	100	—	50	—	—	0,1
60		$p_{\text{гид}} = 0,15$	$p_{\text{ат}}$	12	0	50	100	50	—	100	—	—	0,1

Таблица 2.4

Исходные данные к задачам 61–80

Номер задачи	H_1 , м	H_2 , м	d , мм	l , мм	Θ , град	p_1 , МПа	p_2 , МПа
61	2	6	20	80	0	$p_{ат}$	$p_{изб} = 0,02$
62	6	0	30	120	0	$p_{ат}$	$p_{абс} = 0,12$
63	7	0	20	80	0	$p_{вак} = 0,03$	$p_{ат}$
64	0	4	30	120	0	$p_{ат}$	$p_{абс} = 0,14$
65	8	0	30	120	0	$p_{абс} = 0,2$	$p_{ат}$
66	0	8	30	30	0	$p_{ат}$	$p_{ат}$
67	4	0	20	30	0	$p_{изб} = 0,04$	$p_{ат}$
68	5	0	20	80	0	$p_{абс} = 0,18$	$p_{вак} = 0,01$
69	12	0	30	120	0	$p_{вак} = 0,02$	$p_{изб} = 0,02$
70	0	7	20	80	0	$p_{ат}$	$p_{изб} = 0,15$
71	9	0	70	100	13°24'	$p_{ат}$	$p_{ат}$
72	16	0	60	80	13°24'	$p_{ат}$	$p_{изб} = 0,04$
73	0	4	20	80	13°24'	$p_{ат}$	$p_{абс} = 0,12$
74	9	5	30	120	6	$p_{ат}$	$p_{ат}$
75	2	0	30	120	6	$p_{абс} = 0,12$	$p_{ат}$
76	12	0	30	120	6	$p_{ат}$	$p_{вак} = 0,04$
77	4	0	20	80	6	$p_{изб} = 0,10$	$p_{ат}$
78	4	0	20	50	—	$p_{изб} = 0,05$	$p_{ат}$
79	10	0	30	90	—	$p_{абс} = 0,20$	$p_{изб} = 0,02$
80	6	0	30	90	—	$p_{изб} = 0,02$	$p_{вак} = 0,01$

Примечание.

В задачах № 78–80 имеется в виду коноидальный насадок, у которого d – диаметр выходного сечения.

Таблица 2.5

Исходные данные к задачам 81–100

Номер задачи	d , мм	L , м	p_1 , кПа	V_1 , м/с
81	100	100	150	10,0
82	150	150	200	11,5
83	200	200	180	12,0
84	250	250	220	12,5
85	300	300	140	10,0
86	350	350	170	10,5
87	400	400	150	9,0
88	500	500	160	8,5
89	550	550	180	8,0
90	600	600	200	7,0
91	550	650	300	7,5
92	500	700	400	6,5
93	400	750	250	7,0
94	400	800	350	8,5
95	350	850	480	9,0
96	300	400	250	9,5
97	250	300	200	10,0
98	200	250	275	11,0
99	150	200	250	11,5
100	100	150	150	10,0

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ № 2 «СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА»

3.1. Гидравлический расчет сложного длинного трубопровода

Условия контрольных заданий 1–60

Задача 1. Определить отметку уровня воды в напорном баке A для трубопровода с параллельным и последовательным соединением труб для пропуска расходов $Q_{п1}$, Q_B , Q_D при размерах трубопровода: l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 (рис. 3.1). Трубы новые чугунные, а отметка трубопровода в конечном пункте D равна ∇^D .

Задача 2. Определить отметку уровня воды в напорном баке A для трубопровода с параллельным и последовательным соединением труб для пропуска расходов $Q_{п2}$, Q_C , Q_D при размерах трубопровода: l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 (рис. 3.1). Трубы новые стальные, а отметка трубопровода в конечном пункте D равна ∇^D .

Задача 3. Определить отметку уровня воды в напорном баке A для трубопровода с параллельным и последовательным соединением труб для пропуска расходов $Q_{п1}$, $Q_{п2}$, Q_D при размерах трубопровода: l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 (рис. 3.1). Трубы новые стальные, а отметка трубопровода в конечном пункте D равна ∇^D .

Задача 4. Определить напор в точке B и узловой расход в точке C горизонтального нового стального трубопровода (рис. 3.2), состоящего из двух последовательных участков с размерами l_1 , l_2 , d_1 , d_2 при отметках пьезометрического напора ∇^A и ∇^C , если на участках AB и BC непрерывно изменяемые расходы $Q_{п1}$ и $Q_{п2}$.

Задача 5. Определить напор и расход в точке B горизонтального нового чугунного трубопровода (рис. 3.2), состоящего из двух последовательных участков с размерами l_1 , l_2 , d_1 , d_2 при отметках пьезометрического напора ∇^A и ∇^C , если на участках AB и BC непрерывно изменяемые расходы $Q_{п1}$ и $Q_{п2}$.

Задача 6. Определить напор в точке B и узловой расход в точке C для трубопровода, показанного на рис. 3.2, если на участке AB непрерывно изменяемый расход $Q_{п1}$ и узловой расход в точке B равен Q_B . Трубы новые стальные.

Задача 7. Для трех последовательно соединенных участков труб (рис. 3.3) определить: отметку уровня воды в водонапорной башне при размерах труб $l_1, l_2, l_3, d_1, d_2, d_3$, если непрерывно изменяемые расходы $Q_{п1}, Q_{п2}, Q_{п3}$ и узловые расходы Q_B и Q_C . Определить диаметр трубы на участке AB , если отметку уровня воды в водонапорной башне уменьшить на 2 м, а диаметры d_2, d_3 и все расходы остаются без изменений. Трубы новые стальные.

Задача 8. Для трех последовательно соединенных участков труб (рис. 3.3) определить отметку уровня воды в водонапорной башне, если непрерывно изменяемые расходы $Q_{п1}, Q_{п2}$ и узловые расходы Q_B и Q_D . Определить диаметр трубы на участке BC , если отметку уровня воды в водонапорной башне увеличить на 3 м, а диаметры d_1, d_3 и все расходы остаются без изменений. Трубы новые чугунные.

Задача 9. Для трех последовательно соединенных участков труб (рис. 3.3) определить отметку уровня воды в водонапорной башне, если непрерывно изменяемые расходы $Q_{п2}, Q_{п3}$ и узловые расходы Q_C и Q_D . Определить диаметр трубы на участке CD , если отметку уровня воды в водонапорной башне увеличить на 5 м, а диаметры d_1 и d_2 и все расходы остаются без изменения. Трубы новые стальные.

Задача 10. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, необходимую для пропуска по трубопроводу (рис. 3.4) с параллельным и последовательным соединением труб расходов $Q_{п1}, Q_{п2}, Q_C$ при их размерах $l_1, l_2, l_3, l_4, d_1, d_2, d_3, d_4$, если трубы стальные новые, отметка трубопровода в точке D равна ∇^D .

Задача 11. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, если расходы в трубопроводе $Q_{п1}, Q_B, Q_C, Q_D$ при их размерах $l_1, l_2, l_3, l_4, d_1, d_2, d_3, d_4$ (рис. 3.4). Трубы новые чугунные, отметка трубопровода в точке D равна ∇^D .

Задача 12. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, если расходы в трубопроводе $Q_{п2}, Q_B, Q_C, Q_D$ (рис. 3.4). Трубы новые стальные, отметка трубопровода в точке D равна ∇^D .

Задача 13. В новом стальном трубопроводе с параллельным и последовательным соединением труб (рис. 3.5), длины которых l_1, l_2, l_3, l_4 и диаметры d_1, d_2, d_3, d_4 , определить расходы на участках 1, 2, 3 и отметку пьезометрического напора в точке A , если отметка пьезометрического напора в точке C равна ∇^C и известны расходы $Q_{п1}$ и Q_C .

Задача 14. В новом стальном трубопроводе с параллельным и последовательным соединением труб, длины которых l_1, l_2, l_3, l_4 и диаметры d_1, d_2, d_3, d_4 (рис. 3.5) определить расходы на участках 1, 2 и Q_C , отметку пьезометрического напора в точке A , если известны расход в третьей ветви $Q_3 = Q_B$ и отметка пьезометрического напора в точке C равна ∇^C .

Задача 15. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне и расход Q_B при размерах труб l_1, l_2, d_1, d_2, d_3 , показанных на рис. 3.6, если непрерывно изменяемый расход по длине ветви AC равен $Q_{п1}$. Трубы новые стальные.

Задача 16. Из водонапорной башни по трубам вода поступает в узловые точки B и C (рис. 3.7). Определить отметки пьезометрического напора в этих точках при размерах труб l_1, l_2, d_1, d_2, d_3 и расходах Q_B, Q_C и $Q_{п1}$, если отметка свободной поверхности в водонапорной башне ∇^A . Трубы новые стальные.

Задача 17. Вода по горизонтальному новому чугунному трубопроводу, состоящему из двух последовательных участков труб с размерами l_1, l_2, d_1, d_2 , подается в узловые точки B и C в количестве Q_B, Q_C и непрерывно распределяется по участку AB в количестве $Q_{п1}$. Определить необходимое давление насоса, если свободный напор в конце трубопровода $H_{св} = 15$ м. Как изменится давление насоса, если расход в узловой точке B Q_B уменьшить и одновременно в точке C Q_C увеличить на 5 л/с?

Задача 18. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне ∇^A для трубопровода с параллельным и последовательным соединением труб для пропуска расходов $Q_B, Q_C, Q_D, Q_{п1}, Q_{п2}$ при размерах труб $l_1, l_2, l_3, l_4, d_1, d_2, d_3, d_4$ (рис. 3.8), если трубы новые стальные, а отметка пьезометрической линии в конечном пункте D равна ∇^D .

Задача 19. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне ∇^A для трубопровода, показанного на рис. 3.8, если на участке AB непрерывно изменяемый расход $Q_{п1}$ и узловые расходы равны Q_B и Q_D . Трубы новые чугунные, а отметка пьезометрической линии в конечном пункте D равна ∇^D .

Задача 20. Определить отметку уровня воды в водонапорной башне ∇^A для трубопровода, показанного на рис. 3.8, если на участке BC непрерывно изменяемый расход $Q_{п2}$ и узловые расходы равны Q_C и Q_D . Трубы новые стальные.

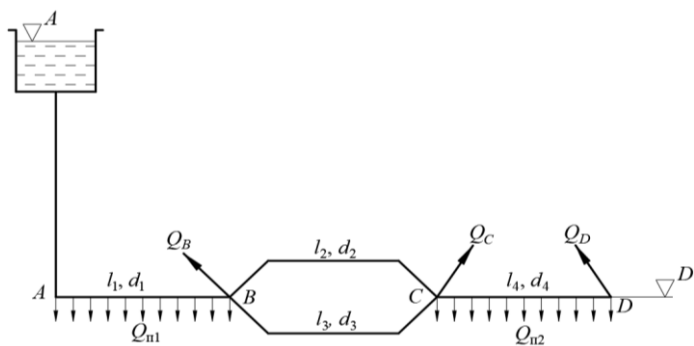


Рис. 3.1

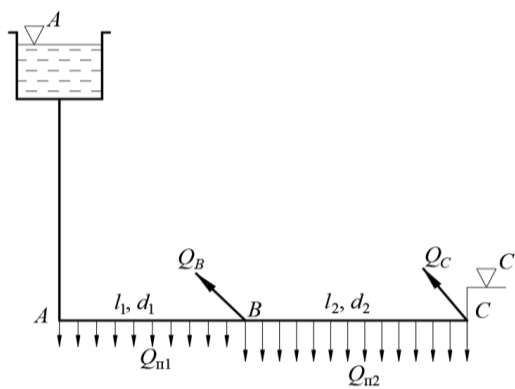


Рис. 3.2

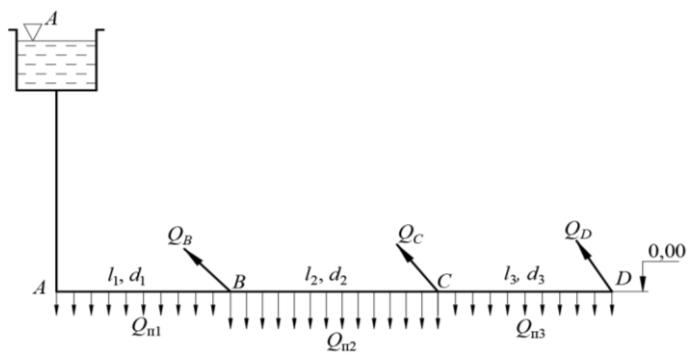


Рис. 3.3

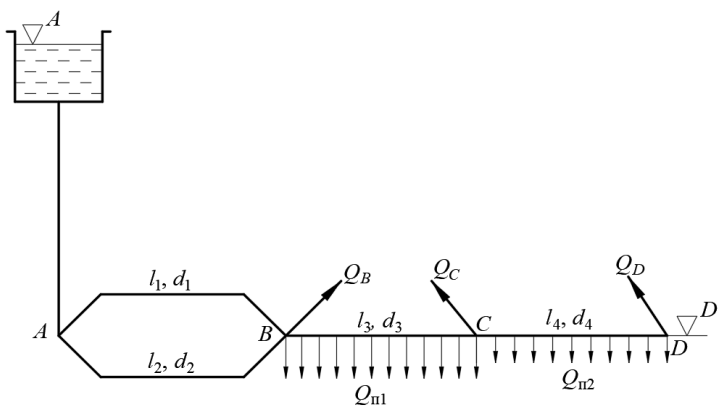


Рис. 3.4

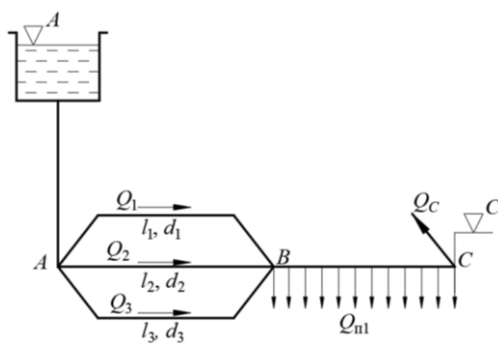


Рис. 3.5

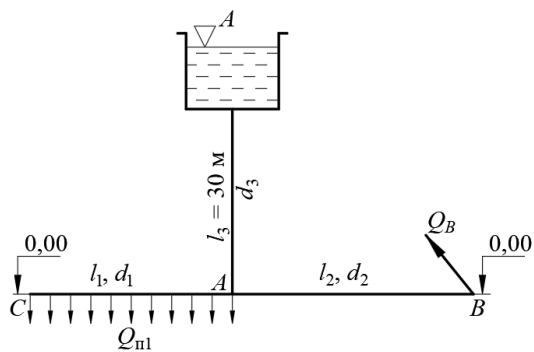


Рис. 3.6

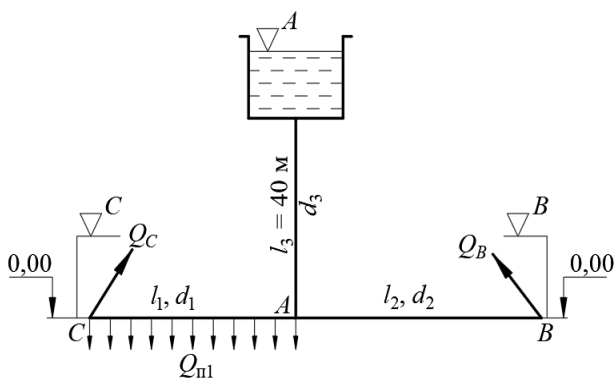


Рис. 3.7

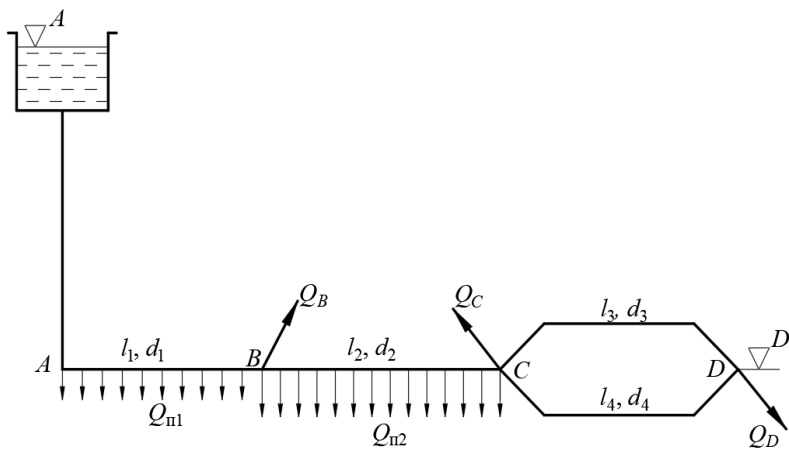


Рис. 3.8

Таблица 3.1

Исходные данные к задачам 1–60

Номер контрольного	Условие задания	Длина участка трубопровода, м			Диаметры участков трубопровода, мм			Узловой расход, л/с			Непрерывно изменяемый (пугевой) расход, л/с		Отметка в узловой точке трубопровода, м	
		$l_1 = l_4$	l_2	l_3	d_1	d_2	$d_3 = d_4$	Q_B	Q_C	Q_D	$Q_{n1} = Q_{n3}$	Q_{n2}	∇^A	$\nabla^C = \nabla^D$
1	Задача 1	180	140	270	125	100	75	6	–	4	5	–	–	4
2		210	160	240	150	125	100	9	–	5	6	–	–	6
3		240	180	210	200	150	125	16	–	15	7	–	–	8
4	Задача 2	150	120	300	100	75	50	–	4	3	–	2	–	2
5		270	200	180	250	175	150	–	26	20	–	10	–	10
6		300	220	150	300	200	175	–	35	30	–	12	–	12
7	Задача 3	150	120	300	100	75	50	–	–	3	4	2	–	2
8		180	140	270	125	100	75	–	–	4	5	4	–	4
9		210	160	240	150	125	100	–	–	5	6	6	–	6
10	Задача 4	180	140	–	125	100	–	–	–	–	5	4	24	4
11		210	160	–	150	125	–	–	–	–	6	6	26	6
12		240	180	–	200	150	–	–	–	–	7	8	28	8
13	Задача 5	150	120	–	100	75	–	–	–	–	4	2	22	2
14		180	140	–	125	100	–	–	–	–	5	4	24	4
15		210	160	–	150	125	–	–	–	–	6	6	26	6

Продолжение табл. 3.1

Номер контрольного задания	Условие задания	Длина участка трубопровода, м			Диаметры участков трубопровода, мм			Узловой расход, л/с			Непрерывно изменяемый (путевой) расход, л/с		Отметка в узловой точке трубопровода, м	
		$l_1 = l_4$	l_2	l_3	d_1	d_2	$d_3 = d_4$	Q_B	Q_C	Q_D	$Q_{n1} = Q_{n3}$	Q_{n2}	∇^A	$\nabla^C = \nabla^D$
16	Задача 6	150	120	—	100	75	—	5	—	—	4	—	22	2
17		210	160	—	150	125	—	9	—	—	6	—	26	6
18		240	180	—	200	150	—	16	—	—	7	—	28	8
19	Задача 7	150	120	300	100	75	50	5	4	—	4	2	—	—
20		180	140	270	125	100	75	6	7	—	5	4	—	—
21		210	160	240	150	125	100	9	8	—	6	6	—	—
22	Задача 8	150	120	300	100	75	50	5	—	3	4	2	—	—
23		270	200	180	250	175	150	25	—	20	8	10	—	—
24		300	220	150	300	200	175	40	—	30	9	12	—	—
25	Задача 9	180	140	270	125	100	75	6	—	4	5	4	—	—
26		210	160	240	150	125	100	9	—	5	6	6	—	—
27		240	180	210	200	150	125	16	—	14	7	8	—	—
28	Задача 10	240	180	210	200	150	125	—	14	15	7	8	—	8
29		270	200	180	250	175	150	—	26	20	8	10	—	10
30		300	220	150	300	200	175	—	35	30	9	12	—	12
31	Задача 11	210	160	240	150	125	100	9	8	5	6	—	—	6
32		240	180	210	200	150	125	16	14	15	7	—	—	8
33		300	220	150	300	200	175	40	35	30	9	—	—	12

Продолжение табл. 3.1

Номер контрольного задания	Условие задания	Длина участка трубопровода, м			Диаметры участков трубопровода, мм				Узловой расход, л/с				Непрерывно изменяемый (путевой) расход, л/с			Отметка в узловой точке трубопровода, м	
		$l_1 = l_4$	l_2	l_3	d_1	d_2	$d_3 = d_4$	d_4	Q_B	Q_C	Q_D	$Q_{n1} = Q_{n3}$	Q_{n2}	Q_{n3}	Q_{n2}	∇^A	$\nabla^C = \nabla^D$
34	Задача 12	210	160	240	150	125	100	9	8	5	—	—	6	—	—	—	6
35		240	180	210	200	150	125	16	14	15	—	—	8	—	—	—	8
36		270	200	180	250	175	150	25	26	20	—	—	10	—	—	—	10
37	Задача 13	150	120	300	100	75	50	—	4	—	—	4	—	—	—	—	2
38		180	140	270	125	100	75	—	7	—	—	5	—	—	—	—	4
39		210	160	240	150	125	100	—	8	—	—	6	—	—	—	—	6
40	Задача 14	180	140	270	125	100	75	6	—	—	—	—	—	—	—	—	4
41		210	160	240	150	125	100	9	—	—	—	—	—	—	—	—	6
42		240	180	210	200	150	125	16	—	—	—	—	—	—	—	—	8
43	Задача 15	150	120	—	100	75	50	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—
44		180	140	—	125	100	75	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—
45		210	160	—	150	125	100	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—
46	Задача 16	240	180	—	200	150	125	16	14	—	—	7	—	—	—	28	—
47		270	200	—	250	175	150	25	26	—	—	8	—	—	—	30	—
48		300	220	—	300	200	175	40	35	—	—	9	—	—	—	32	—
49	Задача 17	150	120	—	100	75	—	5	4	—	—	4	—	—	—	22	—
50		180	140	—	125	100	—	6	7	—	—	5	—	—	—	24	—
51		210	160	—	150	125	—	9	8	—	—	6	—	—	—	26	—

Окончание табл. 3.1

Номер контрольного задания	Условие задачи	Длина участка трубопровода, м			Диаметры участков трубопровода, мм			Узловой расход, л/с			Непрерывно изменяемый (путевой) расход, л/с		Отметка в узловой точке трубопровода, м	
		$l_1 = l_4$	l_2	l_3	d_1	d_2	$d_3 = d_4$	Q_B	Q_C	Q_D	$Q_{n1} = Q_{n3}$	Q_{n2}	∇^A	$\nabla^C = \nabla^D$
52	Задача 18	180	140	270	125	100	75	6	7	4	5	4	—	4
53		210	160	240	150	125	100	9	8	5	6	6	—	6
54		240	180	210	200	150	125	16	14	15	7	8	—	8
55	Задача 19	150	120	300	100	75	50	5	—	3	4	—	—	2
56		180	140	270	125	100	75	6	—	4	5	—	—	4
57		210	160	240	150	125	100	9	—	5	6	—	—	6
58	Задача 20	210	160	240	150	125	100	—	8	5	—	6	—	6
59		240	180	210	200	150	125	—	14	15	—	8	—	8
60		300	220	150	300	200	175	—	35	30	—	12	—	12

Условие к задачам 61–120

По одной из схем (рис. 3.9–3.18) и варианту исходных параметров (табл. 3.2), заданных преподавателем, выполнить гидравлический расчет разветвленного трубопровода, являющегося составной частью проектируемой автономной системы сельскохозяйственного водоснабжения.

Требуется определить расчетные расходы, экономически целесообразные диаметры труб, потери напора на всех участках (между узловыми точками); проверить и обеспечить заданную достаточность свободных напоров в узловых точках; вычислить свободный напор в начальном узле Б трубопровода (уровень воды в водонапорной башне или пьезометрический напор в гидроаккумуляторе водоподъемной установки).

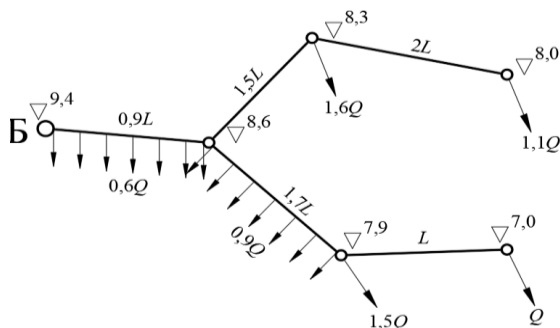


Рис. 3.9

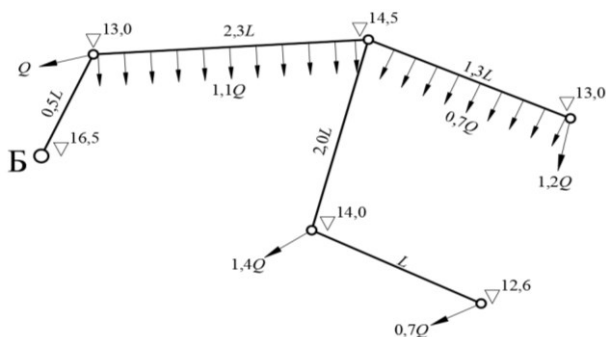


Рис. 3.10

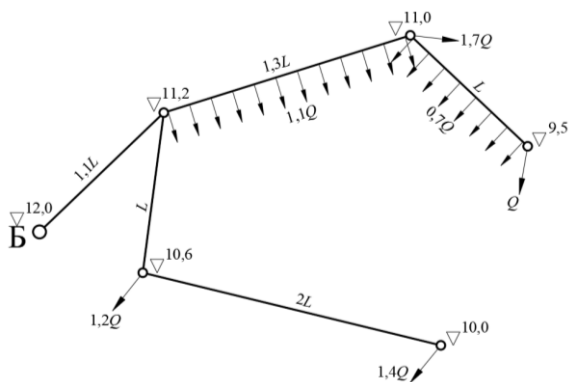


Рис. 3.11

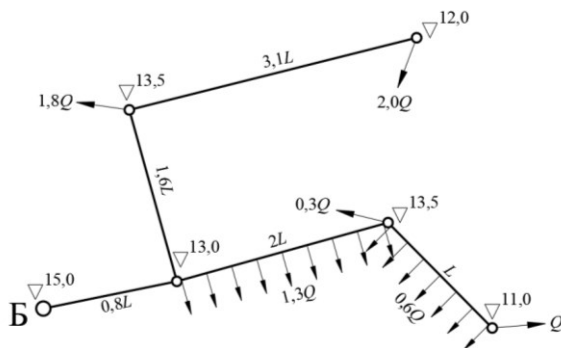


Рис. 3.12

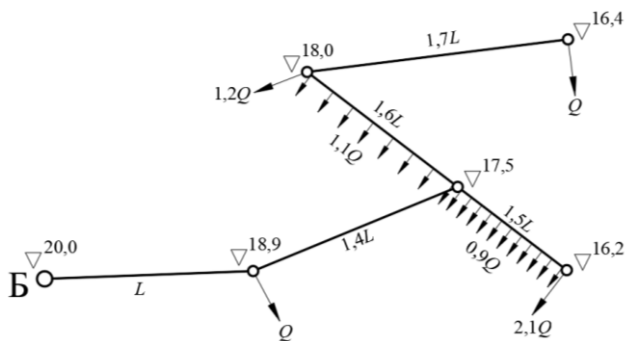


Рис. 3.13

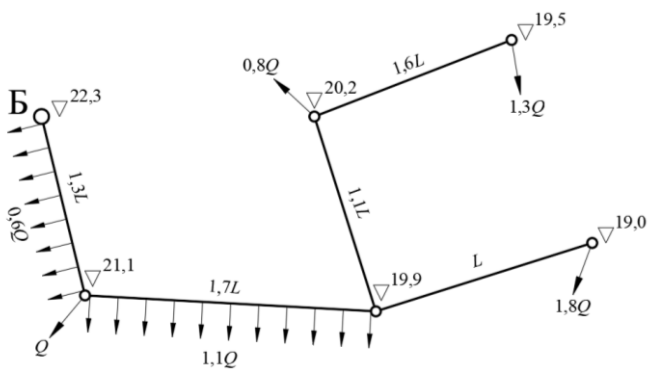


Рис. 3.14

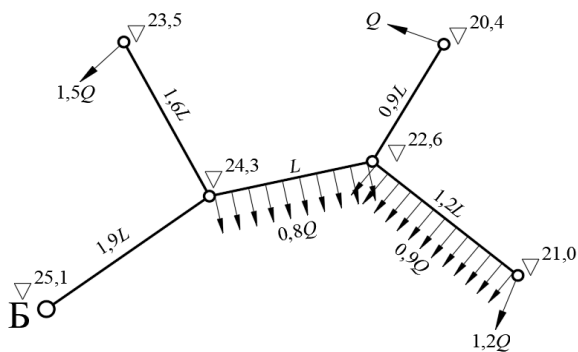


Рис. 3.15

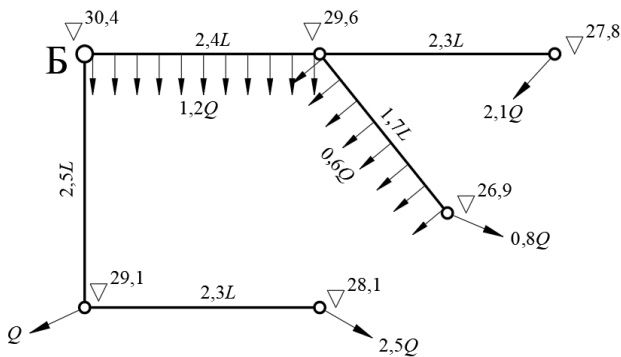


Рис. 3.16

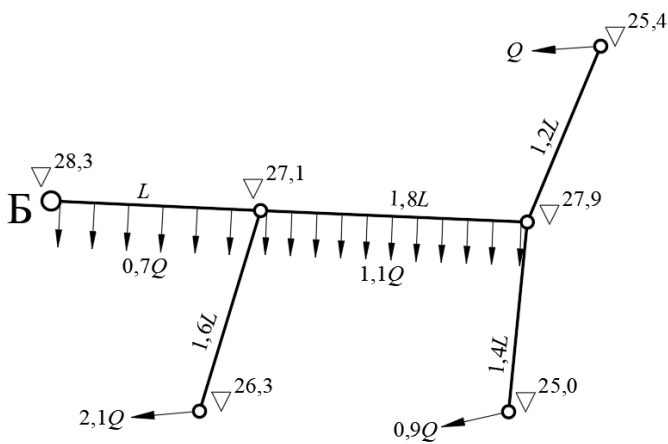


Рис. 3.17

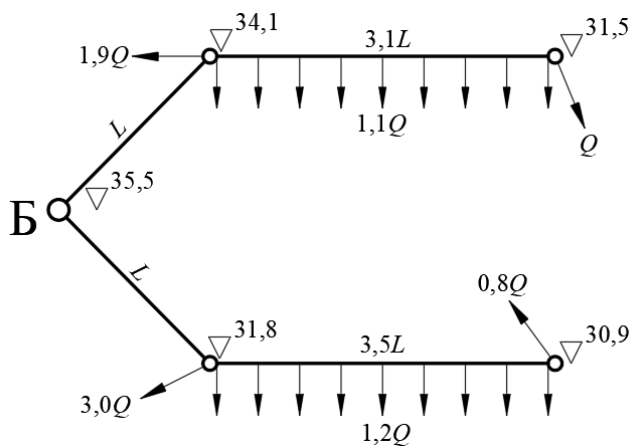


Рис. 3.18

Таблица 3.2

Исходные данные к задачам 61–120

Номер контрольного задания	Номер схемы	Расход Q , л/с	Длина участка L , м	Минимально допустимый свободный напор в узловых точках $h_{св. min}$, М	Материал труб
1	Рис. 3.9	2,5	160	10	Полиэтилен
2		3,0	150	10	Полиэтилен
3		3,5	140	12	Чугун новый
4		4,0	130	12	Чугун неновый
5		4,5	120	14	Сталь новая
6		5,0	110	14	Сталь неновая
7	Рис. 3.10	2,5	160	10	Полиэтилен
8		3,0	150	10	Полиэтилен
9		3,5	140	12	Чугун новый
10		4,0	130	12	Чугун неновый
11		4,5	120	14	Сталь новая
12		5,0	110	14	Сталь неновая
13	Рис. 3.11	2,5	160	10	Полиэтилен
14		3,0	150	10	Полиэтилен
15		3,5	140	12	Чугун новый
16		4,0	130	12	Чугун неновый
17		4,5	120	14	Сталь новая
18		5,0	110	14	Сталь неновая
19	Рис. 3.12	2,5	160	10	Полиэтилен
20		3,0	150	10	Полиэтилен
21		3,5	140	12	Чугун новый
22		4,0	130	12	Чугун неновый
23		4,5	120	14	Сталь новая
24		5,0	110	14	Сталь неновая
25	Рис. 3.13	2,5	160	10	Полиэтилен
26		3,0	150	10	Полиэтилен
27		3,5	140	12	Чугун новый
28		4,0	130	12	Чугун неновый
29		4,5	120	14	Сталь новая
30		5,0	110	14	Сталь неновая
31	Рис. 3.14	2,5	160	10	Полиэтилен
32		3,0	150	10	Полиэтилен
33		3,5	140	12	Чугун новый
34		4,0	130	12	Чугун неновый
35		4,5	120	14	Сталь новая
36		5,0	110	14	Сталь неновая

Номер контрольного задания	Номер схемы	Расход Q , л/с	Длина участка L , м	Минимально допустимый свободный напор в узловых точках $h_{св. min}$, М	Материал труб
37	Рис. 3.15	2,5	160	10	Полиэтилен
38		3,0	150	10	Полиэтилен
39		3,5	140	12	Чугун новый
40		4,0	130	12	Чугун неновый
41		4,5	120	14	Сталь новая
42		5,0	110	14	Сталь неновая
43	Рис. 3.16	2,5	160	10	Полиэтилен
44		3,0	150	10	Полиэтилен
45		3,5	140	12	Чугун новый
46		4,0	130	12	Чугун неновый
47		4,5	120	14	Сталь новая
48		5,0	110	14	Сталь неновая
49	Рис. 3.17	2,5	160	10	Полиэтилен
50		3,0	150	10	Полиэтилен
51		3,5	140	12	Чугун новый
52		4,0	130	12	Чугун неновый
53		4,5	120	14	Сталь новая
54		5,0	110	14	Сталь неновая
55	Рис. 3.18	2,5	160	10	Полиэтилен
56		3,0	150	10	Полиэтилен
57		3,5	140	12	Чугун новый
58		4,0	130	12	Чугун неновый
59		4,5	120	14	Сталь новая
60		5,0	110	14	Сталь неновая

3.2. Гидравлика открытых потоков

Условие к задачам 121–140. Определить нормальные и критическую глубины, а также критический уклон для призматического канала (см. рис. 3.19), если известны расход, коэффициент шероховатости канала по низу и коэффициенты откосов (см. табл. 3.3).

Построить кривую свободной поверхности при неравномерном движении в призматическом канале (рис. 3.19) по данным табл. 3.3 без учета влияния водопропускного сооружения. При этом считать длину всех участков неограниченной.

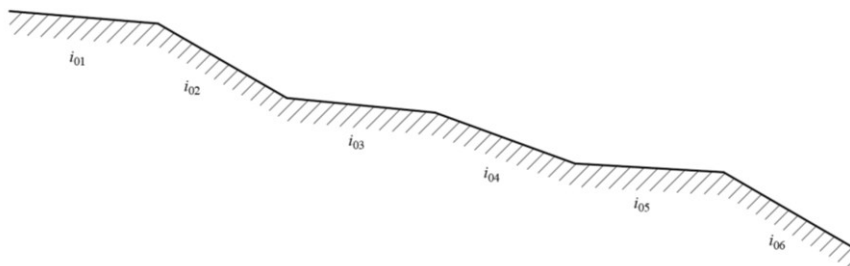


Рис. 3.19

Условие к задачам 141–160. Определить длину крепления на участке (см. табл. 3.4), используя необходимые данные и схему свободной поверхности потока из предыдущей задачи.

Условие к задачам 161–180. Определить глубину в сжатом сечении за перепадом (см. рис. 3.20) и сопряженную с ней глубину по данным табл. 3.5. Значения расхода и других необходимых данных и характеристик потока следует взять из своего варианта задач 121–140.

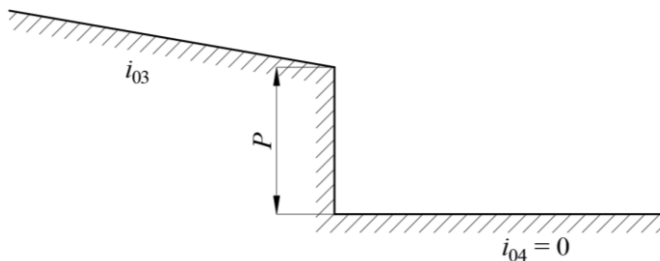


Рис. 3.20

Условие к задачам 181–200. Рассчитать геометрические размеры сооружения, показанные в табл. 3.6: или ступень перепада – ее длину; или водобойную стенку – ее высоту, расстояние от вертикального уступа, на котором установлена водобойная стенка, сопряжение бьефов за стенкой; или водобойный колодец – его глубину и длину; или ступень перепада колодезного типа – глубину и длину колодца на его ступенях. Исходные данные взять из табл. 3.6. Расход, высоту стенки падения, сопряженные глубины и другие необходимые величины следует взять из своего варианта задач 121–140, 141–160 и 161–180.

Исходные данные к задачам 121–140

Номер задачи	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	m	n	Уклоны					
					i_{01}	i_{02}	i_{03}	i_{04}	i_{05}	i_{06}
121	18	5,0	1,0	0,0225	0,0010	0,0100	0,0010	0,0049	0,0010	0,0100
122	15	4,0	1,5	0,0200	0,0064	0,0010	0,0100	0,0100	0,0010	0,0064
123	6	2,4	2,0	0,0200	0,0100	0,0020	0,0036	0,0036	0,0020	0,0100
124	7	2,6	1,5	0,0200	0,0064	0,0010	0,0400	0,0010	0,0064	0,0400
125	8	3,2	0,0	0,0250	0,0100	0,0049	0,1000	0,0049	0,0100	0,1000
126	9	3,5	0,0	0,0300	0,0900	0,0081	0,0400	0,0900	0,0400	0,0081
127	7	3,0	0,0	0,0300	0,0064	0,0030	0,0100	0,0064	0,0030	0,0100
128	6	2,7	0,0	0,0250	0,0030	0,0100	0,0064	0,0030	0,0064	0,0100
129	10	4,0	0,0	0,0350	0,1000	0,0400	0,0100	0,0400	0,0100	0,1000
130	12	4,5	0,0	0,0300	0,0100	0,0900	0,0400	0,0400	0,0100	0,0900
131	20	12,0	0,0	0,0225	0,0020	0,0060	0,0100	0,0100	0,0060	0,0020
132	17	10,0	0,0	0,0200	0,0081	0,0020	0,0040	0,0040	0,0020	0,0081
133	4	2,3	0,0	0,0250	0,0100	0,0010	0,0100	0,0050	0,0010	0,0100
134	5	2,6	0,0	0,0300	0,0081	0,0010	0,0081	0,0081	0,0010	0,0400
135	7	4,0	2,0	0,0300	0,0400	0,0064	0,0200	0,0400	0,0064	0,0200
136	8	4,5	1,5	0,0250	0,0064	0,0200	0,0400	0,0064	0,0200	0,0400
137	6	2,0	1,0	0,0200	0,0100	0,0500	0,1000	0,0500	0,0100	0,1000
138	7	2,5	0,5	0,0350	0,0400	0,0200	0,1000	0,1000	0,0400	0,0200
139	5	2,0	1,0	0,0350	0,0050	0,0081	0,0050	0,0081	0,0050	0,0200
140	6	2,3	1,5	0,0300	0,0200	0,0050	0,0020	0,0081	0,0050	0,0200

Таблица 3.4

Исходные данные к задачам 141–160

Номер задачи	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
Расчетный участок с уклоном	i_{01}	i_{03}	i_{02}	i_{03}	i_{03}	i_{03}	i_{02}	i_{04}	i_{06}	i_{02}	i_{01}	i_{03}	i_{06}	i_{03}	i_{06}	i_{02}	i_{03}	i_{02}	i_{06}	i_{03}
Допускаемая скорость для естественного русла канала $V_{\text{э}}$, м/с	2,3	2,2	1,2	1,1	2,8	2,6	1,5	1,4	3,0	3,0	2,0	2,2	1,6	1,8	1,2	1,3	3,0	3,2	3,0	3,2

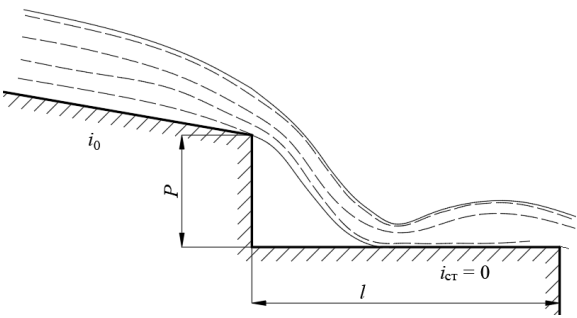
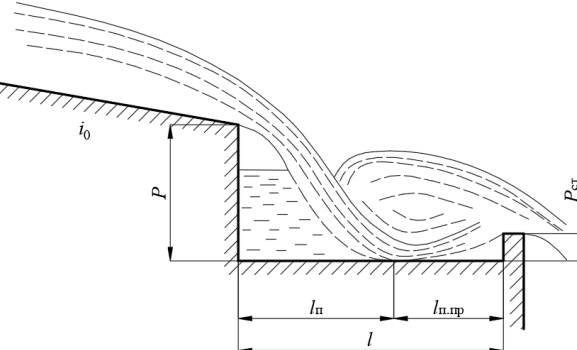
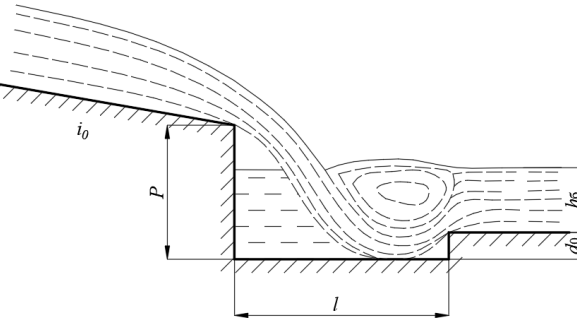
Таблица 3.5

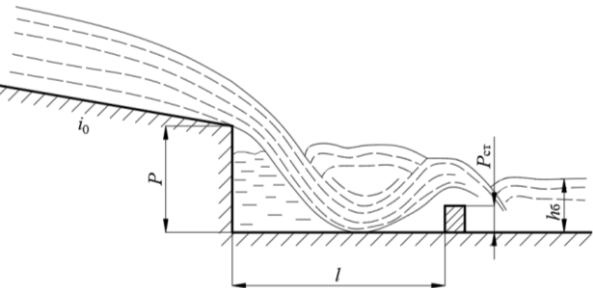
Исходные данные к задачам 161–180

Номер задачи	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
Высота падения P , м	1,0	1,2	1,5	1,3	1,2	1,4	1,0	0,8	1,3	1,2	1,5	1,4	1,2	1,0	0,8	1,0	1,3	1,1	1,5	1,4

Таблица 3.6

Исходные данные к задачам 181–200

Номер задачи	Тип сооружения	Бытовая глубина за сооружением h_6 , м
181 182 183 184		— — — —
185 186 187 188 189 190		— — — — — —
191* 192* 193* 194*		$0,8h_{01}$ $0,8h_{02}$ h_{03} h_{04}

Номер задачи	Тип сооружения	Бытовая глубина за сооружением h_6 , м
195 196 197 198 199 200		1,0 1,1 1,2 1,3 1,1 1,2

*в задачах 191–194 нормальные глубины h_{01} , h_{02} , h_{03} , h_{04} взять из задачи № 121–140.

4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

4.1. Общий курс «Механика жидкости и газа»

Задача 1. Сила давления жидкости на плоские поверхности

Определить силу давления воды на плоский наклонный затвор (рис. 4.1), перекрывающий вход в трубу квадратного сечения. Найти координату точки приложения силы избыточного давления воды на левую часть затвора. Глубина потока слева и справа затвора, а также размеры поперечного сечения трубы известны: $H_1 = 5$ м; $H_2 = 0,5$ м; $a = 1$ м. Затвор наклонен к горизонту под углом $\alpha = 60^\circ$.

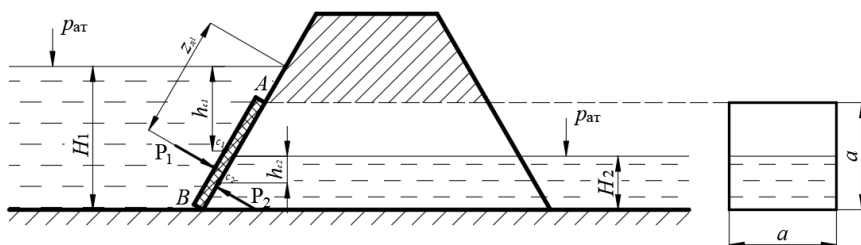


Рис. 4.1

Решение

Поверхность воды справа и слева затвора находится под атмосферным давлением, которое передается через воду на все точки затвора с обеих сторон и взаимно уничтожается. Следовательно, нужно определить только силы избыточного давления воды на обе стороны затвора, как на плоские поверхности, по формуле:

$$P = \rho g h_c \omega,$$

где $\rho g h_c$ – избыточное давление в центре тяжести смоченной поверхности;

h_c – глубина погружения центра тяжести ω смоченной поверхности;

ω – площадь смоченной поверхности.

Находим площади смоченных поверхностей сторон затвора слева ω_1 , справа ω_2 и соответствующие глубины погружения их центров тяжести h_{c1} и h_{c2} :

$$\omega_1 = \frac{a}{\sin \alpha} a = \frac{1}{\sin 60} 1 = 1,15 \text{ м}^2;$$

$$h_{c1} = H_1 - \frac{a}{2} = 5 - \frac{1}{2} = 4,5 \text{ м};$$

$$\omega_2 = \frac{H_2}{\sin \alpha} a = \frac{0,5}{\sin 60} 1 = 0,577 \text{ м}^2;$$

$$h_{c2} = \frac{H_2}{2} = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ м}.$$

Используя полученные выражения, определяем силу избыточного давления воды P_1 на левую сторону затвора и P_2 — на правую:

$$P_1 = \rho g h_{c1} \omega_1 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4,5 \cdot 1,15 = 50\,767 \text{ Н};$$

$$P_2 = \rho g h_{c2} \omega_2 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,25 \cdot 0,577 = 1\,415 \text{ Н}.$$

Равнодействующая сила давления воды P равна разности сил P_1 и P_2 :

$$P = P_1 - P_2 = 50\,767 - 1\,415 = 49\,352 \text{ Н}.$$

Координату точки приложения силы избыточного давления воды на левую часть затвора можно определить по формуле:

$$z_{д1} = z_{c1} + e_1,$$

где z_{c1} – координата центра тяжести:

$$z_{c1} = \frac{h_{c1}}{\sin \alpha} = \frac{4,5}{\sin 60} = 5,2 \text{ м};$$

e_1 – эксцентриситет:

$$e_1 = \frac{I_{01}}{\omega_1 \cdot z_{c1}},$$

где I_{01} – центральный момент инерции прямоугольника относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести, равен

$$I_0 = \frac{a \left(\frac{a}{\sin \alpha} \right)^3}{12} = \frac{1 \cdot \left(\frac{1}{\sin 60} \right)}{12} = 0,128 \text{ м}^4;$$

ω_1 – площадь смоченной поверхности стороны затвора слева, $\omega_1 = 1,15 \text{ м}^2$.

Полученные значения подставляем и рассчитываем эксцентриситет:

$$e_1 = \frac{I_{01}}{\omega_1 \cdot z_{c1}} = \frac{0,128}{1,15 \cdot 5,2} = 0,0214 \text{ м}.$$

Рассчитаем координату точки приложения силы избыточного давления воды на левую часть затвора:

$$z_{д1} = z_{c1} + e_1 = 5,2 + 0,0214 = 5,22 \text{ м}.$$

Задача 2. Сила давления жидкости на криволинейные поверхности

Определить величину и направление силы давления на цилиндрический затвор радиусом $R = 4 \text{ м}$ и шириной $b = 2 \text{ м}$ (рис. 4.2).

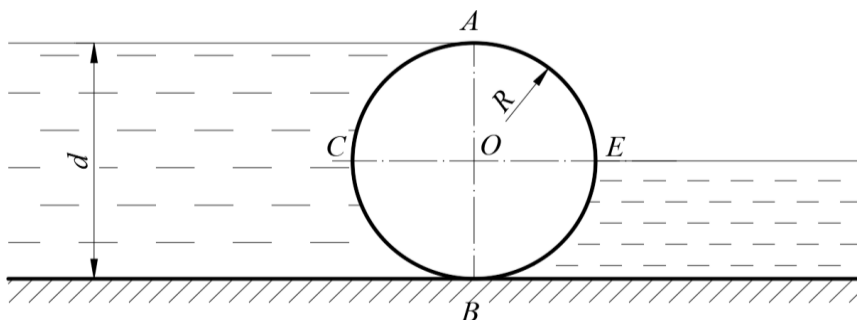


Рис. 4.2

Решение

Определим горизонтальные составляющие сил давления воды на затвор:

$$P_{x1} = \rho g h_{c1} \omega_{z1};$$

$$P_{x2} = \rho g h_{c2} \omega_{z2},$$

где h_{c1} , h_{c2} – глубина центра тяжести вертикальной проекции стенки (рис. 4.3);

ω_{z1} , ω_{z2} – площадь проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость.

Глубина центра тяжести слева от затвора:

$$h_{c1} = R = 4 \text{ м.}$$

Глубина центра тяжести справа от затвора:

$$h_{c2} = \frac{R}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ м.}$$

Площадь проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость слева:

$$\omega_{z1} = 2Rb = 2 \cdot 4 \cdot 2 = 16 \text{ м}^2.$$

Площадь проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость справа:

$$\omega_{z2} = Rb = 4 \cdot 2 = 8 \text{ м}^2.$$

Определим горизонтальную составляющую сил давления на затвор слева:

$$P_{x1} = \rho g h_{c1} \omega_{z1} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 16 = 627\,840 \text{ Н} = 627,8 \text{ кН}.$$

Определим горизонтальную составляющую сил давления на затвор справа:

$$P_{x2} = \rho g h_{c2} \omega_{z2} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 8 = 156\,960 \text{ Н} = 157,0 \text{ кН}.$$

Вертикальные силы определим отдельно для левой и правой сторон затвора (рис. 4.3).

В левой части затвора:

$$P_{z1} = \rho g W_{ABC},$$

где W_{ABC} — объем тела давления (объем $\frac{1}{2}$ цилиндра).

$$W_{ABC} = \frac{1}{2} \pi R^2 b = \frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 4^2 \cdot 2 = 50,24 \text{ м}^3.$$

$$P_{z1} = \rho g W_{ABC} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 50,24 = 492\,854 \text{ Н} = 492,9 \text{ кН}.$$

В правой части затвора:

$$P_{z2} = \rho g W_{BOE},$$

где W_{BOE} — объем тела давления (объем $\frac{1}{4}$ цилиндра) (рис. 4.3).

$$W_{BOE} = \frac{1}{4} \pi R^2 b = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 4^2 \cdot 2 = 25,12 \text{ м}^3.$$

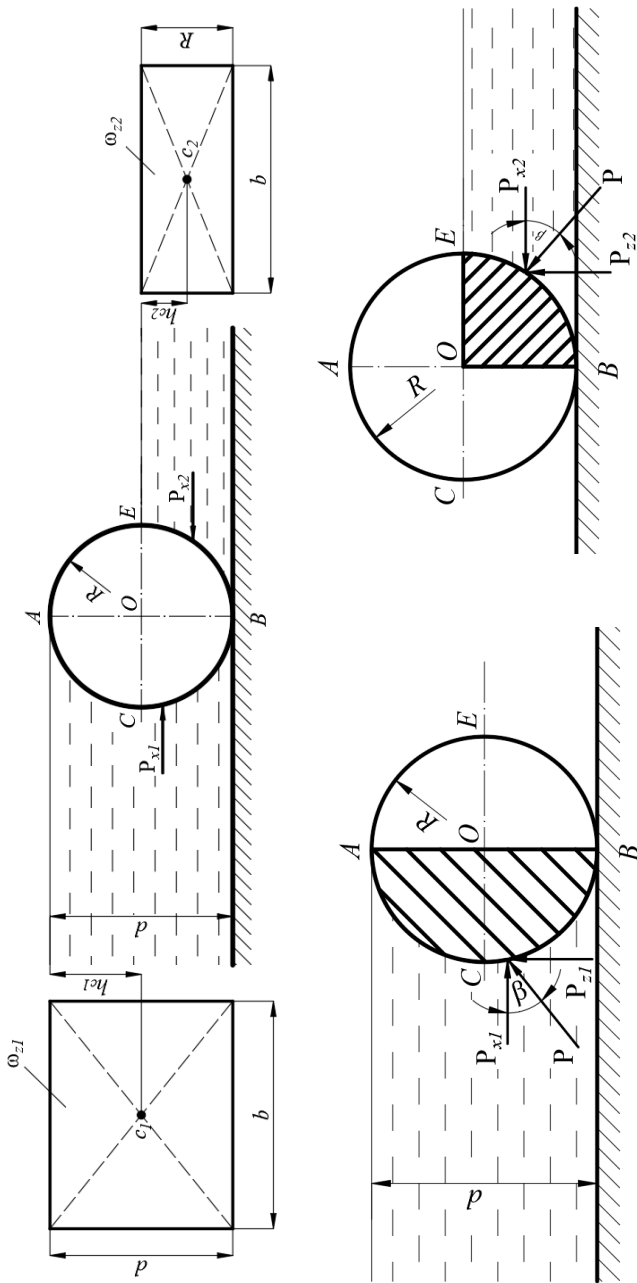


Рис. 4.3

$$P_{z2} = \rho g W_{BOE} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 25,12 = 246\,427 \text{ Н} = 246,4 \text{ кН}.$$

Определим равнодействующую силу давления слева от затвора:

$$P_1 = \sqrt{P_{x1}^2 + P_{z1}^2} = \sqrt{627,8^2 + 492,9^2} = 798 \text{ кН}.$$

Определим равнодействующую силу давления справа от затвора:

$$P_2 = \sqrt{P_{x2}^2 + P_{z2}^2} = \sqrt{157^2 + 246,4^2} = 292,2 \text{ кН}.$$

Точка приложения P определяется с помощью угла β , который равен:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_z}{P_x}.$$

Определим точку приложения силы P_1 :

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{P_{z1}}{P_{x1}} = \operatorname{arctg} \frac{492,9}{627,8} = 38,1.$$

Определим точку приложения силы P_2 :

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{P_{z2}}{P_{x2}} = \operatorname{arctg} \frac{246,4}{157} = 57,5.$$

Задача 3. Расчет простого трубопровода

Определить расход воды в трубе переменного сечения (рис. 4.4), давление в сечении $x-x$ (перед входом в трубу меньшего диаметра), если известны давления на поверхности воды в резервуарах $p_1 = p_{\text{изб}} = 0,26 \text{ МПа}$ и $p_2 = p_{\text{вак}} = 0,06 \text{ МПа}$, коэффициенты Дарси $\lambda = 0,025$ и геометрические характеристики: $H_1 = 3 \text{ м}$, $H_2 = 2 \text{ м}$, $d_1 = d_2 = 3\,000 \text{ мм}$, $d_3 = 100 \text{ мм}$, $d_4 = 50 \text{ мм}$, $l_3 = 100 \text{ м}$, $l_4 = 50 \text{ м}$, $\alpha = 10^\circ$.

Построить пьезометрическую линию и линию полного напора.

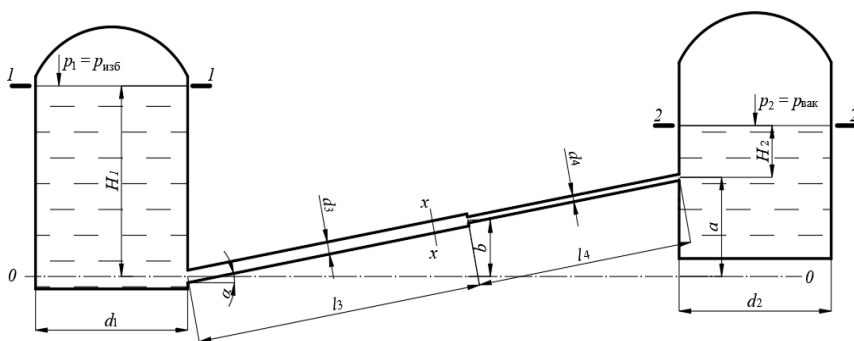


Рис. 4.4

Решение

1. Определение расхода воды в трубе.

Для решения задачи необходимо установить направление движения жидкости (из резервуара *A* в резервуар *B* или наоборот). Для этого определим потенциальные энергии (высота и давление) в сечениях 1–1 и 2–2, взятых по свободной поверхности воды в резервуарах:

1) в сечении 1–1:

$$\Pi_1 = H_1 + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} = 3 + \frac{0,26 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = 29,5 \text{ м};$$

2) в сечении 2–2:

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= H_2 + (l_3 + l_4) \sin \alpha - \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = \\ &= 2 + (100 + 50) \sin 10 - \frac{0,06 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = 21,9 \text{ м}. \end{aligned}$$

Так как потенциальная энергия в сечении 1–1 больше, то это означает, что жидкость будет перетекать из левого резервуара в правый в сечение 2–2.

Составим уравнение Бернулли для сечений 1–1 и 2–2 относительно плоскости 0–0:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{\text{тр}},$$

где $z_1 = H_1$;

$$z_2 = H_2 + (l_3 + l_4)\sin\alpha;$$

$$p_1 = p_{\text{изб}};$$

$$p_2 = -p_{\text{вак}};$$

$V_1 = V_2 = 0$ – т. к. уровень в баке постоянный, не меняется;

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1;$$

$h_{\text{тр}} = h_{\text{м}} + h_{\text{дл}}$ – суммарные потери напора;

$h_{\text{м}}$ – местные потери напора, $h_{\text{м}} = h_{\text{вх}} + h_{\text{р.с}} + h_{\text{вых}}$;

$$h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{V_3^2}{2g} \text{ – потери на входе в трубу};$$

$\zeta_{\text{вх}} = 0,5$ – коэффициент сопротивления входа в трубу [1];

$$h_{\text{р.с}} = \zeta_{\text{р.с}} \frac{V_4^2}{2g} \text{ – потери на внезапном расширении трубы};$$

$$\zeta_{\text{р.с}} = 0,5 \left(1 - \frac{d_4^2}{d_3^2} \right) = 0,5 \left(1 - \frac{50^2}{100^2} \right) = 0,375 \text{ – коэффициент сопротив-}$$

ления при сужении трубы;

$$h_{\text{вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{V_4^2}{2g} \text{ – потери на выходе из трубы};$$

$\zeta_{\text{вых}} = 1,0$ – коэффициент сопротивления выхода из трубы [1];

$h_{\text{дл}} = h_{\text{дл3}} + h_{\text{дл4}}$ – потери напора по длине;

$$h_{\text{дл3}} = \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g} \text{ – потери по длине на участке диаметром } d_3;$$

$$h_{\text{дл4}} = \lambda_4 \frac{l_4}{d_4} \frac{V_4^2}{2g} \text{ – потери по длине на участке диаметром } d_4.$$

Подставим все в уравнение Бернулли:

$$H_1 + \frac{p_{изб}}{\rho g} = H_2 + (l_3 + l_4) \sin \alpha - \frac{p_{вак}}{\rho g} + \zeta_{вх} \frac{V_3^2}{2g} + \zeta_{п.с} \frac{V_4^2}{2g} + \zeta_{вых} \frac{V_4^2}{2g} + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g} + \lambda_4 \frac{l_4}{d_4} \frac{V_4^2}{2g}.$$

$$H_1 + \frac{p_{изб}}{\rho g} - H_2 - (l_3 + l_4) \sin \alpha + \frac{p_{вак}}{\rho g} = \left(\zeta_{вх} + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \right) \frac{V_3^2}{2g} + \left(\zeta_{п.с} + \zeta_{вых} + \lambda_4 \frac{l_4}{d_4} \right) \frac{V_4^2}{2g}.$$

Скорость выразим через расход и площадь живого сечения:

$$V_3 = \frac{4Q}{\pi d_3^2}; \quad V_4 = \frac{4Q}{\pi d_4^2};$$

$$H_1 + \frac{p_{изб}}{\rho g} - H_2 - (l_3 + l_4) \sin \alpha + \frac{p_{вак}}{\rho g} = \left(\zeta_{вх} + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d_3^4 g} + \left(\zeta_{п.с} + \zeta_{вых} + \lambda_4 \frac{l_4}{d_4} \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d_4^4 g}.$$

Подставляем заданные величины:

$$\begin{aligned} 3 + \frac{0,26 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} - 2 - (100 + 50) \sin 10 + \frac{0,06 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = \\ = \left(0,5 + 0,025 \frac{100}{0,1} \right) \frac{8 \cdot Q^2}{3,14^2 \cdot 0,1^4 \cdot 9,81} + \\ + \left(0,375 + 1 + 0,025 \frac{50}{0,05} \right) \frac{8 \cdot Q^2}{3,14^2 \cdot 0,05^4 \cdot 9,81} \end{aligned}$$

Преобразуем уравнение:

$$29,5 - 21,9 = 21\,091,2Q^2 + 349\,039,14Q^2;$$

$$7,6 = 370\,130,34Q^2;$$

$$Q = 0,0045 \text{ м}^3/\text{с} = 4,5 \text{ л/с}.$$

2. Определение давления в заданном сечении.

Давление p_x в сечении $x-x$ определим с помощью уравнения Бернулли, составив его для сечения $I-I$ по поверхности воды в левом резервуаре и $x-x$:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_x + \frac{p_x}{\rho g} + \frac{\alpha_x V_x^2}{2g} + h_{\text{тр}1-x},$$

где $z_1 = H_1$;

$$p_1 = p_{\text{изб}};$$

$$V_1 = 0;$$

$z_x = l_3 \sin \alpha$ – координата центра тяжести сечения $x-x$ относительно плоскости сравнения 0–0;

$$V_x = V_3;$$

$$h_{\text{тр}1-x} = h_{\text{вх}} + h_{\text{дл}3};$$

$$h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{V_3^2}{2g} \text{ – потери на входе в трубу;}$$

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5 \text{ – коэффициент сопротивления входа в трубу [1];}$$

$$h_{\text{дл}3} = \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g} \text{ – потери по длине на участке диаметром } d_3.$$

$$H_1 + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} = l_3 \sin \alpha + \frac{p_x}{\rho g} + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} + \zeta_{\text{вх}} \frac{V_3^2}{2g} + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g};$$

$$\frac{p_x}{\rho g} = H_1 + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} - l_3 \sin \alpha - \frac{\alpha_x V_3^2}{2g} - \zeta_{\text{вх}} \frac{V_3^2}{2g} - \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g};$$

$$\frac{p_x}{\rho g} = H_1 + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} - l_3 \sin \alpha - \frac{V_3^2}{2g} \left(\alpha_3 + \zeta_{\text{вх}} + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \right).$$

Найдем скорость в сечении $x-x$:

$$V_3 = \frac{4Q}{\pi d_3^2} = \frac{4 \cdot 0,0045}{3,14 \cdot 0,1^2} = 0,57 \text{ м/с};$$

$$\frac{p_x}{\rho g} = 3 + \frac{0,26 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} - 100 \cdot \sin 10 - \frac{0,57^2}{2 \cdot 9,81} \left(1 + 0,5 + 0,025 \frac{100}{0,1} \right) = 11,7 \text{ м};$$

$$p_x = \rho g h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 11,7 = 114\,777 \text{ Па}.$$

Получаем избыточное давление в сечении $x-x$: $p_x = 114,8 \text{ кПа}$.

3. Построение пьезометрической линии и линии полной удельной энергии (напорной) (рис. 4.5).

Для построения пьезометрической линии (линии удельной потенциальной энергии) вычислим скоростные напоры.

Для этого рассчитаем **скорости на соответствующих участках**:

$$V_3 = \frac{4Q}{\pi d_3^2} = \frac{4 \cdot 0,0045}{3,14 \cdot 0,1^2} = 0,57 \text{ м/с};$$

$$V_4 = \frac{4Q}{\pi d_4^2} = \frac{4 \cdot 0,0045}{3,14 \cdot 0,05^2} = 2,3 \text{ м/с}.$$

Скоростной напор на участке диаметром d_3 длиной l_3 :

$$\frac{V_3^2}{2g} = \frac{0,57^2}{2 \cdot 9,81} = 0,017 \text{ м}.$$

Скоростной напор на участке диаметром d_4 длиной l_4 :

$$\frac{V_4^2}{2g} = \frac{2,3^2}{2 \cdot 9,81} = 0,27 \text{ м.}$$

Для построения линии полной удельной энергии (напорной) вычислим **потери напора**:

1. Потери на вход:

$$h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{V_3^2}{2g} = 0,5 \cdot 0,017 = 0,0085 \text{ м.}$$

2. Потери на резком сужении:

$$h_{\text{р.с}} = \zeta_{\text{р.с}} \frac{V_4^2}{2g} = 0,375 \cdot 0,27 = 0,1 \text{ м.}$$

3. Потери на выходе:

$$h_{\text{вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{V_4^2}{2g} = 1 \cdot 0,27 = 0,27 \text{ м.}$$

4. Потери по длине l_3 :

$$h_{\text{дл3}} = \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g} = 0,025 \cdot \frac{100}{0,1} \cdot 0,017 = 0,425 \text{ м.}$$

5. Потери по длине l_4 :

$$h_{\text{дл4}} = \lambda_4 \frac{l_4}{d_4} \frac{V_4^2}{2g} = 0,025 \cdot \frac{50}{0,05} \cdot 0,27 = 6,75 \text{ м.}$$

Суммарные потери энергии:

$$\begin{aligned}\sum h_{\text{тр}} &= h_{\text{вх}} + h_{\text{р.с}} + h_{\text{вых}} + h_{\text{дл3}} + h_{\text{дл4}} = \\ &= 0,0085 + 0,1 + 0,27 + 0,425 + 6,75 = 7,55 \text{ м.}\end{aligned}$$

Откладываем от плоскости сравнения $0-0$ значение гидродинамического напора для первого сечения, равное в данном случае пьезометрическому:

$$H_1 + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} = 3 + \frac{0,26 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = 29,5 \text{ м.}$$

Дальше определяем ординаты линии энергии, вычитая из этой величины потери энергии до соответствующего сечения.

Для построения пьезометрической линии достаточно вычесть из ординат линии энергии скоростные напоры, соответствующие живым сечениям.

Задача 4. Истечение жидкости из малых отверстий в тонкой стенке и через насадки

Определить расход воды, проходящей через цилиндрический насадок (рис. 4.6) длиной $l = 400$ мм, диаметром $d = 100$ мм под напором $H = 4$ м и избыточном давлением на свободной поверхности в резервуаре $p_{\text{изб}} = 0,12$ МПа.

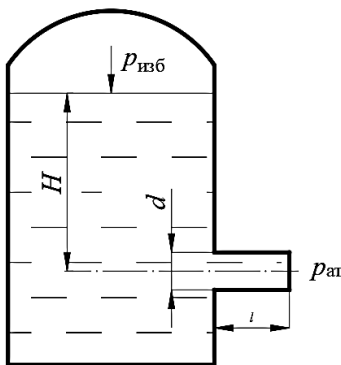


Рис. 4.6

Решение

Насадки и малые отверстия в тонкой стенке рассчитываются по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}$$

где μ – коэффициент расхода;

ω – площадь выходного отверстия;

H_0 – полная энергия потока перед отверстием или насадком относительно центра тяжести из выходного сечения.

Коэффициент расхода круглого малого отверстия в тонкой стенке обычно принимают равным 0,62, а цилиндрического насадка при нормальных условиях – 0,82. Условия нормальной работы цилиндрического насадка следующие:

1. Обеспечение зарядки насадка во время пуска, т. е. изоляция зоны сжатия от доступа воздуха через выходное сечение.

2. Относительная длина насадка должна быть в пределах $3,5-4 \leq \frac{l}{d} \leq 6-7$. Нижний предел связан с длиной зоны сжатия, верхний – с влиянием сопротивлений по длине за зоной сжатия.

3. Вакуум в зоне сжатия не должен превышать предельного, что требует ограничения напора:

$$H_0 < H_{\text{пр}} \cong 10-12 \text{ м. вод. ст.}$$

Нарушение каждого из перечисленных условий приводит к работе насадка в режиме отверстия с $\mu = 0,62$.

В заданном примере удовлетворяется второе условие $\frac{l}{d} = \frac{400}{100} = 4$, но нарушено третье.

Действительно, гидродинамический напор H_2 , равный в данном случае пьезометрическому, складывается из двух величин:

$$H_2 = H_1 + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} = 4 + \frac{0,12 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = 16,2 \text{ м,}$$

что больше $H_{\text{пр}} = 10 \text{ м}$.

Поэтому насадок будет работать не полным выходным сечением, а как малое отверстие в тонкой стенке с коэффициентом расхода $\mu = 0,62$:

$$Q = 0,62 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 16,2} = 0,0868 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Задача 5. Расчет газопровода (воздуховода)

В стальной трубопровод диаметром $d = 125 \text{ мм}$ и длиной $l = 150 \text{ м}$ поступает сжатый воздух под давлением (избыточным) $p_{\text{изб}} = 120 \text{ кПа}$. Температура воздуха 20°C . Скорость в начале трубопровода $V_1 = 12 \text{ м/с}$. Определить массовый расход воздуха M и давление в конце трубы p_2 . Кинематический коэффициент вязкости воздуха $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$. Абсолютная шероховатость стенок трубопровода $\Delta_s = 0,15 \text{ мм}$.

Решение

Трубопроводы делятся на трубопроводы низкого и высокого давления, что обусловлено относительным перепадом давления в нем.

Трубопроводы с относительным перепадом $\frac{\Delta p}{p_1} 100 \% < 5 \%$ относятся к трубопроводам низкого давления, при $\frac{\Delta p}{p_1} 100 \% > 5 \%$ трубопроводы относятся к трубопроводам высокого давления.

Для трубопровода низкого давления потери давления в нем определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{V^2}{2},$$

где ρ – плотность газа, которая определяется из уравнения Клайперона-Менделеева:

$$\frac{p_{\text{абс}}}{\rho} = RT,$$

где $R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – универсальная газовая постоянная;

T – температура в градусах Кельвина.

$$T = 273 + 20 = 293 \text{ К};$$

$$p_{\text{лабс}} = p_{\text{ат}} + p_{\text{лизб}} = 100\,000 + 120\,000 = 220\,000 \text{ Па} = 220 \text{ кПа}.$$

Плотность газа в начале газопровода составит:

$$\rho = \frac{p_{\text{абс}}}{RT} = \frac{220\,000}{287 \cdot 293} = 2,62 \text{ кг/м}^3.$$

Массовый расход воздуха газопровода:

$$M = \rho V_1 \omega = \rho V_1 \frac{\pi d^2}{4} = 2,62 \cdot 12 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,125^2}{4} = 0,386 \text{ кг/с}.$$

λ – коэффициент гидравлического трения, который зависит от зоны сопротивления, т. е. от числа Рейнольдса.

Определим его для начального сечения трубопровода:

$$\text{Re} = \frac{V_1 \cdot d}{\nu} = \frac{12 \cdot 0,125}{15,7 \cdot 10^{-6}} = 95\,541.$$

Определим нижнюю границу квадратичной зоны сопротивления:

$$500 \frac{d}{\Delta_3} = 500 \frac{125}{0,15} = 416\,666.$$

Так как $\text{Re} = 95\,541 < 500 \frac{d}{\Delta_3} = 416\,666$, то зона сопротивления до-
квадратичная, коэффициент гидравлического сопротивления опреде-
лим по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{68}{95541} + \frac{0,15}{125} \right)^{0,25} = 0,023.$$

Определяем потерю давления в газопроводе:

$$\Delta p_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{V_1^2}{2} = 0,023 \frac{150}{0,125} 2,62 \frac{12^2}{2} = 5\,206 \text{ Па}.$$

Избыточное давление в конце газопровода составит:

$$p_2 = p_1 - \Delta p = 120\,000 - 5\,206 = 114\,794 \text{ Па}.$$

Относительный перепад давления составит:

$$\frac{\Delta p}{p_1} 100 \% = \frac{5\,206}{120\,000} 100 \% = 4,34 \% < 5 \%.$$

Т. е. уточнять решение не требуется, т. к. данный трубопровод
относится к трубопроводам с низким перепадом давления.

4.2. Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода

Задача 1. Гидравлический расчет длинного сложного трубопровода

Определить напор в начале водопровода H , используя следующие исходные данные (рис. 4.7):

$Q_B = 21$ л/с; $Q_C = 20$ л/с; $Q_D = 10$ л/с; $q = 0,1$ л/с с 1 м;

$l_1 = 3000$ м; $l_2 = 600$ м; $l_3 = 250$ м; $l_4 = 500$ м;

$d_1 = 400$ мм; $d_2 = 200$ мм; $d_3 = 150$ мм; $d_4 = 150$ мм;

трубы стальные, неновые.

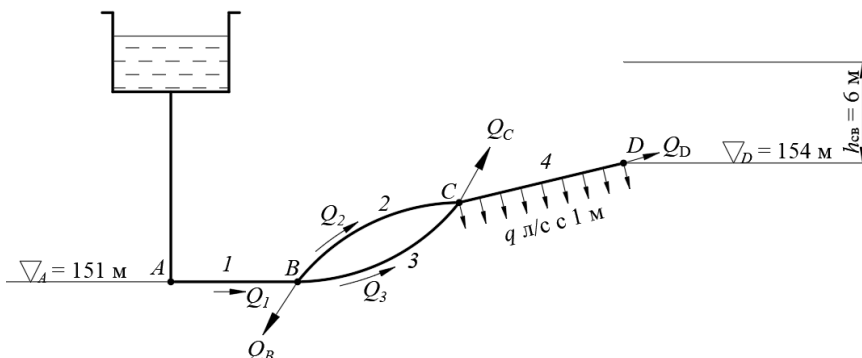


Рис. 4.7

Решение

1. Используя уравнение Бернулли, запишем общую расчетную формулу для определения напора воды в начале трубопровода (в т. А). Этот напор H_B является высотой водонапорной башни или напором, который должен развивать центробежный насос при подаче воды в трубопровод А–В–С–D.

В крупных городах для питьевого водоснабжения используют центробежные насосы (более 10 000 жителей), для небольших населенных пунктов – водонапорные башни.

Напор в начале трубопровода расходуется на преодоление потерь энергии при движении жидкости в рассматриваемом трубопроводе. Решая уравнение Бернулли, получим:

$$H_B = \sum h_{\Pi ABCD} + (\nabla_K - \nabla_H) + h_{CB},$$

где $\sum h_{\Pi ABCD}$ – суммарные потери напора на всех участках трубопровода;

∇_K – конечная геодезическая отметка трубопровода;

∇_H – начальная геодезическая отметка трубопровода.

При расчете трубопроводов всегда учитываются его геодезические отметки:

Если $\nabla_K - \nabla_H = (-)$ – вода движется самотеком (вниз).

Если $\nabla_K - \nabla_H = (+)$ – вода движется принудительно вверх.

Следует иметь в виду, что при расчете трубопроводов также необходимо учитывать напор (давление) во всех узловых точках, в том числе в конце трубопровода, который называется свободным напором.

Для расчета суммарных потерь напора в трубопроводе $ABCD$ воспользуемся трубопроводной формулой в виде:

$$h_{\text{дп}} = A l Q^2,$$

где A – удельное сопротивление трубопровода, определяемое по специальным таблицам Шевелева для водопроводов.

2. Определим расчетные расходы на каждом участке трубопровода $ABCD$, начиная с конца трубопровода (т. D):

– **Участок CD :**

$$Q_4 = Q_D + 0,55 q l_4 = 10 + 0,55 \cdot 0,1 \cdot 500 = 37,5 \text{ л/с} = 0,0375 \text{ м}^3/\text{с}.$$

– **Участок BC :**

$$Q_{2-3} = Q_2 + Q_3 = Q_4 + q l_4 + Q_C = 10 + 0,1 \cdot 500 + 20 = 80 \text{ л/с} = 0,08 \text{ м}^3/\text{с}.$$

– **Участок AB :**

$$Q_1 = Q_D + q l_4 + Q_B + Q_C = 10 + 0,1 \cdot 500 + 20 + 21 = 101 \text{ л/с} = 0,101 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Определяем потери напора на каждом участке трубопровода $ABCD$ и проверяем эти участки на условие квадратичности.

– **Участок CD :**

$$h_4 = A_4 l_4 Q_4^2,$$

где $d_4 = 150 \text{ мм} \rightarrow A_4 = 30,65 \text{ с}^2/\text{м}^6$ (см. таблицы Шевелева).

$$h_4 = 30,65 \cdot 500 \cdot 0,0375^2 = 21,55 \text{ м.}$$

Проверяем участок CD на квадратичность:

$$V_4 = \frac{Q_4}{\omega_4} = \frac{4Q_4}{\pi d_4^2} = \frac{4 \cdot 0,0375}{3,14 \cdot 0,15^2} = 2,1 \text{ м/с} > 1 - 1,2 \text{ м/с.}$$

Условия квадратичности соблюдается, поправка на неквадратичность не нужна.

– **Участок BC** (параллельное соединение):

$$h_{2-3} = h_2 = h_3 = \frac{Q_{2-3}^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{A_2 l_2}} + \frac{1}{\sqrt{A_3 l_3}} \right)^2},$$

где $d_2 = 200 \text{ мм} \rightarrow A_2 = 6,959 \text{ с}^2/\text{м}^6$ (см. таблицы Шевелева);

$d_3 = 150 \text{ мм} \rightarrow A_3 = 30,65 \text{ с}^2/\text{м}^6$ (см. таблицы Шевелева).

$$h_{2-3} = h_2 = h_3 = \frac{0,08^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{6,959 \cdot 600}} + \frac{1}{\sqrt{30,65 \cdot 250}} \right)^2} = 8,85 \text{ м.}$$

Проверяем условия квадратичности по линиям 2 и 3. Для этого предварительно находим распределение расходов по участкам 2 и 3, используя свойства параллельного соединения.

$$h_{2-3} = h_2 = h_3 = 8,85 \text{ м.}$$

Из водопроводной формулы выражаем

$$h_2 = A_2 l_2 Q_2^2 \rightarrow Q_2 = \sqrt{\frac{h_2}{A_2 l_2}} = \sqrt{\frac{h_{2-3}}{A_2 l_2}} = \sqrt{\frac{8,85}{6,959 \cdot 600}} = 0,046 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Аналогично вычисляем Q_3 :

$$Q_3 = \sqrt{\frac{h_3}{A_3 l_3}} = \sqrt{\frac{h_{2-3}}{A_3 l_3}} = \sqrt{\frac{8,85}{30,65 \cdot 250}} = 0,034 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверяем правильность расчетов, используя 2-ое свойство параллельного соединения трубопровода:

$$Q_{2-3} = Q_2 + Q_3 = 0,046 + 0,034 = 0,08 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверяем участок BC на квадратичность:

$$V_2 = \frac{4Q_2}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,046}{3,14 \cdot 0,2^2} = 1,46 \text{ м/с} > 1-1,2 \text{ м/с};$$

$$V_3 = \frac{4Q_3}{\pi d_3^2} = \frac{4 \cdot 0,034}{3,14 \cdot 0,15^2} = 1,92 \text{ м/с} > 1-1,2 \text{ м/с}.$$

Поправки на неквадратичность не нужно, условие квадратичности соблюдается.

– **Участок AB :**

$$h_1 = A_1 l_1 Q_1^2,$$

где $d_1 = 400 \text{ мм} \rightarrow A_1 = 0,1907 \text{ с}^2/\text{м}^6$ (см. таблицы Шевелева).

$$h_1 = 0,1907 \cdot 3\,000 \cdot 0,101^2 = 5,84 \text{ м.}$$

Проверка участка AB на условие квадратичности:

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,101}{3,14 \cdot 0,4^2} = 0,8 \text{ м/с} < 1-1,2 \text{ м/с}.$$

Условие квадратичности не соблюдается, требуется поправка на неквадратичность. Определим потери напора h' с учетом поправки на квадратичность K :

$$h'_1 = K A_1 l_1 Q_1^2$$

где $K = 1,06$ при $V = 0,8$ м/с (см. таблицы Шевелева).

$$h'_1 = K h_1 = 1,06 \cdot 5,84 = 6,2 \text{ м}.$$

4. Рассчитываем напор в начале трубопровода или высоту водонапорной башни H_B :

$$\begin{aligned} H_B = h'_1 + h_{2-3} + h_4 + (\nabla_k - \nabla_n) + h_{св} = 6,2 + 8,85 + 21,55 + \\ + (154 - 151) + 6 = 45,6 \text{ м} \approx 46 \text{ м}. \end{aligned}$$

Задача 2. Расчет тупикового разомкнутого трубопровода

Определить диаметры отдельных участков тупиковой водопроводной сети (трубы стальные неновые, проверка на квадратичность не требуется). Установить необходимый напор в начале трубопровода. Исходные данные к расчету (рис. 4.8):

- длины участков (м);
- узловые расходы (л/с);
- отметки местности (м);
- требуемые свободные напоры в конечных точках сети (указаны на расчетной схеме) (м).

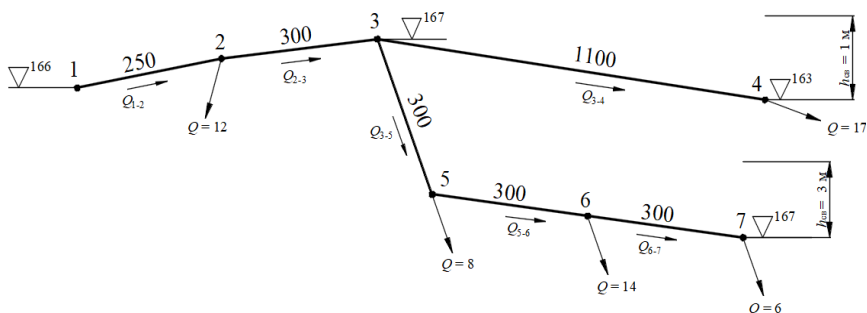


Рис. 4.8

Решение

1. Устанавливаем расчетные расходы на каждом участке трубопровода, начиная с его конца:

$$Q_{3-4} = Q_4 = 17 \text{ л/с} = 0,017 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{6-7} = Q_7 = 6 \text{ л/с} = 0,006 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{5-6} = Q_7 + Q_6 = 6 + 14 = 20 \text{ л/с} = 0,02 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{3-5} = Q_7 + Q_6 + Q_5 = 6 + 14 + 8 = 28 \text{ л/с} = 0,028 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{2-3} = Q_4 + Q_7 + Q_6 + Q_5 = 17 + 6 + 14 + 8 = 45 \text{ л/с} = 0,045 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{1-2} = Q_{2-3} + Q_2 = 45 + 12 = 57 \text{ л/с} = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Выбираем магистральный трубопровод, как самый длинный и самый нагруженный расходами. Этим участком является участок $1-2-3-4$.

3. Подбираем диаметры труб каждого участка магистральной, используя понятие экономической скорости, которую для металлических труб можно принимать:

$V_{\text{эк}} = 0,8-1,5 \text{ м/с}$ для стальных, чугунных и железобетонных труб;

$V_{\text{эк}} = 1,5-2,0 \text{ м/с}$ для пластмассовых труб.

В расчетах примем $V_{\text{эк}} = 1,2 \text{ м/с}$, чтобы соблюдать условия квадратичности для металлических (стальных) труб.

Запишем уравнение расхода:

$$Q = V\omega = V \frac{\pi d^2}{4};$$

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{\text{эк}}}} = \sqrt{\frac{4}{3,14 \cdot 1,2}} \sqrt{Q} = 1,03 \sqrt{Q}.$$

В дальнейших расчетах воспользуемся преобразованной формулой:

$$d_i = 1,03 \sqrt{Q_i};$$

$$d_{1-2} = 1,03 \sqrt{Q_{1-2}} = 1,03 \sqrt{0,057} = 0,246 \text{ м};$$

$$d_{2-3} = 1,03 \sqrt{Q_{2-3}} = 1,03 \sqrt{0,045} = 0,218 \text{ м};$$

$$d_{3-4} = 1,03 \sqrt{Q_{3-4}} = 1,03 \sqrt{0,017} = 0,134 \text{ м}.$$

Используя таблицу стандартных диаметров (табл. Шевелева), выбираем ближайший стандартный диаметр труб:

$$d_{1-2}^{\text{ст}} = 250 \text{ мм} = 0,25 \text{ м};$$

$$d_{2-3}^{\text{ст}} = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м};$$

$$d_{3-4}^{\text{ст}} = 150 \text{ мм} = 0,15 \text{ м}.$$

4. Определяем потери напора на каждом участке магистрали, используя водопроводную формулу (величины удельного сопротивления A определяются по таблицам Шевелева):

Потери на участке 1–2:

$$h_{1-2} = A_{1-2} l_{1-2} Q_{1-2}^2;$$

$$d_{1-2} = 250 \text{ мм};$$

$$A_{1-2} = 2,187 \text{ с}^2/\text{м}^6 \text{ (трубы стальные неновые);}$$

$$h_{1-2} = 2,187 \cdot 250 \cdot 0,057^2 = 1,78 \text{ м.}$$

Потери на участке 2–3:

$$h_{2-3} = A_{2-3} l_{2-3} Q_{2-3}^2;$$

$$d_{2-3} = 200 \text{ мм;}$$

$$A_{2-3} = 6,959 \text{ с}^2/\text{м}^6 \text{ (трубы стальные неновые);}$$

$$h_{2-3} = 6,959 \cdot 300 \cdot 0,045^2 = 4,23 \text{ м.}$$

Потери на участке 3–4:

$$h_{3-4} = A_{3-4} l_{3-4} Q_{3-4}^2;$$

$$d_{3-4} = 150 \text{ мм;}$$

$$A_{3-4} = 30,65 \text{ с}^2/\text{м}^6 \text{ (трубы стальные неновые);}$$

$$h_{3-4} = 30,65 \cdot 1100 \cdot 0,017^2 = 9,74 \text{ м.}$$

5. Определяем напор в начале магистрального трубопровода.

Решая уравнение Бернулли, запишем расчетную формулу в виде

$$H_B = \sum h_{п(1-2-3-4)} + (\nabla_3 - \nabla_1) + (\nabla_4 - \nabla_3) + h_{св};$$

$$H_B = 1,78 + 4,23 + 9,74 + (167 - 166) + (163 - 167) + 1 = 13,75 \text{ м} \approx 14 \text{ м.}$$

На этом расчет магистральной заканчивается. Далее расчету подлежат ответвления.

6. Расчет ответвлений 3–5–6–7.

Выпишем из пункта 1 расчетные расходы для каждого ответвления:

$$Q_{3-5} = 0,028 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{5-6} = 0,08 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{6-7} = 0,006 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее произведем расчет ответвления 3–5–6–7.

Определим расчетный напор в узловой точке 3 (рис. 4.9), под действием которого вода движется в этом ответвлении и создает свободный напор в конечной точке 7 ($h_{св7} = 3$ м). В расчете также учитываем перепад геодезических отметок в точках 3 и 7 ответвления.

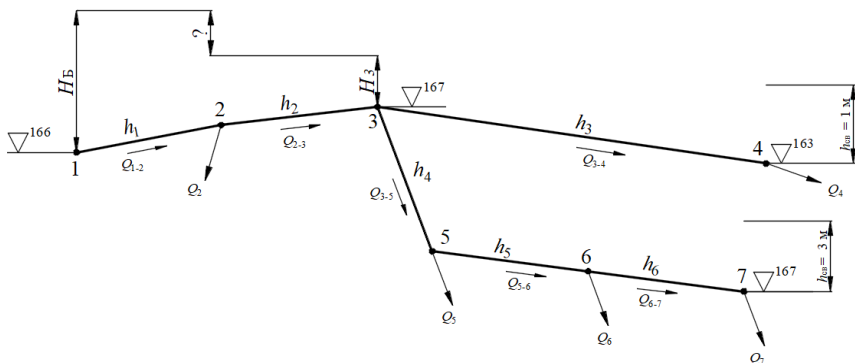


Рис. 4.9

Напор в узловой точке 3 определяется как разность:

$$H_3 = H_B - h_1 - h_2 - (\nabla_3 - \nabla_1),$$

где H_B – высота водонапорной башни (напор в начале трубопровода);
 h_1 и h_2 – потери напора на участках 1 и 2 трубопровода;
 ∇_3, ∇_1 – геодезические отметки в узловых точках 3 и 1.

$$H_3 = 14 - 1,78 - 4,23 - (167 - 166) = 6,99 \text{ м.}$$

Определяем величину допустимых потерь на участке 3–5–6–7:

$$h_{\text{доп}3-5-6-7} = H_3 - h_{св7} = 6,99 - 3 = 3,99 \text{ м.}$$

Для подбора диаметров труб в ответвлении 3–5–6–7 воспользуемся трубопроводной формулой, преобразовав ее следующим образом:

$$h_{\text{дл}} = A l Q^2;$$

$$\frac{h_{\text{дл}}}{l} = A Q^2,$$

где $\frac{h_{\text{дл}}}{l} = I$ – гидравлический уклон трубопровода.

С учетом величины уклона трубопровода можно записать:

$$I = A Q^2 \text{ и } A = \frac{I}{Q^2}.$$

Предварительно определим средний гидравлический уклон на участке ответвления 3–5–6–7 через допустимые потери и общую длину ответвления:

$$\bar{I} = \frac{h_{\text{доп3-5-6-7}}}{\sum l_i} = \frac{3,99}{300 + 300 + 300} = 0,0044.$$

Используя величину гидравлического уклона, определим удельное сопротивление труб на каждом участке ответвления

$$A_{3-5} = \frac{\bar{I}}{Q_{3-5}^2} = \frac{0,0044}{0,028^2} = 5,61 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$A_{5-6} = \frac{\bar{I}}{Q_{5-6}^2} = \frac{0,0044}{0,02^2} = 11,0 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$A_{6-7} = \frac{\bar{I}}{Q_{6-7}^2} = \frac{0,0044}{0,006^2} = 122,2 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

По вычисленным A_i находим ближайшие стандартные диаметры труб (см. таблицы Шевелева):

$$d_{3-5} = 250 \text{ мм}; \quad A_{3-5}^{\Phi} = 2,187 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$d_{5-6} = 250 \text{ мм}; \quad A_{5-6}^{\Phi} = 6,959 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$d_{6-7} = 125 \text{ мм}; \quad A_{6-7}^{\Phi} = 76,36 \text{ с}^2/\text{м}^6.$$

Определим фактические (реальные) потери напора на участке ответвления и сравним их с допустимыми потерями $h_{\text{доп}3-5-6-7}$.

$$h_{3-5}^{\phi} = A_{3-5}^{\phi} l_{3-5} Q_{3-5}^2 = 2,187 \cdot 300 \cdot 0,028^2 = 0,51 \text{ м};$$

$$h_{5-6}^{\phi} = A_{5-6}^{\phi} l_{5-6} Q_{5-6}^2 = 6,959 \cdot 300 \cdot 0,02^2 = 0,84 \text{ м};$$

$$h_{6-7}^{\phi} = A_{6-7}^{\phi} l_{6-7} Q_{6-7}^2 = 76,36 \cdot 300 \cdot 0,006^2 = 0,82 \text{ м};$$

$$\sum h_{3-5-6-7}^{\phi} = 0,51 + 0,84 + 0,82 = 2,18 \text{ м} < h_{3-5-6-7}^{\phi} = 3,99 \text{ м}.$$

Так как фактические потери напора меньше допустимых, делаем вывод, что ответвление рассчитано верно.

В заключении расчета определим фактический (реальный) напор:

$$H_3^{\phi} = \sum h_{\Pi}^{\phi} + h_{\text{св}} + (\nabla_7 - \nabla_3) = 2,18 + 3 + (167 - 167) = 5,18 \text{ м} < H_3 = 6,99 \text{ м}.$$

Так как $H_3^{\phi} = 5,18 \text{ м} < H_3 = 6,99 \text{ м}$, то делаем окончательный вывод: тупиковый трубопровод рассчитан верно.

4.3. Гидравлика открытых потоков

Задача 1

Определить нормальную и критическую глубины (h_0 и $h_{\text{кр}}$), а также критический уклон $i_{\text{кр}}$ для призматического трапецеидального канала, если заданы следующие величины: $Q = 18 \text{ м}^3/\text{с}$; ширина по дну $b = 5 \text{ м}$; коэффициент заложения откосов $m = 1$; коэффициент шероховатости русла $n = 0,0225$; продольные уклоны дна канала: $i_1 = 0,001$; $i_2 = 0,01$; $i_3 = 0,001$; $i_4 = 0,0049$; $i_5 = 0,001$; $i_6 = 0,01$.

Построить кривую свободной поверхности при неравномерном движении в призматическом канале.

Решение

1. Нормальная глубина при равномерном движении определяется методом расчетной расходной характеристики, используя формулу Шези:

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

где $K = \omega C \sqrt{R}$ – расходная характеристика открытого русла.

$$Q = K \sqrt{i}.$$

Определим величину расчетной расходной характеристики для каждого участка русла:

$$K_p = \frac{Q}{\sqrt{i}}$$

$$K_{p1,3,5} = \frac{Q}{\sqrt{i_{1,3,5}}} = \frac{18}{\sqrt{0,001}} = 569,2 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$K_{p2,6} = \frac{Q}{\sqrt{i_{2,6}}} = \frac{18}{\sqrt{0,01}} = 180,0 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$K_{p4} = \frac{Q}{\sqrt{i_4}} = \frac{18}{\sqrt{0,0049}} = 257,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Рассчитаем нормальную глубину, используя значения расчетных характеристик K_p , **методом последовательного приближения или графоаналитическим методом**. Для этого произвольно зададимся значениями глубин h_{0i} , произведем расчет. Покажем, как была рассчитана первая строка табл. 4.1. Задаемся глубиной $h_{01} = 0,5 \text{ м}$.

Рассчитаем площадь поперечного сечения:

$$\omega_1 = (b + mh_{01})h_{01} = (5 + 1 \cdot 0,5)0,5 = 2,75 \text{ м}^2.$$

где b – ширина канала по дну;

m – коэффициент заложения откоса;

h – глубина наполнения канала.

Рассчитаем смоченный периметр:

$$\chi_1 = b + 2h_{01}\sqrt{1+m^2} = 5 + 2 \cdot 0,5\sqrt{1+1^2} = 6,41 \text{ м.}$$

Определим гидравлический радиус:

$$R_1 = \frac{\omega_1}{\chi_1} = \frac{2,75}{6,41} = 0,43 \text{ м.}$$

Рассчитаем величину коэффициента Шези:

$$C_1 = \frac{1}{n} R_1^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 0,43^{1,5\sqrt{0,0225}} = 36,76 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

где n – коэффициент шероховатости.

Рассчитаем значение расходной характеристики:

$$K_1 = \omega_1 C_1 \sqrt{R_1} = 2,75 \cdot 36,76 \cdot \sqrt{0,43} = 66,29 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Результаты расчета сведем в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Определение нормальной глубины, h_0

№ п/п	h_{0i} , м	b , м	ω_{i1} , м ²	χ_{i1} , м	R_{i1} , м	C_{i1} , м ^{0,5} /с	K_{i1} , м ³ /с	Примечание
1	0,5	5,0	2,75	6,41	0,43	36,76	66,29	$K_{p(2,6)} = 180,0 \text{ м}^3/\text{с}$
2	1,0	5,0	6,0	7,83	0,77	41,91	220,7	$K_{p(4)} = 257,1 \text{ м}^3/\text{с}$
3	1,5	5,0	9,75	9,24	1,06	44,95	451,2	$K_{p(1,3,5)} = 569,2 \text{ м}^3/\text{с}$
4	2,0	5,0	14,0	10,66	1,31	46,85	750,7	

Далее строим график зависимости $K = f(h)$ (рис. 4.10).

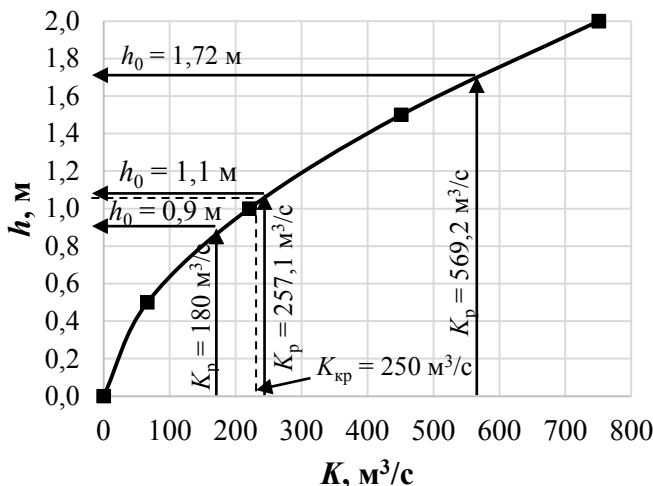


Рис. 4.10

И с этого графика снимаем нормальные глубины h_{0i} по значениям K_{pi} для каждого участка канала:

$$h_{02,6} = 0,9 \text{ м при } K_{p(2,6)} = 180,0 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$h_{04} = 1,1 \text{ м при } K_{p(4)} = 257,1 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$h_{01,3,5} = 1,72 \text{ м при } K_{p(1,3,5)} = 569,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Найденные графически нормальные глубины проверяют расчетом, сопоставляя исходные значения расходных характеристик K_0 с вычисленными K_p для нормальных глубин по формуле:

$$K_0 = \omega C \sqrt{R}.$$

При $h_{01,3,5} = 1,72$ м, $b = 5$ м:

$$\omega = (b + mh_{01,3,5})h_{01,3,5} = (5 + 1 \cdot 1,72)1,72 = 11,56 \text{ м}^2;$$

$$\chi = b + 2h_{01,3,5}\sqrt{1+m^2} = 5 + 2 \cdot 1,72\sqrt{1+1^2} = 9,86 \text{ м};$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{11,56}{9,86} = 1,172 \text{ м};$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1,3\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 1,172^{1,3\sqrt{0,0225}} = 45,84 \text{ м}^{0,5} / \text{с};$$

$$K = \omega C \sqrt{R} = 11,56 \cdot 45,84 \cdot \sqrt{1,172} = 573,66 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$\frac{K_0 - K_p}{K_0} = \frac{573,66 - 569,2}{573,66} 100 \% = 0,78 \% < 5 \% - \text{допустимо.}$$

При $h_{04} = 1,1 \text{ м}$, $b = 5 \text{ м}$:

$$\omega = (b + mh_{04})h_{04} = (5 + 1 \cdot 1,1)1,1 = 6,71 \text{ м}^2;$$

$$\chi = b + 2h_{04}\sqrt{1 + m^2} = 5 + 2 \cdot 1,1\sqrt{1 + 1^2} = 8,11 \text{ м};$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{6,71}{8,11} = 0,827 \text{ м};$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 0,827^{1,5\sqrt{0,0225}} = 42,58 \text{ м}^{0,5} / \text{с};$$

$$K = \omega C \sqrt{R} = 6,71 \cdot 42,58 \cdot \sqrt{0,827} = 259,2 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$\frac{K_0 - K_p}{K_0} = \frac{259,2 - 257,1}{259,2} 100 \% = 0,81 \% < 5 \% - \text{допустимо.}$$

При $h_{02,6} = 0,9 \text{ м}$, $b = 5 \text{ м}$

$$\omega = (b + mh_{02,6})h_{02,6} = (5 + 1 \cdot 0,9)0,9 = 5,31 \text{ м}^2;$$

$$\chi = b + 2h_{02,6}\sqrt{1 + m^2} = 5 + 2 \cdot 0,9\sqrt{1 + 1^2} = 7,55 \text{ м};$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{5,31}{7,55} = 0,703 \text{ м};$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 0,703^{1,5\sqrt{0,0225}} = 41,06 \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

$$K = \omega C \sqrt{R} = 5,31 \cdot 41,06 \cdot \sqrt{0,703} = 182,8 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\frac{K_0 - K_p}{K_0} = \frac{182,8 - 180}{182,8} 100 \% = 1,53 \% < 5 \% \text{ допустимо.}$$

3. Критическая глубина и критическое состояние потока соответствуют минимуму удельной энергии сечения. Критическую глубину определяют по уравнению критического состояния потока:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{\text{кр}}^3}{B_{\text{кр}}}.$$

Это уравнение можно решить методом подбора, т. е. для произвольных значений глубин определяем правую часть уравнения и сравниваем ее с заранее найденной левой частью.

Решим уравнение графоаналитическим методом. Построим график зависимости $\omega^3/B = f(h)$, с которого при $\frac{\omega_{\text{кр}}^3}{B_{\text{кр}}} = \frac{\alpha Q^2}{g}$ можно снять значение критической глубины.

Рассчитаем $\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{1,1 \cdot 18^2}{9,81} = 36,33$. В расчетах используем следующую расчетную схему (рис. 4.11) и формулы.

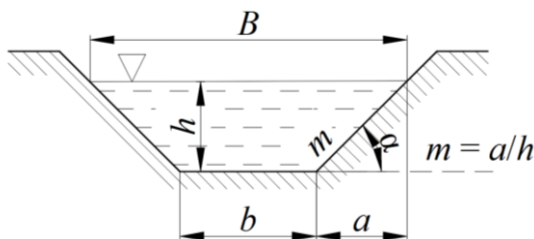


Рис. 4.11

$$\omega_{\text{кри}} = (b + mh_{\text{кри}})h_{\text{кри}};$$

$$B_{\text{кри}} = b + 2mh_{\text{кри}}.$$

Численный расчет сведем в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Определение критической глубины, $h_{\text{кр}}$

№ п/п	$h_{\text{кр}}, \text{ м}$	$\omega_{\text{кр}}, \text{ м}^2$	$B, \text{ м}$	$\frac{\omega_{\text{кр}}^3}{B_{\text{кр}}}$
1	0,50	2,75	6,0	3,47
2	0,75	4,31	6,5	12,32
3	1,00	6,0	7,0	30,86
4	1,25	7,8	7,5	63,56

По данным таблицы строим график зависимости $\omega^3/B = f(h)$ (рис. 4.12) и с рисунка снимаем значение $h_{\text{кр}} = 1,05 \text{ м}$.

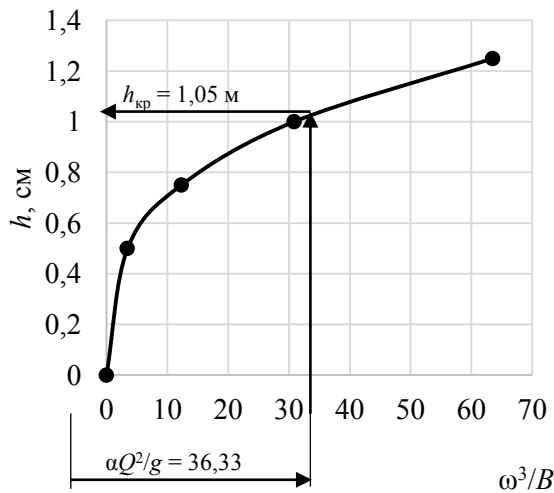


Рис. 4.12

Проверка:

$$h_{\text{кр}} = 1,05 \text{ м};$$

$$\omega_{\text{кр}} = (b + mh_{\text{кр}})h_{\text{кр}} = (5 + 1 \cdot 1,05)1,05 = 6,35 \text{ м}^2;$$

$$B_{\text{кр}} = b + 2mh_{\text{кр}} = 5 + 2 \cdot 1 \cdot 1,05 = 7,1 \text{ м};$$

$$\frac{\omega_{\text{кр}}^3}{B_{\text{кр}}} = \frac{6,35^3}{7,1} = 36,06;$$

$$\frac{36,33 - 36,06}{36,33} 100 \% = 0,74 \% < 5 \% - \text{допустимо.}$$

4. Критический уклон – это такой продольный уклон дна русла, при котором равномерное движение жидкости происходит с критической глубиной, т. е. критическая и нормальная глубина равны. Поэтому критический уклон можно определить по формуле Шези:

$$Q = K\sqrt{i};$$

$$i_{\text{кр}} = \left(\frac{Q}{K_{\text{кр}}} \right)^2,$$

где $K_{\text{кр}}$ – расходная характеристика, определяемая по критической глубине $h_{\text{кр}} = 1,05 \text{ м}$, снимаем значение $K_{\text{кр}}$ с рис. 4.10. – $K_{\text{кр}} = 250 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$i_{\text{кр}} = \left(\frac{Q}{K_{\text{кр}}} \right)^2 = \left(\frac{18}{250} \right)^2 = 0,0052.$$

5. Определим форму кривой свободной поверхности в призматическом канале переменного уклона с постоянным по длине расходом Q и постоянной шероховатостью n .

Анализ уравнения критического состояния потока показывает, что при $Q = 18 \text{ м}^3/\text{с} = \text{const} \rightarrow h_{\text{кр}} = 1,05 \text{ м} = \text{const}$.

Анализ уравнения Шези показывает, что нормальная глубина h_0 зависит от уклона русла i и является величиной переменной.

Выпишем все значения глубин и уклонов для их сравнения:

$h_{01} = h_{03} = h_{05} = 1,72 \text{ м} > h_{кр} = 1,05 \text{ м}$ – поток находится в спокойном состоянии;

$$i_1 = i_3 = i_5 = 0,001 < i_{кр} = 0,0052;$$

$h_{02} = h_{06} = 0,9 \text{ м} < h_{кр} = 1,05 \text{ м}$ – поток находится в бурном состоянии;

$$i_2 = i_6 = 0,01 > i_{кр} = 0,0052;$$

$h_{04} = 1,1 \text{ м} > h_{кр} = 1,05 \text{ м}$ – поток находится в спокойном состоянии;

$$i_2 = i_6 = 0,01 > i_{кр} = 0,0052.$$

Далее на миллиметровой бумаге выстраиваются контуры дна русла, потом наносится линия критической глубины $K-K$ и линии нормальных глубин $N-N$. На каждом участке затем, проводя анализ дифференциального уравнения неравномерного движения

$$\frac{dh}{dl} = i \frac{1 - \left(\frac{h_0}{h} \right)^2}{1 - Fr},$$

строятся кривые свободной поверхности воды на каждом участке канала (рис. 4.13).

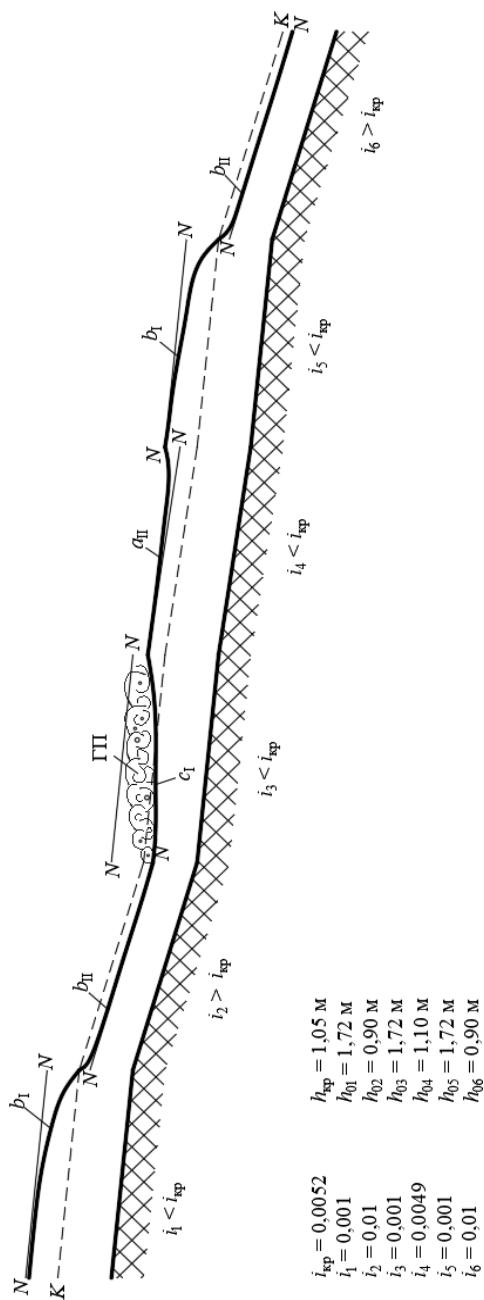


Рис. 4.13

Задача 2

Определить длину участка канала (рис. 4.14), требующую укрепления, если допустимая скорость на разрыв канала естественного русла $V_{\text{доп}} = 2,3$ м/с. Расчету подлежит 1-ый участок канала с продольным уклоном дна $i = 0,001$; $h_{\text{кр}} = 1,05$ м; $h_{01} = 1,72$ м.

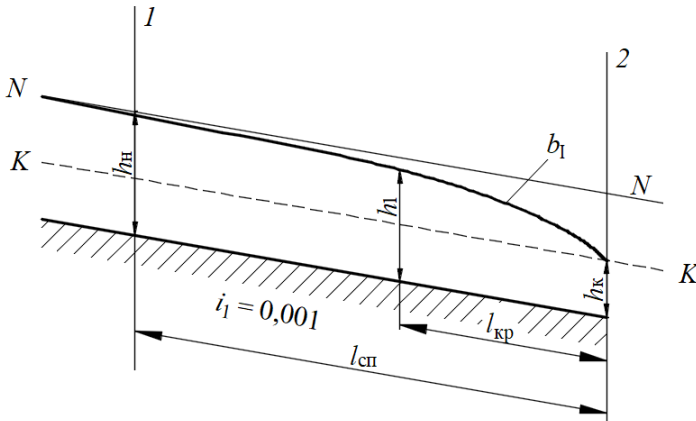


Рис. 4.14

Решение

На первом участке (см. задачу № 1) наблюдается кривая спада b_1 . Кривая спада находится между начальной глубиной $h_n \rightarrow h_0 = 1,72$ м и конечной глубиной $h_k \rightarrow h_{\text{кр}} = 1,05$ м.

Предварительно проверим канал на условия размываемости, учитывая, что допустимая размывающая скорость $V_{\text{доп}} = 2,3$ м/с.

Если скорость будет больше $V_{\text{доп}}$, следовательно, канал будет размываться (дно, борты канала), дно и откосы канала необходимо укреплять.

Запишем условие неразмываемости:

$$V_{\text{ф}} < V_{\text{доп}},$$

где $V_{\text{ф}}$ – фактическая скорость (реальная).

Найдем реальные скорости движения воды в начале и конце канала из уравнения расхода:

$$V_n = \frac{Q}{\omega_n} = \frac{Q}{(b + mh_0)h_0} = \frac{18}{(5 + 1 \cdot 1,72)1,72} = 1,56 \text{ м/с} < V_{\text{доп}} = 2,3 \text{ м/с};$$

$$V_k = \frac{Q}{\omega_k} = \frac{Q}{(b + mh_{\text{кр}})h_{\text{кр}}} = \frac{18}{(5 + 1 \cdot 1,05)1,05} = 2,83 \text{ м/с} > V_{\text{доп}} = 2,3 \text{ м/с}.$$

Делаем **выводы**: часть канала будет размываться, а часть канала будет устойчивой (не размывается).

Найдем глубину воды в канале, которая соответствует допустимой скорости, используя уравнения расхода (методом подбора).

$$Q = V_{\text{доп}} \omega_{\text{доп}} = V_{\text{доп}} (b + mh_{\text{доп}}) h_{\text{доп}};$$

$$18 = 2,3(5 + 1 \cdot h_{\text{доп}}) h_{\text{доп}}.$$

Задаемся глубиной $h_{\text{доп}} = 1,25 \text{ м}$.

$$18 = 2,3(5 + 1 \cdot 1,25)1,25 = 17,97 \text{ м}^3/\text{с} \approx 18 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как левая и правая часть приблизительно равны, отклонение меньше 5 %, то принимаем $h_{\text{доп}} = 1,25 \text{ м}$.

Размыву подлежит участок канала между глубинами $h_1 = 1,25 \text{ м}$ и $h_2 = 1,05$.

Рассчитаем длину участка, подлежащую укреплению, используя формулу Бахметева:

$$\frac{i \cdot l}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (1 - \bar{j}) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)],$$

где i – уклон дна, $i = 0,001$;

l – длина заданного участка канала;

h_0 – нормальная глубина (глубина равномерного движения при заданном расходе Q), $h_0 = 1,72 \text{ м}$.

η_2 и η_1 – «относительные» глубины, в конце и в начале данного участка:

$$\eta_2 = \frac{h_2}{h_0} = \frac{h_{\text{кр}}}{h_0} = \frac{1,05}{1,72} = 0,61;$$

$$\eta_1 = \frac{h_1}{h_0} = \frac{1,25}{1,72} = 0,73;$$

j – коэффициент, учитывающий изменение кинетической энергии на расчетном участке (или параметр кинетичности):

$$\bar{j} = \frac{\alpha \cdot i \cdot \bar{C}^2 \cdot \bar{B}}{g \cdot \bar{\chi}}.$$

Величины $\bar{C}$, $\bar{B}$, $\bar{\chi}$ соответствуют средней глубине

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{1,25 + 1,05}{2} = 1,15 \text{ м.}$$

$\bar{B} = b + 2m\bar{h} = 5 + 2 \cdot 1 \cdot 1,15 = 7,3 \text{ м}$ – средняя ширина русла поверху.

$\bar{\chi} = b + 2\bar{h}\sqrt{1+m^2} = 5 + 2 \cdot 1,15\sqrt{1+1^2} = 8,3 \text{ м}$ – средний смоченный периметр русла.

$\bar{\omega} = (b + m\bar{h})\bar{h} = (5 + 1 \cdot 1,15)1,15 = 7,07 \text{ м}^2$ – средняя площадь.

$\bar{R} = \frac{\bar{\omega}}{\bar{\chi}} = \frac{7,07}{8,3} = 0,85 \text{ м}$ – средний гидравлический радиус.

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 0,85^{1,5\sqrt{0,0225}} = 42,85 \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

$$\bar{j} = \frac{1,1 \cdot 0,001 \cdot 42,85^2 \cdot 7,3}{9,81 \cdot 8,3} = 0,181.$$

$\varphi(\eta_2)$, $\varphi(\eta_1)$ – функции «относительной» глубины, числовые значения берутся в справочных таблицах (см. справочник Киселева) для предварительно подсчитанного гидравлического показателя русла

$$x = \frac{2 \lg \frac{K_1}{K_2}}{\lg \frac{h_1}{h_2}}.$$

Для определения параметра x вначале рассчитаем коэффициенты расхода K_1 и K_2 :

$$h_1 = 1,25 \text{ м}$$

$$\omega_1 = (b + mh_1)h_1 = (5 + 1 \cdot 1,25)1,25 = 7,8 \text{ м}^2.$$

$$\chi_1 = b + 2h_1\sqrt{1+m^2} = 5 + 2 \cdot 1,25\sqrt{1+1^2} = 8,54 \text{ м}.$$

$$R_1 = \frac{\omega_1}{\chi_1} = \frac{7,8}{8,54} = 0,913 \text{ м}.$$

$$C_1 = \frac{1}{n} R_1^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 0,913^{1,5\sqrt{0,0225}} = 43,54 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

$$K_1 = \omega_1 C_1 \sqrt{R_1} = 7,8 \cdot 43,54 \cdot \sqrt{0,913} = 324,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$h_2 = 1,05 \text{ м}$$

$$\omega_2 = (b + mh_2)h_2 = (5 + 1 \cdot 1,05)1,05 = 6,35 \text{ м}^2.$$

$$\chi_2 = b + 2h_2\sqrt{1+m^2} = 5 + 2 \cdot 1,05\sqrt{1+1^2} = 7,97 \text{ м}.$$

$$R_2 = \frac{\omega_2}{\chi_2} = \frac{6,35}{7,97} = 0,8 \text{ м}.$$

$$C_2 = \frac{1}{n} R_2^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,0225} 0,8^{1,5\sqrt{0,0225}} = 42,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

$$K_2 = \omega_2 C_2 \sqrt{R_2} = 6,35 \cdot 42,3 \cdot \sqrt{0,8} = 240,25 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По значениям K_1 , K_2 ; h_1 , определяем значения гидравлического показателя русла:

$$x = \frac{2 \lg \frac{324,5}{240,25}}{\lg \frac{1,25}{1,05}} = 3,45$$

Далее, используя математические таблицы (см. справочник Киселева), находим:

$$\varphi(\eta_1) \text{ при } x = 3,4: \eta_1 = 0,73 \rightarrow \varphi(\eta_1) = 0,802;$$

$$\varphi(\eta_1) \text{ при } x = 3,5: \eta_1 = 0,73 \rightarrow \varphi(\eta_1) = 0,797.$$

Интерполируя найденные величины, получим:

$$x = 3,45; \quad \varphi(\eta_1) = \frac{0,802 + 0,797}{2} = 0,8$$

$$\varphi(\eta_2) \text{ при } x = 3,4: \eta_2 = 0,61 \rightarrow \varphi(\eta_2) = 0,639;$$

$$\varphi(\eta_2) \text{ при } x = 3,5: \eta_2 = 0,61 \rightarrow \varphi(\eta_2) = 0,637.$$

Интерполируя найденные величины, получим:

$$x = 3,45; \quad \varphi(\eta_2) = \frac{0,639 + 0,637}{2} = 0,638.$$

Подставляем все найденные расчетные величины в уравнение Бахметева:

$$\frac{0,001 \cdot l_{\text{кр}}}{1,72} = 0,61 - 0,73 - (1 - 0,181)[0,638 - 0,8].$$

В результате получим длину крепления, равную:

$$l_{\text{кр}} = 21,8 \text{ м} = 22 \text{ м}.$$

Задача 3

Определить глубину в сжатом сечении за перепадом прямоугольного поперечного сечения и сопряженную с ней глубину по данным табл. 3.5. Значения расхода и других необходимых данных и характеристик потока следует взять из своего варианта.

Исходные данные:

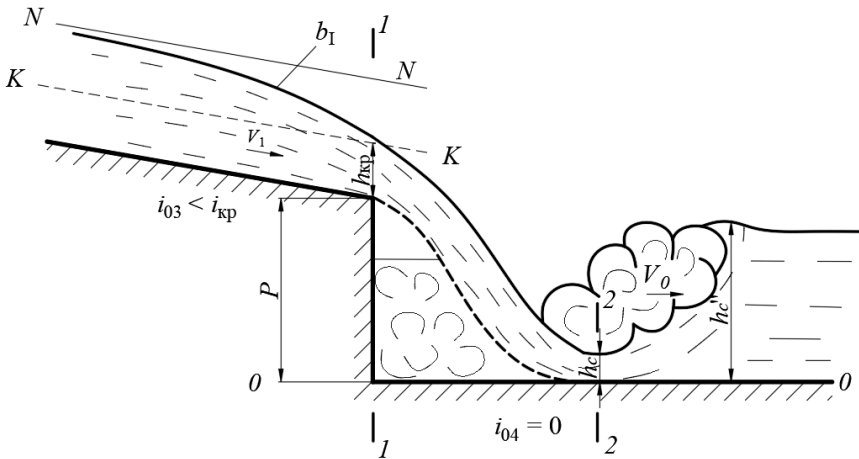
$$h_{\text{кр}} = 1,05 \text{ м}; Q = 18 \text{ м}^3/\text{с}; b = 5 \text{ м}; P = 1 \text{ м}.$$


Рис. 4.15

Решение

Сжатую глубину определим, решив уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 относительно плоскости сравнения 0-0 (см. рис. 4.15).

Не всегда глубина в сечении $l-l$ равна $h_{кр}$. Мы упростим решение, приняв $h_1 = h_{кр}$.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{\text{tp}},$$

где $z_1 = P$; $z_2 = 0$; $V_1 = V_{кр}$; $V_2 = V_c$;

$$\frac{P_1}{\rho g} = h_{кр}; \quad \frac{P_2}{\rho g} = h_c;$$

$$h_{тр} = h_m = \zeta \frac{V_c^2}{2g} - \text{локальные потери при падении струи.}$$

$$P + h_{кр} + \frac{\alpha V_{кр}^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha V_c^2}{2g} + \zeta \frac{V_c^2}{2g},$$

где $V_c = \frac{Q}{\omega_c} = \frac{Q}{bh_c}$ – скорость в сжатом сечении (прямоугольное сечение канала).

Введем понятие удельного расхода

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{18}{5} = 3,6 \text{ м/с}, \text{ тогда среднюю скорость в любом сечении}$$

уравнения Бернулли можно записать в виде:

$$V = \frac{q}{h}.$$

Далее определим среднюю скорость потока на участке i_{03} :

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{Q}{(b + mh_{кр})h_{кр}} = \frac{18}{(5 + 1 \cdot 1,05)1,05} = 2,83 \text{ м/с}$$

и упростим, записав уравнения Бернулли.

$$P + h_{кр} + \frac{\alpha V_{кр}^2}{2g} = E_1 - \text{полная удельная энергия сечения } I-I.$$

$$E_1 = P + h_{кр} + \frac{\alpha V_{кр}^2}{2g} = 1 + 1,05 + \frac{1,1 \cdot 2,83^2}{2 \cdot 9,81} = 2,5 \text{ м};$$

$$E_1 = h_c + \frac{\alpha q^2}{2gh_c^2} + \zeta \frac{q^2}{2gh_c^2};$$

$$E_1 - h_c = (\alpha + \zeta) \frac{q^2}{2gh_c^2}.$$

Из полученного уравнения Бернулли выразим значения сжатой глубины в виде формулы:

$$h_c = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(E_1 - h_c)}},$$

где $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}$ – коэффициент скорости.

Значения φ выбираем из справочника Киселева [1, стр. 138, табл. 9.10], $\varphi = 1 \div 0,97$ (истечение в атмосферу при свободном полете струи).

Примем $\varphi = 0,97$ при падении струи с уступа (стенки падения).

Сжатую глубину определим методом последовательного приближения.

В **1-ом приближении** пренебрегаем значением сжатой глубины h_c под знаком радикала:

$$h_{c1} = \frac{q}{\varphi \sqrt{2gE_1}} = \frac{3,6}{0,97 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,5}} = 0,53 \text{ м.}$$

Определим сжатую глубину во **2-ом приближении**, внося под знак радикала h_{c1} :

$$h_{c2} = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(E_1 - h_{c1})}} = \frac{3,6}{0,97 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (2,5 - 0,53)}} = 0,597 \text{ м.}$$

Определим сжатую глубину в **3-ем приближении**, внося под знак радикала h_{c2} :

$$h_{c3} = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(E_1 - h_{c2})}} = \frac{3,6}{0,97 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (2,5 - 0,597)}} = 0,607 \text{ м.}$$

Сравним два последних приближения: $h_{c2} = 0,597$ м и $h_{c3} = 0,607$ м.

Так как они отличаются $\frac{0,607 - 0,597}{0,607} 100 \% = 1,65 \% < 5 \%$, то при-

ближения завершаем.

Окончательно принимаем $h_c = 0,607 = 0,61$ м.

Далее принимаем h_c за первую сопряженную глубину совершенного гидравлического прыжка $h_c = h' = 0,61$ м и определяем **вторую сопряженную глубину** по формуле:

$$h_c'' = 0,5 h_c \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{кр}}{h_c} \right)^3} - 1 \right].$$

Предварительно уточняем значение критической глубины для русла прямоугольного сечения:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 3,6^2}{9,81}} = 1,13 \text{ м;}$$

$$h_c'' = 0,5 \cdot 0,61 \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{1,13}{0,61} \right)^3} - 1 \right] = 1,89 \text{ м.}$$

Задача 4

Рассчитать длину ступени перепада и высоту водобойной стенки
Исходные данные из табл. 3.6. Поперечное сечение ступени перепада считать прямоугольным (рис. 4.16).

Исходные данные:

$h_{кр} = 1,05$ м; $Q = 18 \text{ м}^3/\text{с}$; $b = 5$ м; $P = 1$ м.

$h_c = 0,61$ м; $h_c'' = 1,89$ м.

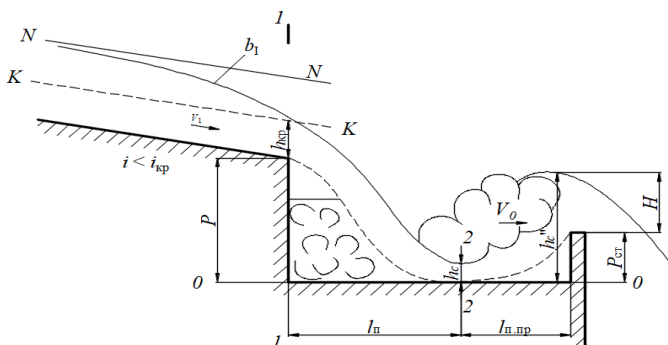


Рис. 4.16

Решение

Определим геометрические размеры гасителя энергии водного потока в виде перепада колодезного типа. Рассчитаем основные размеры первой ступени перепада, к которым относятся:

- 1) высота водобойной стенки $P_{ст}$;
- 2) длина ступени $l_{ст}$.

Высоту водобойной стенки рассчитаем, проанализировав расчетную схему (рис. 4.16), используя следующую формулу:

$$P_{ст} = \sigma h_c'' - H,$$

где σ – корректив количества движения при изменении скорости потока воды, проходящего над водобойной стенкой;

$h_c'' = 1,89\text{ м}$ – вторая сопряженная глубина за подпертым прыжком;

H – статический напор над водобойной стенкой.

Водобойная стенка представляет собой водослив практического профиля прямоугольного сечения. Этот водослив не подтоплен, для него коэффициент подтопления $\sigma_n = 1$.

Для расчета H воспользуемся формулой неподтопленного водослива, приняв коэффициент расхода $m = 0,40 \div 0,42$ для прямоугольного водослива:

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}.$$

Используя понятие $q = \frac{Q}{b}$ – удельного расхода запишем формулу водослива в следующем виде:

$$q = m\sqrt{2g}H_0^{3/2}.$$

Отсюда выразим полный напор H_0 над водобойной стенкой

$$H_0 = \left(\frac{q}{m\sqrt{2g}} \right)^{2/3} = \left(\frac{3,6}{0,41\sqrt{2 \cdot 9,81}} \right)^{2/3} = 1,58 \text{ м}$$

и далее рассчитаем статический напор из формулы полного напора:

$$H = H_0 - \frac{\alpha V_0^2}{2g},$$

где V_0 – скорость подхода потока к водобойной стенке, определим из уравнения расхода:

$$V_0 = \frac{Q}{\omega_0} = \frac{Q}{bh_c''} = \frac{q}{h_c''} = \frac{3,6}{1,89} = 1,9 \text{ м/с};$$

$$H = H_0 - \frac{\alpha V_0^2}{2g} = 1,58 - \frac{1,1 \cdot 1,9^2}{2 \cdot 9,81} = 1,38 \text{ м}.$$

Тогда высота водобойной стенки $P_{\text{ст}}$ будет равна:

$$P_{\text{ст}} = \sigma h_c'' - H = 1,1 \cdot 1,89 - 1,38 = 0,7 \text{ м}.$$

Принимаем $P_{\text{ст}} = 0,7 \text{ м}$.

Определим длину ступени перепада:

$$l_{\text{ст}} = l_{\text{п}} + l_{\text{п. пр}},$$

где $l_{\text{п}}$ – длина полета струи, определяемая по эмпирической формуле при падении струи с уступа:

$$l_{\text{п}} = 0,32V_1\sqrt{2P + h_1},$$

где $V_1 = 2,83$ м/с – скорость в сечении $I-I$ (см. расчетную схему);

$h_1 = h_{\text{кр}} = 1,05$ м – глубина в 1-ом сечении расчетной схемы, т. е. в месте падения струи с уступа.

$$l_{\text{п}} = 0,32 \cdot 2,83 \sqrt{2 \cdot 1 + 1,05} = 1,6 \text{ м.}$$

$l_{\text{п. пр}}$ – длина подпертого прыжка на ступени перепада:

$$l_{\text{п. пр}} = \beta l_{\text{пр}},$$

где $\beta = 0,7 \div 0,8$ – коэффициент, учитывающий сжатие струи потока в подпертом гидравлическом прыжке. В расчетах примем $\beta = 0,8$.

Длину отогнанного совершенного прыжка $l_{\text{пр}}$ определим по формуле Павловского:

$$l_{\text{пр}} = 2,5(1,9h_c'' - h_c) = 2,5(1,9 \cdot 1,89 - 0,61) = 7,45 \text{ м.}$$

Тогда длина подпертого совершенного гидравлического прыжка будет равна:

$$l_{\text{п. пр}} = \beta l_{\text{пр}} = 0,8 \cdot 7,45 = 5,96 \text{ м} \approx 6 \text{ м.}$$

В результате длина ступени перепада получается равной:

$$l_{\text{ст}} = l_{\text{п}} + l_{\text{п. пр}} = 1,6 + 6 = 7,6 \text{ м.}$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. – М. : Энергия, 1972. – 312 с.
2. Сборник задач по гидравлике / В. А. Большаков [и др.]; под ред. В. А. Большакова. – Киев : Вища школа, 1979. – 337 с.
3. Примеры расчетов по гидравлике / А. Д. Альтшуль [и др.]; под ред. А. Д. Альтшуля. – М. : Стройиздат, 1976. – 254 с.
4. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Б. Б. Некрасов [и др.]; под ред. Б. Б. Некрасова. – Минск : Вышэйшая школа, 1985. – 382 с.

Учебное издание

КАЧАНОВ Игорь Владимирович
ЩЕРБАКОВА Мария Константиновна
ШАТАЛОВ Игорь Михайлович и др.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Практикум

для студентов специальности

7-07-0732-02 «Инженерные сети, оборудование зданий и сооружений»
профилизаций «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»
и «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

Редактор *К. С. Мельникова*
Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать 19.06.2025. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 2,24. Тираж 100. Заказ 694.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.