

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Промышленной теплоэнергетики

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор

_____ Е.И. Луковникова

« _____ » _____ 201__ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ГИДРОГАЗОДИНАМИКА**

Б1.Б.21

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Промышленная теплоэнергетика

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	4
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	5
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	11
4.3 Лабораторные работы.....	53
4.4 Семинары / практические занятия.....	53
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	53
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	54
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	55
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	55
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	56
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	56
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ..	56
9.2. Методические указания для обучающихся по выполнению контрольной работы.	67
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	70
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	70
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	71
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	77
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	78

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к научно-исследовательскому и производственно-технологическому видам профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Ознакомление студентов с местом и ролью гидрогазодинамики в современном мире, формировать личность студента путём развития их интеллектуальных способностей, в частности логическому мышлению; обучение основным гидрогазодинамическим методам, применяемым в анализе и моделировании типовых процессов и в инженерии.

Задачи дисциплины

В задачи изучения дисциплины входят понимание физической сущности явлений, возникающих в покоящихся и движущихся однородных, двухфазных и двухкомпонентных жидких средах; усвоение формальных уравнений, описывающих эти явления; овладение методами использования уравнений для практических задач энергетики.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-1	способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий	Знать: - Основные физические свойства жидкостей и газов, общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов, особенности физического и математического моделирования одномерных и трехмерных, дозвуковых и сверхзвуковых, ламинарных и турбулентных течений идеальной и реальной несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Уметь: - Рассчитывать гидродинамические параметры потока жидкости (газа) при внешнем обтекании тел и течения в каналах (трубах), проточных частях гидро-газодинамических машин, проводить гидравлический расчет трубопроводов. Владеть: - Методиками проведения типовых гидродинамических расчетов гидромеханического оборудования и трубопроводов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.21 «Гидрогазодинамика» относится к базовой части.

Дисциплина «Гидрогазодинамика» базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин основных общеобразовательных программ, как: математики, физики.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Гидрогазодинамика представляет основу для изучения дисциплин: «Технологические энергоносители предприятий», «Техническая термодинамика», «Тепломассообмен».

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

- для набора 2014-2016 года

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	1	2	216	72	36	18	18	108	-	Экзамен
Заочная	2	-	216	28	10	10	8	179	к	Экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	1	-	144	20	8	6	6	115	к	Экзамен
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- для набора 2017 года

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	1	2	216	72	36	18	18	108	-	Экзамен
Заочная	2	-	216	28	10	10	8	179	к	Экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	1	-	144	22	8	8	6	113	к	Экзамен
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- для набора 2018 года

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	1	2	216	72	36	18	18	108	-	Экзамен
Заочная	2	-	216	28	10	10	8	179	-	Экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	1	-	144	22	8	8	6	113	-	Экзамен
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			2
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	72	13	72
Лекции (Лк)	36	10	36
Лабораторные работы (ЛР)	18	2	18
Практические занятия (ПЗ)	18	1	18
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	108	-	108
Подготовка к лабораторным работам	27	-	27
Подготовка к практическим занятиям	27	-	27
Подготовка к экзамену в течении семестра	54	-	54
III. Промежуточная аттестация экзамен	36	-	36
Общая трудоемкость дисциплины час. зач. ед.	216		216
	6		6

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся*
			лекции	лабораторные занятия	практические занятия	
1	2	3	4	6	6	7
1.	Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов	28	5	5	2	15
1.1.	Предмет и задачи гидрогазодинамики	4	1	-	-	3
1.2.	Основные свойства жидкостей и газов	12	2	1	2	6
1.3.	Молекулярная структура и особенности жидкого и газообразного состояний	12	2	4	-	6
2.	Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов	28	6	-	4	18
2.1.	Силы, действующие в жидкости. Основное уравнение гидростатики. Силы давления жидкости, действующие на плоские и криволинейные стенки.	6	1	-	2	3
2.2.	Гипотеза сплошности среды	4	1	-	-	3
2.3.	Свойства напряжений поверхностных сил	8	2	-	-	6
2.4.	Основные понятия о движении жидкости	10	2	-	2	6
3.	Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.	18	4	-	-	12
3.1.	Понятия линии тока, траектории частицы, трубки тока, установившегося и неустановившегося движения	4	1	-	-	3
3.2.	Подобие гидромеханических процессов. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения	6	1	-	-	3
3.3.	Одномерные потоки жидкостей и газов. Уравнение Даниила-Бернулли	8	2	-	-	6
4.	Динамика вязкой жидкости	36	8	-	4	24
4.1.	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения	12	2	-	4	6

	Бернулли					
4.2.	Теория пограничного слоя. Уравнение пограничного слоя в дифференциальной форме	8	2	-	-	6
4.3.	Уравнение пограничного слоя в интегральной форме	4	1	-	-	3
4.4.	Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя	4	1	-	-	3
4.5.	Турбулентный пограничный слой	4	1	-	-	3
4.6.	Распределение скоростей по сечению потока	4	1	-	-	3
5.	Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления	54	9	13	8	27
5.1.	Характеристики потерь напора. Измерение скорости потока	8	2	-	-	6
5.2.	Определение расхода в каналах произвольных сечений. Формула Дарси, Пуазейля и др.	10	1	4	2	3
5.3.	Гидравлический расчет трубопроводов	6	1	-	2	3
5.4.	Местные потери напора в трубах. Потери напора при внезапных изменениях сечения трубопровода	16	2	9	2	6
5.5.	Потери напора при постепенных изменениях сечения трубопровода	10	2	-	2	6
5.6.	Потери при малых числах Рейнольдса. Взаимное влияние местных сопротивлений. Кавитация в местных сопротивлениях	4	1	-	-	3
6.	Течение жидкости и идеального газа	16	4	-	-	12
6.1.	Определяющие параметры газовых потоков. Скорость звука	8	2	-	-	6
6.2.	Скачки уплотнения	8	2	-	-	6
	ИТОГО	180	36	18	18	108

- для заочной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся*
			лекции	лабораторные занятия	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов	27,75	1,25	4	1	21,5
1.1.	Предмет и задачи гидрогазодинамики	4,75	0,25	-	-	4,5
1.2.	Основные свойства жидкостей и газов	9,5	0,5	-	1	8

1.3.	Молекулярная структура и особенности жидкого и газообразного состояний	13,5	0,5	4	-	9
2.	Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов	35,25	1,75	-	2	31,5
2.1.	Силы, действующие в жидкости. Основное уравнение гидростатики. Силы давления жидкости, действующие на плоские и криволинейные стенки.	5,75	0,25	-	1	4,5
2.2.	Гипотеза сплошности среды	9,5	0,5	-	-	9
2.3.	Свойства напряжений поверхностных сил	9,5	0,5	-	-	9
2.4.	Основные понятия о движении жидкости	10,5	0,5	-	1	9
3.	Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.	19	1	-	-	18
3.1.	Понятия линии тока, траектории частицы, трубки тока, установившегося и неустановившегося движения	4,75	0,25	-	-	4,5
3.2.	Подобие гидромеханических процессов. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения	4,75	0,25	-	-	4,5
3.3.	Одномерные потоки жидкостей и газов. Уравнение Даниила-Бернулли	9,5	0,5	-	-	9
4.	Динамика вязкой жидкости	23,75	2,25	-	1	20,5
4.1.	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения Бернулли	10,5	0,5	-	1	9
4.2.	Теория пограничного слоя. Уравнение пограничного слоя в дифференциальной форме	9,5	0,5	-	-	9
4.3.	Уравнение пограничного слоя в интегральной форме	9,5	0,5	-	-	9
4.4.	Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя	4,75	0,25	-	-	4,5
4.5.	Турбулентный пограничный слой	4,75	0,25	-	-	4,5
4.6.	Распределение скоростей по сечению потока	4,75	0,25	-	-	4,5
5.	Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления	62,25	2,75	6	4	49,5
5.1.	Характеристики потерь напора. Измерение скорости потока	9,5	0,5	-	-	9
5.2.	Определение расхода в каналах произвольных сечений. Формула Дарси, Пуазейля и др.	12,5	0,5	2	1	9
5.3.	Гидравлический расчет трубопроводов	10,5	0,5	-	1	9

5.4.	Местные потери напора в трубах. Потери напора при внезапных изменениях сечения трубопровода	14,5	0,5	4	1	9
5.5.	Потери напора при постепенных изменениях сечения трубопровода	10,5	0,5	-	1	9
5.6.	Потери при малых числах Рейнольдса. Взаимное влияние местных сопротивлений. Кавитация в местных сопротивлениях	9,25	0,25	-	-	9
6.	Течение жидкости и идеального газа	19	1	-	-	18
6.1.	Определяющие параметры газовых потоков. Скорость звука	9,5	0,5	-	-	9
6.2.	Скачки уплотнения	9,5	0,5	-	-	9
	ИТОГО	207	10	10	8	179

- для заочной формы обучения (ускоренное обучение):

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся*
			лекции	лабораторные занятия	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов	18,75	1,25	2	1	14,5
1.1.	Предмет и задачи гидрогазодинамики	4,25	0,25	-	-	4
1.2.	Основные свойства жидкостей и газов	6,5	0,5	-	1	5
1.3.	Молекулярная структура и особенности жидкого и газообразного состояний	8	0,5	2	-	5,5
2.	Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов	22	1,5	-	2	18,5
2.1.	Силы, действующие в жидкости. Основное уравнение гидростатики. Силы давления жидкости, действующие на плоские и криволинейные стенки.	4,25	0,25	-	1	3
2.2.	Гипотеза сплошности среды	5,5	0,5	-	-	5
2.3.	Свойства напряжений поверхностных сил	5,5	0,5	-	-	5
2.4.	Основные понятия о движении жидкости	6,75	0,25	-	1	5,5
3.	Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.	12,5	1	-	-	11,5
3.1.	Понятия линии тока, траектории частицы, трубки тока, установившегося и	3,25	0,25	-	-	3

	неустановившегося движения					
3.2.	Подобие гидромеханических процессов. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения	3,25	0,25	-	-	3
3.3.	Одномерные потоки жидкостей и газов. Уравнение Даниила-Бернули	6	0,5	-	-	5,5
4.	Динамика вязкой жидкости	27,5	2	-	1	24,5
4.1.	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения Бернулли	7	0,5	-	1	5,5
4.2.	Теория пограничного слоя. Уравнение пограничного слоя в дифференциальной форме	5,5	0,5	-	-	5
4.3.	Уравнение пограничного слоя в интегральной форме	5,25	0,25	-	-	5
4.4.	Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя	3,25	0,25	-	-	3
4.5.	Турбулентный пограничный слой	3,25	0,25	-	-	3
4.6.	Распределение скоростей по сечению потока	3,25	0,25	-	-	3
5.	Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления	41,75	1,75	6	2	32
5.1.	Характеристики потерь напора. Измерение скорости потока	6	0,5	-	-	5,5
5.2.	Определение расхода в каналах произвольных сечений. Формула Дарси, Пуазейля и др.	9,75	0,25	3	1	5,5
5.3.	Гидравлический расчет трубопроводов	7,25	0,25	-	1	6
5.4.	Местные потери напора в трубах. Потери напора при внезапных изменениях сечения трубопровода	9,25	0,25	3	-	6
5.5.	Потери напора при постепенных изменениях сечения трубопровода	6,25	0,25	-	-	6
5.6.	Потери при малых числах Рейнольдса. Взаимное влияние местных сопротивлений. Кавитация в местных сопротивлениях	3,25	0,25	-	-	3
6.	Течение жидкости и идеального газа	12,5	0,5	-	-	12
6.1.	Определяющие параметры газовых потоков. Скорость звука	6,25	0,25	-	-	6
6.2.	Скачки уплотнения	6,25	0,25	-	-	6
	ИТОГО	135	8	8	6	113

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1. Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов

Тема 1.1. Предмет и задачи гидрогазодинамики

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-прессконференция (1 час).

Гидрогазодинамикой называют один из разделов механики – механику жидкостей и газов.

Механика жидкости и газа включает:

- кинематику жидкости, в которой изучают изменение формы, размеров и пространственного расположения жидких объёмов (отвлекаясь от причин их вызвавших);
- гидростатику, в которой изучают условия равновесия жидкости в силовом поле;
- динамику, в которой изучают законы движения жидкости.

Динамика, в свою очередь, подразделяется на гидродинамику – динамику несжимаемой жидкости и газодинамику – динамику сжимаемой жидкости.

Жидкостью в теории гидродинамики называют среду, действуя на которую малые силы могут вызывать конечные деформации. В противоположность этому твёрдыми называют тела, деформация которых мала при приложении малой силы.

Гидрогазодинамика изучает движение ньютоновских жидкостей. При изучении движения жидкостей и газов последние часто рассматриваются как жидкости с присущими им некоторыми особыми свойствами.

При изучении закономерностей движения жидкостей и газов последние рассматриваются как сплошные (непрерывные, неразрывные) среды, несмотря на то что размеры молекул (особенно газов) малы в сравнении с расстояниями между ними. Определяется это тем обстоятельством, что размеры объектов, изучаемых в газодинамике, и даже таких тонких измерительных инструментов, как нить термоанемометра, велики в сравнении с длиной свободного пробега молекул.

Таким образом, взаимодействие измерительного прибора происходит с большим числом молекул, и прибор определяет осреднённые характеристики течения. Другими словами, принимаемая гипотеза сплошной среды справедлива до тех пор, пока длина свободного пробега молекул мала в сравнении с размером измерительного инструмента. В разреженных газах указанное условие не выполняется, и поэтому законы газодинамики оказываются неприменимыми.

Задачей гидродинамики является изучение полей скоростей и давлений, а также напряжений, возникающих при обтекании жидкостями тел или движение жидкости в каналах. Знание соответствующих закономерностей позволяет найти оптимальные формы тел, обеспечивающие минимальное сопротивление или заданное воздействие на поток. Это особенно важно при разработке насосов и турбин, а также различных аппаратов, в которых требуется создание определённого поля скоростей, обеспечивающего максимальную интенсивность процессов горения, перемешивания или требуемой химической реакции.

Тема 1.2. Основные свойства жидкостей и газов

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 час.).

Жидкостью называется физическое тело, оказывающее сильное сопротивление изменению своего объема и слабое сопротивление изменению своей формы.

Основные физические свойства жидкости: плотность, удельный объем, сжимаемость и вязкость.

Плотностью ρ , кг/м³, называется масса однородной жидкости, содержащейся в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3$$

m – масса жидкости, кг,
 V – объем жидкости, м³.

Плотность газов определяется из уравнения состояния:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

P – давление, Па,
 R – удельная газовая постоянная, Дж/кг К,
 T – термодинамическая температура, К.

Сжимаемость – свойство жидкости (газа) изменять свой объем под воздействием внешних сил. Сжимаемость оценивается коэффициентом изотермического объемного сжатия:

$$\beta_V = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta P}, \text{ Па}^{-1}$$

V_0 - начальный объем, м³
 ΔV – изменение объема, м³
 ΔP - изменение давления, Па.

Величина, обратная коэффициенту сжатия называется модулем упругости жидкости:

$$E = \frac{1}{\beta_V}$$

Для воды при нормальных условиях $E = 2 \cdot 10^9$ Па.

Тепловое расширение – свойство жидкости изменять объем при нагревании, характеризуется коэффициентом теплового расширения:

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Δt - изменение температуры, $^\circ\text{C}$

Вязкость жидкостей.

Сопротивление жидкостей изменению своей формы характеризуется их динамической вязкостью (внутренним трением). Сила внутреннего трения в жидкости на единицу поверхности определяется по закону Ньютона.

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}$$

$\frac{du}{dy}$ – градиент скорости в направлении, перпендикулярном течению.

μ - абсолютная или динамическая вязкость.

Величина τ положительна, поэтому в формуле 1.20 следует ставить + или – в зависимости от знака $\frac{du}{dy}$.

Динамическая вязкость измеряется в Пуазах (П) или в Па · сек.

1 Пуаз = 0,1 Па · сек

Значение динамической вязкости зависит от рода жидкости и её температуры.

Отношение динамической вязкости жидкости от её плотности называют относительной или кинематической вязкостью.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Кинематическая вязкость измеряется в стоксах (Ст) или м²/сек.

$$1 \text{ Ст} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек.}$$

Вязкость жидкостей практически не зависит от давления, но значительно уменьшается с увеличением температуры.

На практике вязкость жидкостей определяется вискозиметрами и чаще всего выражается в градусах Энглера (°Е) – так называется условная вязкость.

Для перехода от условной вязкости к кинематической служит эмпирическая формула Убеллоде:

$$\nu = \left(0,0731 \cdot \text{°Е} - \frac{0,0631}{\text{°Е}}\right) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек}$$

Или теоретическая формула Альтшуля:

$$\text{°Е} = 24\nu \left[231g \frac{\sqrt{\nu^2 + 0,0294} - \nu}{\sqrt{\nu^2 + 0,0166} - \nu} + \frac{1}{\nu} (\sqrt{\nu^2 + 0,0294} - \sqrt{\nu^2 + 0,0166}) \right] \quad (1.23)$$

Поверхностное натяжение жидкостей.

(сила сцепления с поверхностью.)

Поверхностное натяжение жидкости обуславливается силами взаимного притяжения молекул поверхностного слоя, стремящихся сократить свободную поверхность жидкости.

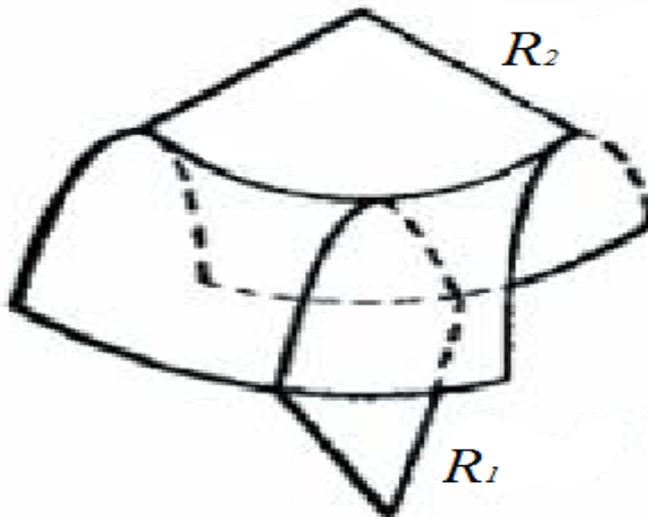
(капли снизу листика, пузыри и т.д.)

Вследствие поверхностного натяжения жидкость, имеющая криволинейную поверхность испытывает дополнительное усилие, увеличивающее или уменьшающее давление жидкости на величину:

$$P_{\text{пов}} = \delta \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - \text{формула Лапласа}$$

δ – поверхностное натяжение, Н/м.

r_1, r_2 – главные радиусы кривизны рассматриваемого элемента поверхности.



Давление при выпуклой поверхности жидкости увеличивается. А при вогнутой уменьшается.

При температуре 20°C поверхностное натяжение для воды, соприкасающееся с воздухом равно:

$$\delta = 0,0726 \text{ Н/м}$$

Зависимость поверхностного натяжения от температуры имеет вид:

$$\delta(\text{дельта}) = \delta_0 - \beta \Delta t$$

δ_0 – поверхностное натяжение при соприкосновении с воздухом при $t=0^\circ\text{C}$.

β – температурный коэффициент поверхностного натяжения;

$$\beta = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м} \cdot \text{К}$$

Особенно сильно поверхностное натяжение проявляется в трубках весьма малого диаметра (капиллярных), для которых формула 1.24 принимает вид:

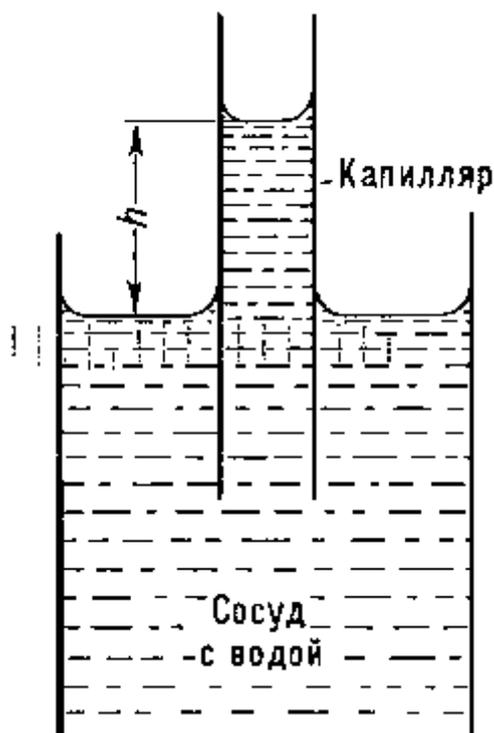
$$P_{\text{пов}} = 2\delta/r$$

Или

$$h_{\text{пов}} = \frac{2\delta}{\rho g r}$$

r – радиус трубки, мм;

h – высота капиллярного поднятия.



Тема 1.3. Молекулярная структура и особенности жидкого и газообразного состояний.

Материальные тела могут находиться в одном из трёх агрегатных состояний: твердом, жидком и газообразном. Каждое из этих состояний характеризуется специфическими свойствами, которые определяются особенностями их атомно-молекулярной структуры, непосредственно связанной с силами взаимодействия между частицами. Этими силами являются силы притяжения и отталкивания, действующие одновременно и зависящие от расстояния r между частицами.

Характер сил межмолекулярного взаимодействия можно качественно выяснить на примере двух изолированных молекул.

(после рисунка, описание) При некотором расстоянии r_0 сила взаимодействия между ними равна 0, т.е. сила отталкивания и притяжения уравниваются. При возрастании r результирующей этих сил является сила притяжения, которая сначала возрастает, достигая максимальной величины на некотором расстоянии r_m , а затем уменьшается, приближаясь к 0 (рисунок а). При межмолекулярных расстояниях $r < r_0$ результирующей будет сила отталкивания, которая быстро растёт с уменьшением r .

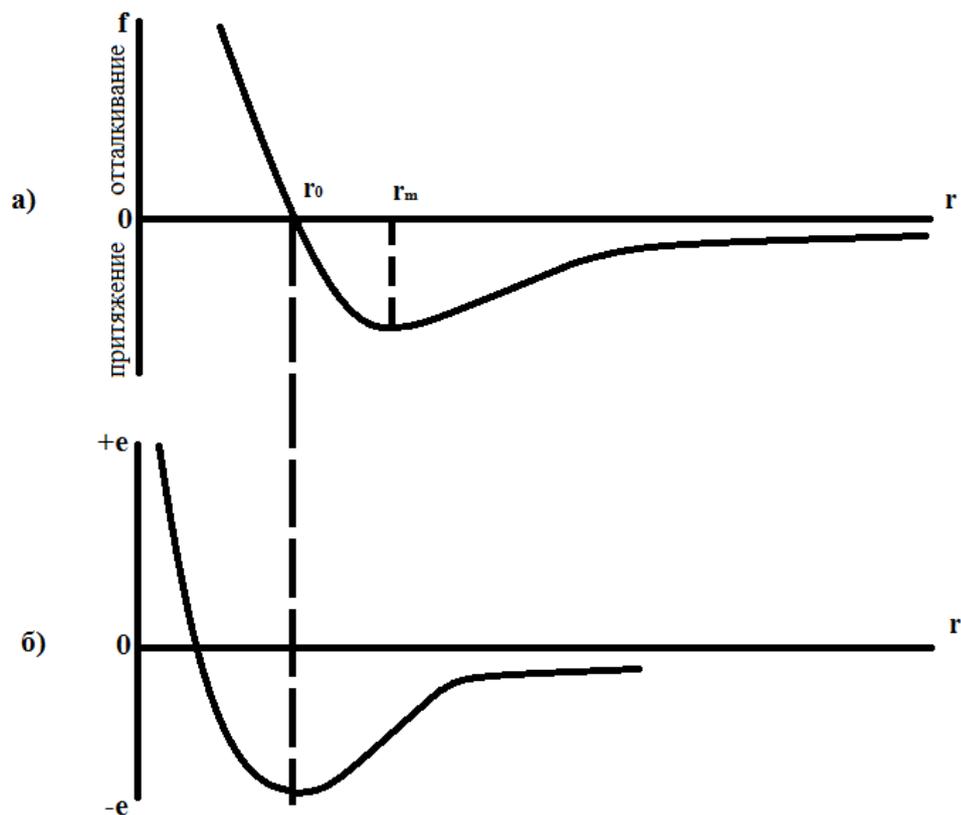


Рисунок 1 – Зависимость потенциальной энергии молекул и силы взаимодействия между молекулами от расстояния между их центрами.

Молекула в поле этих сил обладает потенциальной энергией $e(r)$ (рисунок б), которая связана с величиной силы $f(r)$ и изменением межмолекулярного расстояния dr дифференциальным соотношением:

$$de = -f(r)dr$$

Отсюда следует, что в точке $r=r_0$, где $f(r_0)=0$ потенциальная энергия достигает минимума, т.к. $\frac{de}{dr} = 0$.

В твёрдых (кристаллических телах) атомы или другие частицы располагаются на расстояниях порядка r_0 , соответствующих минимуму потенциальной энергии, в правильном порядке и образуют кристаллическую решётку. Молекулярные движения, которыми обусловлена тепловая энергия тела, представляют собой колебания частиц около устойчивых центров. Потенциальная энергия молекулярных связей по абсолютной величине превосходит среднюю кинетическую энергию теплового движения. Устойчивость порядка расположения центров колебаний частиц в твердых телах обуславливают макроскопические свойства этих тел, а именно устойчивое сохранение формы и объема.

В газах при нормальных условиях межмолекулярное расстояние больше $10 r_0$, что соответствует слабым силам притяжения и незначительной по величине потенциальной энергии. Каждая молекула газа при движении практически не испытывает действие связей с другими молекулами, что позволяет пренебрегать межмолекулярными силами.

Модель газа, в которой полностью игнорируются силы притяжения между молекулами, называется совершенным газом. Полагают, что молекулы совершенного газа движутся равномерно и прямолинейно до столкновения. Под столкновением понимают резкое изменение направления движения молекул под действием сил отталкивания, возникающих при сближении молекул.

Свободное беспорядочное движение молекул газа обуславливает его расширение во все стороны, благодаря чему газ не имеет определенного объема и собственной формы, а занимает объем и форму сосуда, в котором он заключён.

Стенки сосудов, содержащих газ, испытывают удары беспорядочно движущихся молекул. Вследствие этих ударов газ развивает силовое воздействие на стенки.

Исходя из описанного выше представления о движении молекул газа можно подсчитать, что для совершенного газа давление P , т.е. сила, приходящаяся на единицу площади стенки, определяется соотношением:

$$P = 2/3n \frac{mc^2}{2}$$

n – число молекул в единице объема газа;

m – масса 1 молекулы;

c^2 - среднее значение квадрата скорости движения молекул газа.

Произведение $m \cdot n$ представляет собой массу единицы объема газа и называется его плотностью ρ .

Абсолютная температура T идеального газа определяется формулой:

$$kT = 2/3 \frac{mc^2}{2}$$

k - постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/градус)

Соотношения 2.1 и 2.2 называют основными уравнениями кинетической теории газов. Давление, плотность и абсолютная температура являются величинами, характеризующими состояние молекулярного движения газов. Эти величины называются термодинамическими параметрами состояния среды и входят в систему уравнений макроскопического движения газа.

Если к граничной поверхности некоторого объема газа приложена произвольная сдвигающая сила, то движение молекул газа, оставаясь хаотическим, приобретает преимущественную направленность. Таким образом, возникает течение газа в направлении действия силы и происходит деформация его объема. Деформация непрерывно возрастает в течении времени действия силы. Любая малая сдвигающая сила при длительном воздействии может вызвать значительную деформацию. Свойство среды неограниченно деформироваться под действием постоянной силы называют текучестью. Таким образом, газы обладают свойством текучести.

Это свойство не означает отсутствие сопротивления сдвигу в среде. Несмотря на текучесть, газы сопротивляются сдвигающим усилиям. Сопротивление проявляется в том, что данной силой можно обусловить только определённую скорость деформации и для её увеличения нужно увеличить силу.

В газах вязкость обусловлена хаотическим движением молекул.

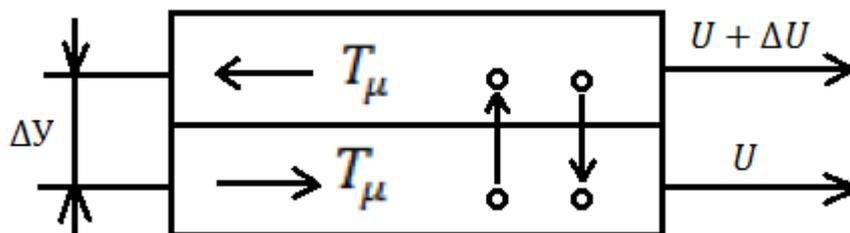


Рисунок 2 – Хаотическое движение молекул.

При относительном смещении слоев газа со скоростями U и $U + \Delta U$ благодаря тепловому движению молекул происходит их перемещение из слоя в слой и соответствующий перенос количества движения. Это приводит к выравниванию скоростей слоёв, обусловленному появлением силы T_μ , препятствующей их относительному сдвигу.

Для поддержания движения слоев с разностью скоростей ΔU необходимо приложить внешнюю силу, преодолевающую силу сопротивления – сила вязкости или сила внутреннего трения.

Сила вязкости, приходящаяся на единицу площади поверхности раздела двух слоев определяется из соотношения:

$$\tau_{\mu} = \frac{T_{\mu}}{S}$$

T_{μ} - сила внутреннего трения, действующая на площади S соприкосновения слоёв.

Для совершенного газа величину касательного напряжения τ_{μ} можно вычислить, применив теорему импульсов к массе молекул, пересекающих единичную площадь на плоскости раздела слоёв.

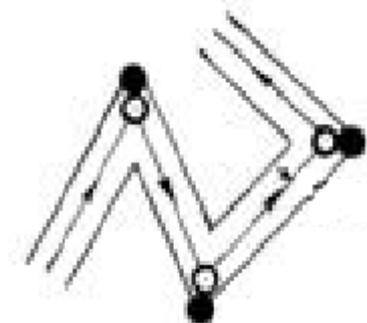
$$\tau_{\mu} = \frac{1}{3} mncl \left| \frac{\Delta U}{\Delta y} \right|$$

m – масса молекулы;

n – число молекул в единице объема;

c – среднее значение абсолютной скорости молекул;

l – средняя длина свободного пробега молекул;



$\left| \frac{\Delta U}{\Delta y} \right|$ - величина изменения скорости на единице длины вдоль оси y .

Соотношение 2.4 можно переписать в виде:

$$\tau_{\mu} = \mu \left| \frac{\Delta U}{\Delta y} \right|$$

$$\mu = \frac{1}{3} mncl = \frac{1}{3} \rho cl - \text{динамический коэффициент вязкости газа.}$$

Поскольку при повышении температуры скорость c возрастает, динамический коэффициент вязкости должен также возрастать.

При постоянной температуре плотность ρ газов изменяется прямо пропорционально давлению, а длина свободного пробега молекул обратно пропорционально.

Среднее значение скорости зависит только от температуры, поэтому коэффициент вязкости для газов не должен зависеть от давления.

Жидкость по молекулярному строению занимает промежуточное положение между твердыми телами и газами. Считается, что молекулы жидкостей расположены также плотно, как и молекулы твердых тел. Об этом свидетельствует равенство плотностей твердых тел и их расплавов. Поэтому нужно считать, что молекулярные силы и потенциальная энергия молекул жидкости имеют тот же порядок, что и для твердых тел. Жидкости, как и твердые тела, устойчиво сохраняют величину занимаемого им объема.

Характер теплового движения молекул в жидкостях сложнее, чем в твердых телах. Тепловые движения молекул жидкости представляют нерегулярные колебания относительно некоторых центров. Кинетическая энергия колебаний отдельных молекул в какие то моменты может оказаться достаточной для преодоления межмолекулярных связей. Тогда эти молекулы получают возможность скачком перейти в окружение других молекул поменяв центр колебаний. Таким образом каждая молекула некоторое время находится в упорядоченном строю, далее совершив перескок молекула оказывается среди других молекул, выстроенных уже другим образом. Скачки молекул совершаются хаотически, новое место никак не предопределено прежним. Большие количества скачков молекул

обеспечивают диффузию молекул и текучесть жидкости. Если к границе жидкости приложить некую силу, скачки молекул обретут направление движения силы и возникнет направление течения жидкости.

Для большинства жидкостей величина силы при этом может быть любой сколько угодно малой. Однако существуют жидкости, для которых требуется некоторое начальное усилие для осуществления сдвига. Такие вещества называют пластичными. Если усилие не достаточно для перемещения молекул такой жидкости, то она, как и твердые тела, оказывает упругое сопротивление сдвигу. Если время действия силы достаточно, то возникает течение жидкости и проявляется вязкость.

Механизм сопротивления движению у жидкостей отличается от газов. Поскольку движение жидкости является результатом направленного движения перескакивающих молекул, то чем меньше перескоков, тем больше вязкость жидкости. С повышением температуры растет кинетическая энергия молекулярного движения и увеличивается число перескоков, что воспринимается как уменьшение вязкости. Изменение давления мало влияет на вязкость жидкости.

Раздел 2. Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов

Тема 2.1. Силы, действующие в жидкости. Основное уравнение гидростатики. Силы давления жидкости, действующие на плоские и криволинейные стенки.

Силы, действующие на частицы жидкости, подразделяют на поверхностные и массовые.

К поверхностным силам относят силы давления, направленные нормально к площади, на которую они действуют и силы внутреннего трения, являющиеся касательными.

К массовым силам относят силы тяжести и силы инерции. Массовые силы характеризуются ускорениями, которые они сообщают единице массы.

Сила, действующая на единицу площадки по нормали к поверхности, которая ограничивает бесконечно-малый объем внутри покоящейся жидкости, называется гидростатическим давлением. Это давление в любой точке жидкости складывается из давления на её свободную поверхность и давления столба жидкости, высота которого равна расстоянию от этой точки до свободной поверхности.

$$P = P_0 + \rho gh$$

Где P – гидростатическое давление, Па;

P_0 – давление на свободную поверхность жидкости, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

h – высота столба жидкости над данной точкой, м.

g – ускорение свободного падения, м/с²

Уравнение 1.1 называется основным уравнение гидростатики. Из этого уравнения следует, что внешнее давление P_0 на свободную поверхность жидкости передаётся в любую точку жидкости равномерно – Закон Паскаля.

Гидростатическое давление называется полным или абсолютным, а величина ρgh – относительным давлением.

Таким образом если давление на свободную поверхность жидкости равно атмосферному, то:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}$$

Когда абсолютное давление меньше атмосферного то измерительный прибор покажет разрежение (вакуум):

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{раз}}$$

Отрицательное избыточное давление называется вакуумметрическим давлением.

При расчетах на прочность различных гидромеханических сооружений возникает необходимость определить давления жидкости на стенку и дно этих сооружений.

Избыточное давление жидкости на единицу площади плоской стенки равно:

$$P_{\text{изб}} = \rho gh$$

Полная сила, действующая на плоскую стенку равна произведению величины смоченной площади стенки на гидростатическое давление в её центре тяжести:

$$P = (P_0 + \rho gh) \cdot F_{\text{см}}$$

В открытом сосуде при $P_0 = 0$ полная сила давления будет равна:

$$P = \rho gh_{\text{ц.т.}} \cdot F_{\text{см}}$$

$h_{\text{ц.т.}}$ – глубина погружения центра тяжести площади, м.

$F_{\text{см}}$ – смоченная поверхность, м².

Точка приложения силы называется центром давления. Центр давления обычно лежит ниже центра тяжести стенки. Например, для прямоугольной стенки центр тяжести находится на расстоянии половины высоты от основания, а центр давления на расстоянии 1/3 высоты.

Частным случаем криволинейной стенки являются стенки цилиндрических резервуаров, котлов, труб и т.д.

Полная сила давления, действующая на цилиндрическую поверхность, определяется:

$$P = \sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}$$

P_x – горизонтальная составляющая, равная силе давления жидкости на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности, Н.

$$P_x = \rho gh_{\text{ц.т.}} \cdot F_{\text{верт}}$$

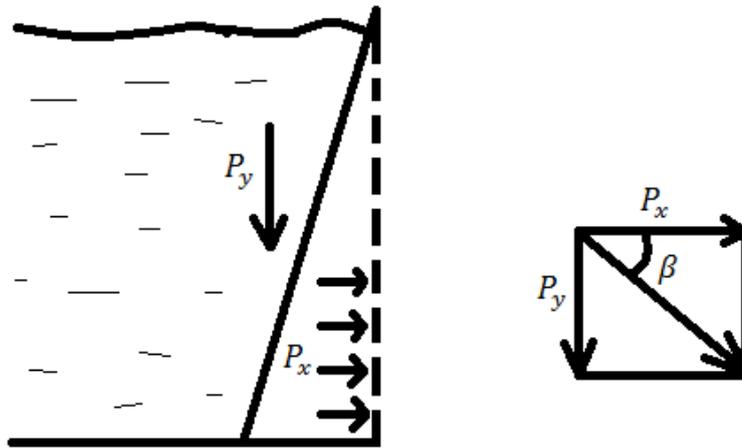
P_y – вертикальная составляющая силы давления, равная силе тяжести, действующей в объеме тела давления V , Н.

$$P_y = \rho gV$$

Объемом тела давления называется объем жидкости, ограниченный сверху свободной поверхностью жидкости, снизу – рассматриваемой криволинейной поверхностью, а с боков – вертикальной поверхностью, проведенной через периметр, ограничивающий стенку.

Направление полной силы давления определяется углом, образуемым вектором давления с горизонтальной поверхностью:

$$\text{tg} \beta = \frac{P_y}{P_x}$$



Для цилиндрического резервуара с вертикальной осью вертикальная составляющая $P_y = 0$, поэтому полная сила давления на боковую поверхность равна P_x

$$P = P_x$$

На любое тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная силе тяжести жидкости, вытесненной этим телом – закон Архимеда.

$$P = \rho g V$$

P – выталкивающая сила, Н;

V – объем погруженной части тела, м^3 .

В зависимости от соотношения между силой тяжести тела и силой, вытесненной им жидкости возможны три состояния тела:

1. Сила тяжести тела больше силы тяжести вытесненной им жидкости: тело тонет.

$$G > \rho g V$$

2. Сила тяжести тела равна силе тяжести вытесненной им жидкости: тело плавает.

$$G = \rho g V$$

3. Сила тяжести тела меньше силы тяжести вытесненной им жидкости: тело всплывает.

$$G < \rho g V$$

Тема 2.2. Гипотеза сплошности среды

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час.).

В гидромеханике рассматриваются макроскопические движения жидкостей и газов, а так же силовое взаимодействие этих сред с твердыми телами. При этом, как правило, размеры рассматриваемых объемов жидкостей, газов и твердых тел оказываются несопоставимо большими по сравнению с размерами молекул и межмолекулярными расстояниями, т.к. межмолекулярные расстояния в жидкостях составляют всего $10^{-7} - 10^{-8}$ см, а длина свободного пробега молекул газа при атмосферном давлении 10^{-5} см и изменяется обратно пропорционально давлению. По этой причине обычно жидкости и газы воспринимаются как сплошные среды, масса которых непрерывно распределена по объему. Исключение составляют сильно разреженные газы.

Указанные обстоятельства позволяют ввести гипотезу сплошности изучаемой среды и заменить реальные дискретные объекты упрощенными моделями, представляющими собой материальный континуум, т.е. материальную среду, масса которой непрерывно распределена по объему. Такая идеализация упрощает реальную дискретную систему и позволяет

использовать для её описания хорошо разработанный математический аппарат исчисления бесконечно малых и теорию непрерывных функций.

Параметры, характеризующие термодинамическое состояние, покой или движение среды, считаются при этом непрерывно изменяющимися по всему объему, занятому средой, кроме точек или линий поверхностей, где могут существовать разрывы.

Критерием приемлемости всякой гипотезы является степень совпадения результатов, полученных на её основе, с результатами наблюдений и измерений. В настоящее время можно констатировать, что опыт механики жидкостей и газа полностью подтверждает правомерность использования гипотезы сплошной среды в широком диапазоне изменения параметров.

Теоретические результаты, полученные для гипотетически сплошной среды, тем лучше совпадут с результатами наблюдений, чем полнее и точнее учтены в ней свойства реальных жидкостей и газов. К сожалению, идеализацию среды во многих случаях не удаётся ограничить только допущением её сплошности. Сложность изучаемых явлений заставляет отказаться от учета и некоторых других свойств реальных сред. В зависимости от тех свойств, которые приписываются гипотетической сплошной среде, получают различные её модели. Всякая идеализация среды имеет границы применимости, в которых получаются результаты, удовлетворительные с точки зрения запросов практики. При использовании результатов, полученных для идеализированной среды, важно знать границы их применимости и точность в этих границах. Установление границ применимости является непростым делом, требующим знания существа явлений или хотя бы интуитивно правильного их понимания.

В механике жидкостей газов широко используется понятие «жидкой частицы». Этим термином обозначают малый объем сплошной среды, который при движении деформируется и масса которого не смешивается с окружающей средой. Несколько упрощенно жидкую частицу можно представить как каплю краски, пушенную в жидкость тех же свойств, что и сама капля, и перемещающуюся вместе с жидкостью. При изучении равновесия и движения жидкостей и газов жидкая частица рассматривается как материальный объект, к которому применимы все законы механики. Изучаемая масса жидкости или газа рассматривается при этом как совокупность непрерывно распределенных по объему жидкости частиц.

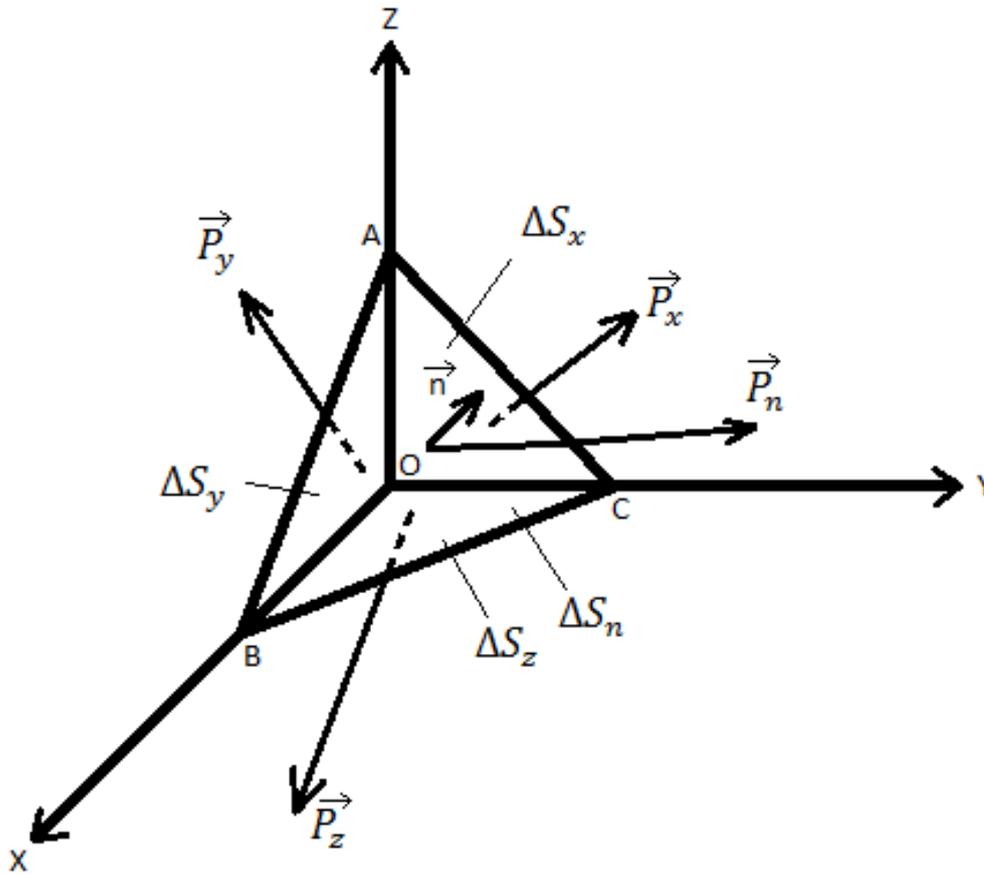
Широко используется в гидромеханике и понятие «жидкого объема», под которым понимают малый или конечный объем жидкости, состоящий во время движения из одних и тех же частиц. Аналогичный смысл имеют термины «жидкая поверхность» и «жидкая линия».

Для выбора эффективных моделей при решении различных вопросов гидрогазодинамики необходимо знать истинные свойства жидкостей и газов. От полноты учёта этих свойств зависит получение физически реальных теоретических результатов и обоснованное определение границ их применимости.

Тема 2.3. Свойства напряжений поверхностных сил

Выделим в движущейся жидкости элементарный объем ΔV в виде тетраэдра, три грани которого ΔS_x , ΔS_y , ΔS_z лежат в координатных плоскостях, а четвертая ΔS_n нормальна направлению n . Отметим, что грани ΔS_x , ΔS_y , ΔS_z являются отрицательными площадками, поскольку они имеют внешними нормальными орты координатных осей.

Пусть p_x , p_y , p_z , p_n – напряжения, действующие на соответствующих гранях тетраэдра, \vec{a} – вектор ускорения его центра масс.



Тогда векторное уравнение движения жидкого тетраэдра будет иметь вид:

$$\vec{F} \rho \Delta V + \vec{p}_n \Delta S_n - \vec{p}_x \Delta S_x - \vec{p}_y \Delta S_y - \vec{p}_z \Delta S_z = \vec{a} \rho \Delta V$$

Учтем, что $\Delta S_x / \Delta S_n = \cos(x, n) = a_{xn}$ (пометка: $\cos(x, n)$ - это косинус угла между x и n). Тогда, разделив все члены последнего уравнения на ΔS_n в пределе получим:

$$\vec{p}_n = \vec{p}_x a_{xn} + \vec{p}_y a_{yn} + \vec{p}_z a_{zn}$$

Следовательно напряжения на любой площадке ΔS_n может быть выражено через напряжения на трех взаимно ортогональных площадках, которые можно выбрать за координатные. Соотношение 2.7 в проекциях на оси координат будет иметь вид:

$$\begin{aligned} p_{nx} &= p_{xx} a_{xn} + p_{yx} a_{yn} + p_{zx} a_{zn} \\ p_{ny} &= p_{xy} a_{xn} + p_{yy} a_{yn} + p_{zy} a_{zn} \\ p_{nz} &= p_{xz} a_{xn} + p_{yz} a_{yn} + p_{zz} a_{zn} \end{aligned}$$

Для каждой из проекций p_{ij} употребляются 2 индекса, первый из которых указывает на ориентацию площадки (её нормаль), а второй ось, на которую проектируется векторная величина. Так, например, величина p_{xx} - это проекция на ось x (второй индекс) напряжения \vec{p}_x , действующего на площадке, нормальной к оси x (первый индекс). Поэтому p_{xx} , p_{yy} , p_{zz} представляют собой величины нормальных к соответствующим площадкам напряжений. Разноименные индексы определяют касательные напряжения. Например, p_{yz} есть проекция на ось z напряжения \vec{p}_y , приложенного к площадке, нормальной к оси y .

Используя уравнение моментов (моменты сил относительно некоторой оси равны) можно показать, что между касательными напряжениями существует связь:

$$p_{xy} = p_{yx}$$

$$P_{yz} = P_{zy}$$

$$P_{zx} = P_{xz}$$

Следовательно, напряженное состояние жидкости в точке определяется шестью независимыми скалярными величинами, три из которых являются нормальными напряжениями, а три другие – касательными. Совокупность девяти величин типа p_{ij} , связанных соотношением 2.8 образует тензор напряжений, для которого величины p_{ij} являются скалярными компонентами, а $\vec{p}_x \vec{p}_y \vec{p}_z$ – векторными.

В реальных жидкостях нормальные напряжения могут создаваться как давлением одних частиц на другие, так и действием сил вязкости. Касательные напряжения являются результатом действия сил вязкости и зависят от давления настолько, насколько от него зависит коэффициент вязкости.

Для модели идеальной жидкости, в которой все касательные напряжения равны нулю, действующие напряжения направлены по нормальям к соответствующим площадкам и согласно уравнению 2.8 выражаются формулами:

$$P_{nx} = p_{xx} a_{nx}$$

$$P_{ny} = p_{yy} a_{ny}$$

$$P_{nz} = p_{zz} a_{nz}$$

При этом напряжения должны быть сжимающими, т.е. направленными по внутренним нормальям, т.к. растягивающих усилий идеальная жидкость, как и технические жидкости, не выдерживает, поэтому величины $P_{nx} P_{ny} P_{nz}$ могут быть вычислены из соотношений:

$$P_{nx} = \vec{p}_n \vec{i} = p_n \cos(nx) = p_n a_{nx}$$

$$P_{ny} = p_n a_{ny}$$

$$P_{nz} = p_n a_{nz}$$

Сопоставляя два последних ряда равенств, получаем:

$$p_n = p_{xx} = p_{yy} = p_{zz}$$

Эти равенства показывают, что в случае отсутствия касательных напряжений нормальные напряжения не зависят от ориентации площадок, а величина p , которая определяется как:

$$p = -p_n = -p_{xx} = -p_{yy} = -p_{zz}$$

Эта величина называется гидродинамическим давлением в идеальной жидкости, которая существенно положительна.

Отметим, что касательные напряжения равны нулю также в любой вязкой жидкости, находящейся в покое, т.к. вязкость проявляется только при наличии относительных перемещений слоев жидкости. В этом случае вывод о независимости напряжений справедлив для любой покоящейся жидкости, а давление p будет называться гидростатическим.

Тема 2.4. Основные понятия о движении жидкости

Живым сечением $F_{ж.с.}$ называют площадь поперечного сечения потока, нормальную к направлению течения.

Смоченным периметром S_c называют часть периметра живого сечения, ограниченную твердыми стенками.

Расходом жидкости называется количество жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока.

Различают объемный и массовый расход.

Объемный расход:

$$Q_v = \frac{V}{t}, \text{ м}^3/\text{сек}$$

Массовый расход:

$$Q_m = \frac{m}{t}, \text{ кг/сек}$$

Скорость потока также может быть объемной и массовой.

Объемная скорость потока определяется как объемный расход вещества V_t через единицу площади живого сечения $F_{ж.с.}$ потока:

$$v_v = \frac{Q_v}{F_{ж.с.}}$$

Массовая скорость потока определяется как массовый расход вещества m_t через единицу площади живого сечения $F_{ж.с.}$ потока:

$$v_m = \frac{Q_m}{F_{ж.с.}} = \rho v$$

Средняя скорость потока v определяется отношением расхода на площадь живого сечения:

$$v_{cp} = \frac{Q}{F_{ж.с.}}$$

Средняя скорость связана с местными скоростями u в отдельных точках живого сечения соотношением:

$$v = \frac{\int_{F_{ж.с.}} u \, dF_{ж.с.}}{F_{ж.с.}}$$

При установившемся движении жидкости давление и скорость в любой точке пространства, заполненного движущейся жидкостью, с течением времени не изменяются:

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad \frac{dv}{dt} = 0$$

При неустановившемся движении жидкости в данной точке пространства происходит изменение давления и скорости жидкости с течением времени.

Гидравлическим радиусом R , м, потока называют отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = \frac{F_{ж.с.}}{S_c}$$

Гидравлический радиус характеризует размер и форму сечения потока. Чем больше (для заданной площади сечения) гидравлический радиус, тем меньше будет смоченная поверхность стенок, а следовательно, тем меньше и сопротивления движению, которые пропорциональны смоченной поверхности.

Уравнение постоянства расхода (уравнение неразрывности течения)

При установившемся движении несжимаемой жидкости расход во всех живых сечениях потока одинаков, т.е.:

$$Q = v_1 F_{ж.с.1} = v_2 F_{ж.с.2} = \dots = v_n F_{ж.с.n}$$

Где $v_1 \dots v_n$ - средние скорости в соответствующих живых сечениях потока $F_{ж.с.1} \dots F_{ж.с.n}$.

Из этого уравнения следует:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{F_{ж.с.2}}{F_{ж.с.1}}$$

Т.е. средние скорости обратно пропорциональны соответствующим площадям живых сечений.

Раздел 3. Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.

Тема 3.1. Понятия линии тока, траектории частицы, трубки тока, установившегося и неустановившегося движения.

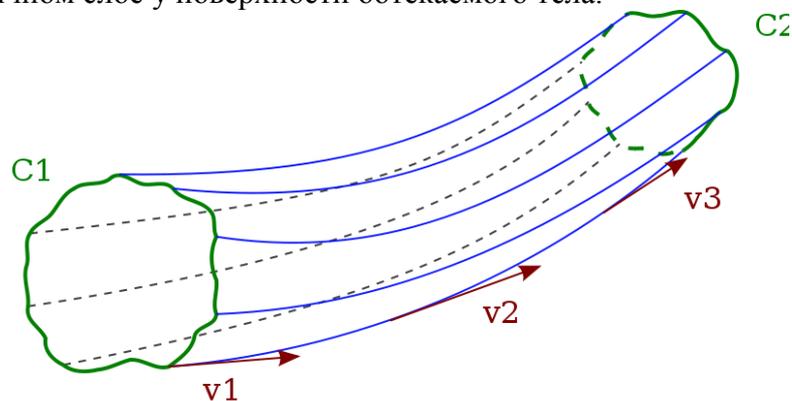
Траекторией частицы (точки сплошной среды) называется геометрическое место точек пространства, через которые движущаяся частица последовательно проходит во времени.

Линией тока называется линия, которая для данного момента времени t обладает следующим свойством:

- вектор скорости, вычисленный в любой точке этой линии, направлен по касательной к ней.
- фиксируется момент времени t .

В случае установившегося движения жидкости частицы движутся вдоль линии тока. В случае неустановившегося движения линии тока не совпадают с траекториями движения жидкости.

Критическая точка – это точка потока, в которой вектор скорости равен нулю. Это возникает в пограничном слое у поверхности обтекаемого тела.



Если в потоке выбрать некоторую площадку и провести через границу этой площадки $C1$ векторные линии, то образуется фигура – векторная трубка. Векторная трубка для поля скоростей называется трубкой тока, т.к. при установившемся движении она подобна трубке со стенками, внутри которой с постоянным расходом течет жидкость. Где v_1, v_2, v_3 – векторы скоростей в соответствующих точках.

Жидкость называется идеальной, если в ней отсутствуют касательные напряжения и наблюдаются только нормальные напряжения. Таким образом, на движущуюся жидкость распространяется свойство, которое наблюдается в жидкости при равновесии или ее движении как абсолютно твердого тела. В реальных жидкостях касательные напряжения не равны нулю, но часто встречаются случаи, когда касательные напряжения малы по сравнению с нормальными.

Неустановившееся движение характеризуется зависимостью параметров движения от времени и пространства, т.е., например, для давления

$$p = p(x, y, z, \tau)$$

Установившееся движение характеризуется зависимостью параметров движения только от пространства, т.е., например, для давления p

$$p = p(x, y, z)$$

Ламинарным (послойным) называется режим течения, когда силы вязкости соизмеримы с силами инерции и для которого характерно отсутствие обмена частиц между слоями (перемешивание жидкости по сечению потока), т.е. доля частиц двигающихся в поперечном направлении составляет не более 1...3% от общего числа частиц.

Турбулентным называется режим течения, когда силы инерции преобладают над силами вязкости и для которого характерен интенсивный обмен частиц между слоями (более 90% от общего числа)

Тема 3.2. Подобие гидромеханических процессов. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения.

Если для двух потоков около (или внутри) геометрически подобных тел картины линий тока также геометрически подобны, то такие потоки называются механически подобными. Основным условием осуществления механического подобия является одинаковое отношение величин $\frac{\rho v^2}{l}$ и $\frac{\mu v^2}{l^2}$, т.е.

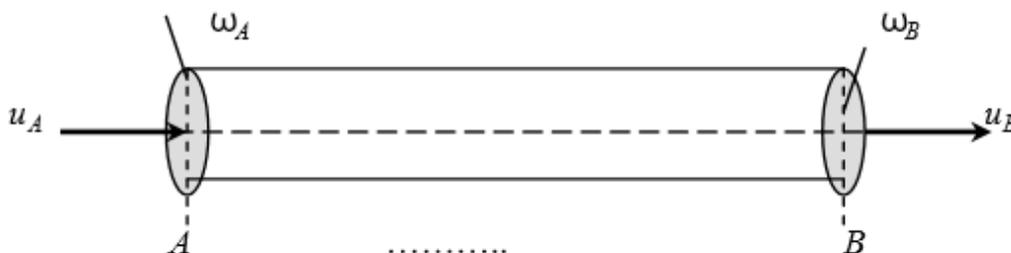
$$\frac{\rho v^2}{l} : \frac{\mu v^2}{l^2} = \frac{\rho v l}{\mu} = Re$$

Поскольку это отношение представляет собой отношение двух сил, отнесённых к единице объёма, т.е. двух величин с одинаковой размерностью, оно является отвлечённым (безразмерным) числом.

Число $\frac{\rho v l}{\mu} = Re$, характеризующее отношение силы инерции к силе трения, называется числом Рейнольдса.

Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения.

Согласно теореме о количестве движения изменение количества движения во времени, т.е. его производная по времени равна результирующей всех сил, приложенных к выделенной массе жидкости. Рассмотрим жидкую элементарную струйку



Следует отметить, что жидкая струйка всё время должна состоять из одних и тех же частиц жидкости (в противном случае нельзя будет основываться на теореме общей механики о количестве движения системы). Это означает, что поверхности, ограничивающие выделенную массу жидкости, должны перемещаться вместе с жидкостью, т.е. они должны быть жидкими поверхностями. Таким образом, в жидкой струйке её концевые поперечные сечения должны перемещаться вместе с жидкостью, первоначально заключённой в жидкой струйке. Полное изменение количества движения в единицу времени dt около сечения B равно

$$\frac{dm}{dt} u_B = \rho \omega_B u_B^2$$

где dm – масса частицы, кг; ω – площадь сечения B, м²; u – скорость частицы, м/с. Аналогично для сечения A

$$\frac{dm}{dt} u_A = \rho \omega_A u_A^2$$

Векторную сумму этих изменений количества движения, отнесённых к единице времени, необходимо приравнять к результирующей всех внешних сил, действующих на выделенную массу жидкости. Согласно теореме о моменте количества движения производная по времени от момента количества движения относительно какой-либо точки равна главному моменту относительно той же точки всех внешних сил, приложенных к массе.

Тема 3.3. Одномерные потоки жидкостей и газов. Уравнение Даниила-Бернулли

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция с запланированными ошибками (2 час.).

Одномерные потоки жидкостей и газов.

Если рассматривается течение идеальной жидкости в канале с прямолинейной осью и достаточно плавными обводами, то в этом случае проекции скоростей u_y и u_z весьма малы в сравнении с продольной скоростью (проекцией u_x). В этом случае можно принять

$$u_y \approx u_z \approx 0$$

и задачу следует рассматривать как одномерную. Однако поле скоростей в поперечном сечении канала неравномерно, что обусловлено влиянием сил вязкости. Несмотря на это, при решении практических задач допустимо рассматривать задачу как одномерную, вводя в расчёт осреднённые параметры. К таким задачам относятся задачи о течении в трубах, каналах, некоторых струйных течениях. Дифференциальное уравнение движения идеальной жидкости (уравнение Эйлера) может быть получено из дифференциального уравнения равновесия той же жидкости, если, согласно принципу Д'Аламбера, к действующим силам присоединить силы инерции, т.е.

$$\rho(Xdx + Ydy + Zdz) = dp + \frac{\rho}{2} du^2$$

где u – скорость движения частицы жидкости, м²/с.

Уравнение Даниила-Бернулли

Различают два режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

Критерием, определяющим режим движения жидкости, является число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{\nu}$$

где v – средняя скорость потока, м/сек;

d – диаметр трубы, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

μ – динамическая вязкость, Н*с/м²;

ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Для определения режима движения в каналах произвольного сечения в формулу критерия Рейнольдса вводят гидравлический радиус $R_r = d/4$

$$Re = \frac{4vR_r}{\nu}$$

Значение числа Рейнольдса $Re = 2300$ называют критическим.

Если $Re < 2300$, то режим движения ламинарный, при $Re > 2300$ – турбулентный.

Основным уравнением гидравлики, определяющим связь между давлением и скоростью в движущемся потоке жидкости, является уравнение Бернулли.

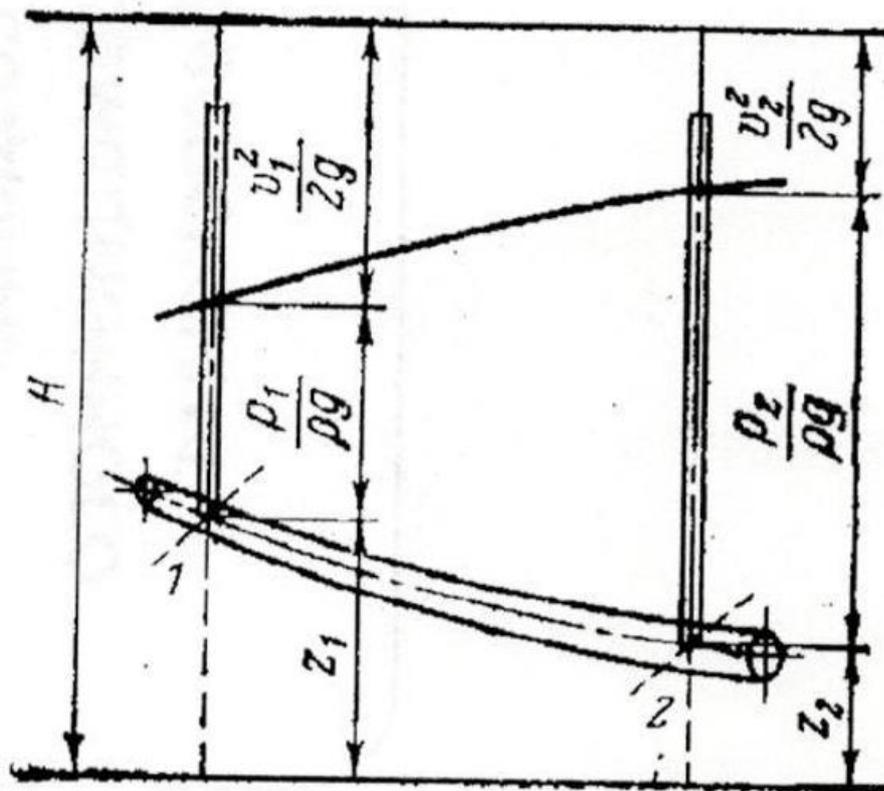


Рисунок 3.1

Для двух произвольных поперечных сечений элементарной струйки идеальной жидкости можно записать следующее уравнение энергетического баланса (Рисунок 3.1.)

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

В этом уравнении $z_1 g$ и $z_2 g$ - удельная энергия положения (высоты) частицы в сечениях 1 и 2 соответственно, кДж/кг;

$\frac{p_1}{\rho}$ и $\frac{p_2}{\rho}$ - удельная энергия давления, кДж/кг;

$\frac{v_1^2}{2}$ и $\frac{v_2^2}{2}$ - удельная кинетическая энергия, кДж/кг.

Если разделить все части уравнения на g то получим:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Все члены этого уравнения имеют размерность длины и измеряются высотой столба жидкости.

Здесь z - геометрический напор, высота положения частицы над плоскостью отсчета, м;

$\frac{p}{\rho g}$ - пьезометрический напор, м;

$z + \frac{p}{\rho g}$ - статический напор, представляющий собой полный запас потенциальной энергии 1 кг жидкости, м;

$\frac{v^2}{2g}$ - скоростной напор, представляющий собой удельную кинетическую энергию 1 кг жидкости, м.

Таким образом, при установившемся движении идеальной жидкости для любого сечения справедливо выражение:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = const$$

Это уравнение называется уравнением Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

Раздел 4. Динамика вязкой жидкости

Тема 4.1. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения Бернулли.

Для потока реальной вязкой жидкости следует учитывать различие в скоростях по сечению потока. При этом пользуются понятиями средней скорости. При этом расчетное значение удельной кинетической энергии потока получается несколько меньше действительного. Последнее обстоятельство учитывается введением поправочного коэффициента α , определяемого опытным путем.

Для ламинарного режима движения жидкости в круглых трубах $\alpha=2$, для турбулентного $\alpha=1,04-1,13$. В реальных условиях необходимо учитывать также потери напора на участке от первого до второго исследуемого сечения потока $h_{пот}$.

С учетом сказанного уравнение Бернулли для потока реальной жидкости записывают в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{пот} = const$$

$h_{пот}$ – потерянная высота, характеризующая энергию единицы веса жидкости, затраченную на преодоление гидравлического сопротивления на пути между 2-мя сечениями.

α – коэффициент неравномерности распределения скоростей по сечению потока, представляющий собой отклонение истинной живой силы потока к живой силе, вычисленной по средней скорости:

$$\alpha = \frac{\int_{F_{ж.с.}} u^3 dF_{ж.с.}}{u^3 F_{ж.с.}}$$

Геометрический смысл уравнения Бернулли: при установившемся движении жидкости сумма четырех высот в каждом живом сечении потока есть величина постоянная и равная полной высоте (полному напору):

$$z = \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g} + h_{пот} = H$$

Физический смысл уравнения Бернулли: при установившемся движении жидкости сумма четырех удаленных энергий остается неизменной вдоль потока и равной общему запасу удельной энергии.

Тема 4.2. Теория пограничного слоя. Уравнение пограничного слоя в дифференциальной форме.

Пограничным слоем называется слой жидкости вблизи обтекаемой твердой поверхности или в области взаимодействия струи с неподвижной жидкостью той же плотности и вязкости, в пределах которого проявляется основное действие сил вязкости и формируются вихри.

За пределами пограничного слоя поток приближенно считается безвихревым.

Течение в пограничном слое может быть как ламинарным, так и турбулентным. В силу свойства прилипания жидких или газовых частиц к твердым поверхностям в пристенном пограничном слое скорость на обтекаемой стенке равна 0.

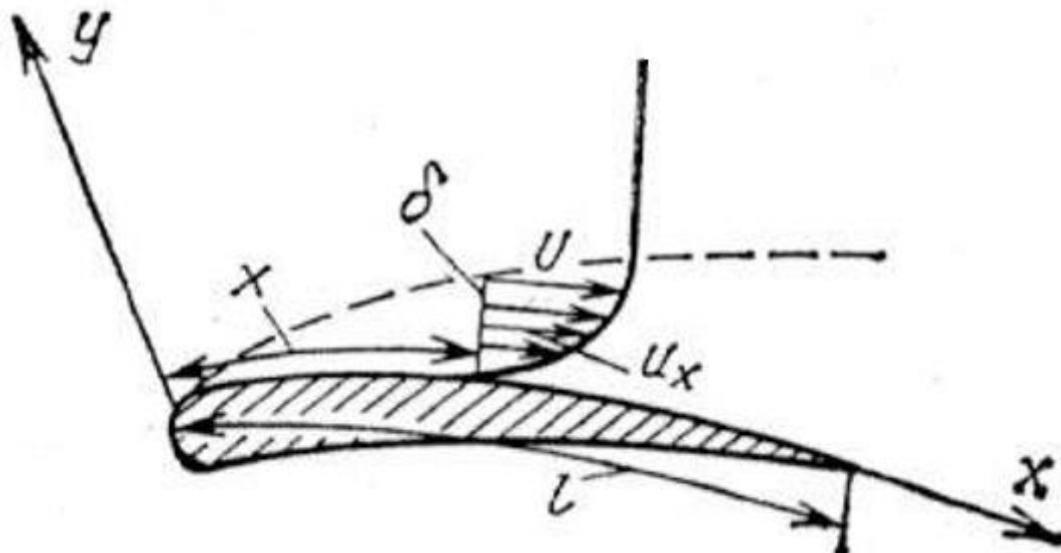


Рисунок – схема течения в пограничном слое.

u_x – скорость частиц жидкости вдоль дуги обтекаемого контура.

u_y - скорость в поперечном направлении.

Абсцисса x показывает протяженность слоя, стремится к длине тела l

Ордината y - величина, которая стремится к толщине δ - т.е. толщине пограничного слоя.

Уравнение пограничного слоя в дифференциальной форме.

Ламинарное течение в плоском установившемся пограничном слое описывается приближенными уравнениями Прандтля:

$$u_x \frac{du_x}{dx} + u_y \frac{du_x}{dy}$$

С учетом вязкости:

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}$$

Т.к. давление по толщине слоя не меняется то:

$$\frac{dp}{dy} = 0$$

Это означает, что давление по толщине слоя не меняется.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{du_y}{dy} = 0$$

- это следствие из уравнения не сжимаемости жидкости.

Уравнения 4.1 4.2 4.3 – это уравнения для плоско - параллельного установившегося движения вязкой жидкости в пограничном слое без учета массовых сил.

С учетом этого мы можем записать:

$$\begin{aligned} u_x = u_y = 0 \text{ при } y = 0 \\ u_x = U(x) \text{ при } y = \delta \end{aligned}$$

Где $U(x)$ - значение проекции скорости u_x на границе пограничного слоя δ .

Поскольку для плоского течения из существует функция тока $\psi(x, y)$, то система уравнений 4.1 4.2 4.3 может быть приведена к одному уравнению для этой функции:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3}$$

Давление и скорость на границе пограничного слоя связаны уравнением Бернулли, откуда можно сделать вывод, что:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho U \frac{dU}{dx}$$

Следовательно уравнение 4.5 примет вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = U \frac{dU}{dx} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3}$$

Тема 4.3. Уравнение пограничного слоя в интегральной форме.

Точные решения дифференциальных уравнений пограничного слоя возможны лишь в ограниченных случаях при использовании предпосылок.

В связи с этим широкое распространение получили приближенные методы решения задач пограничного слоя, основанные на использовании уравнений импульсов и энергии в интегральной форме.

Если проинтегрировать первое из уравнений системы от 0 до δ + учесть уравнение Бернулли + выражение для напряжения на стенке, то получим уравнение следующего вида:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta} \rho u_x^2 dy - U \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} \rho u_x dy = \rho \delta U \frac{dU}{dx} - \tau_0$$

U - значение проекции скорости u_x на границе пограничного слоя δ .

τ_0 – касательное напряжение на поверхности пластины.

Метод 4.8 называется методом Пульгаузена. Он основан на аппроксимации профиля скорости полиномом. Подставив полином в 4.8 получают дифференциальное уравнение для толщины пограничного слоя. В случае плоской пластины ($U = u_0 = const, \lambda = 0$)

λ – это формпараметр, в общем случае: $\lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{dU}{dx}$

уравнение будет иметь вид:

Распределение скоростей:

$$\frac{u_x}{u_0} = 2\eta(1 - \eta^2) + \eta^4$$

Где η - скорость внешнего потока; $\eta = u/\delta$

Толщина пограничного слоя:

$$\delta = 5,83 \sqrt{\frac{\nu x}{u_0}}$$

Касательное напряжение:

$$\tau_0 = 0,343 \sqrt{\frac{\mu \rho u_0^3}{x}}$$

Коэффициент сопротивления трения

$$C_\mu = 1,372/\sqrt{Re_l}$$

Где $Re_l = u_0 l/\nu$

Тема 4.4. Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя.

Критическое число Рейнольдса. Ламинарное течение в пограничном слое разрушается и переходит в турбулентное при некотором числе Рейнольдса:

$$Re_{x_{п}} = x_{п} U/\nu$$

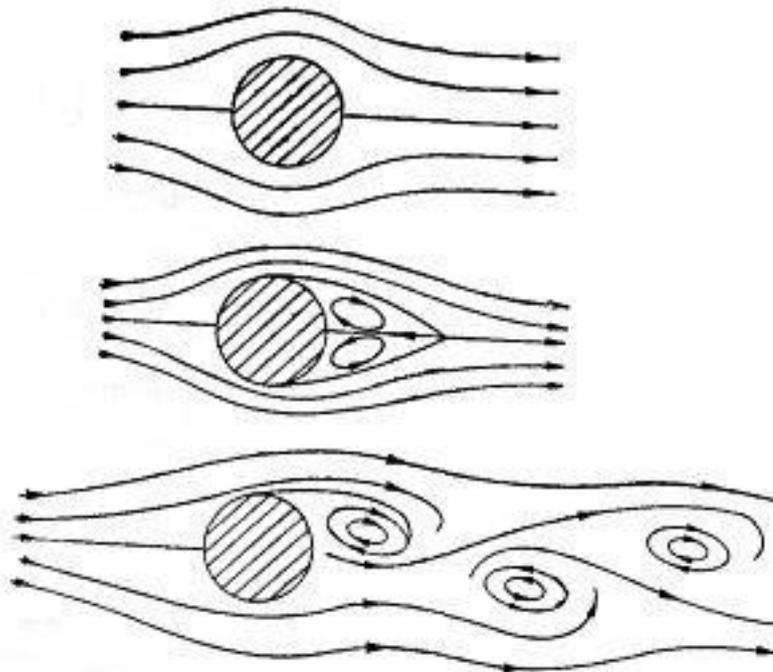
$x_{п}$ - расстояние от точки образования пограничного слоя, на котором поток становится полностью турбулентным.

Переходное число Рейнольдса непостоянно и зависит от ряда факторов – степени турбулентности внешнего потока, шероховатости твердой поверхности, значения формпараметра.

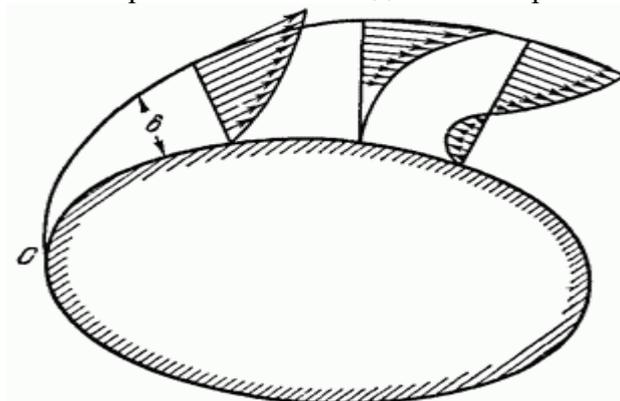
Так же существует промежуток с некоторым числом Рейнольдса от $Re_{x_{кр}}$ до $Re_{x_{п}}$ где наблюдается смешанный режим – чередование во времени турбулентного и ламинарного режимов.

Величина $Re_{x_{кр}}$ практически не зависит от шероховатости и степени турбулентности внешнего потока, но зависит от формпараметра.

Отрыв пограничного слоя.



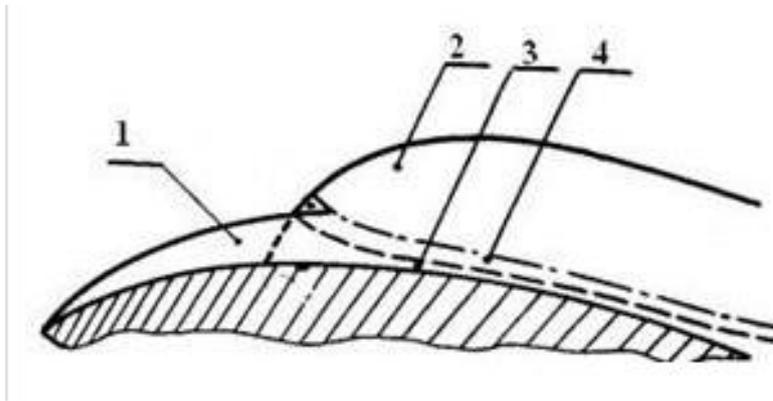
При течениях в расширяющихся каналах и при обтекании выпуклых тел движение может происходить в направлении нарастающего давления, т.е. с положительным градиентом. Это может привести к отрыву пограничного слоя, т.е. к резкому отклонению линий тока от твердой поверхности и образованию возвратных течений в циркуляционных зонах. Теория пограничного слоя применима только до точки отрыва.



Отрыв внешнего потока от контура может начаться не раньше той точки, после которой изменяется направление выпуклости профиля распределения скоростей вблизи контура. Но изменение направления выпуклости связано с изменением наклона касательной к кривой профиля скоростей, т. е. с изменением знака первой производной от рассматриваемой скорости по нормали. До тех пор, пока в точках вблизи контура профиль распределения скоростей будет выпуклым, первая производная будет положительной. Как только изменится направление выпуклости профиля распределения скоростей вблизи контура, знак этой производной станет отрицательным. Таким образом, отрыв пограничного слоя может происходить только после той точки, в которой первая производная от основной скорости по координате y обращается в нуль.

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_{y=0} = 0$$

Тема 4.5. Турбулентный пограничный слой



Структура пограничного слоя:

- 1 – ламинарное течение
- 2 – турбулентный пограничный слой
- 3 – ламинарный подслой
- 4 – переходная зона

Турбулентный пограничный слой разделяется на 4 характерных зоны:

а) вязкий подслой, толщина которого:

$$0 < \frac{u_* y}{\nu} < 4$$

$\frac{u_* y}{\nu}$ – безразмерное расстояние от стенки.

u_* - скорость потока, осредненная по касательным напряжениям.

y – расстояние от стенки.

б) переходная область

$$4 < \frac{u_* y}{\nu} < 30 \div 70$$

в) внутренняя турбулентная область

$$\frac{u_* y}{\nu} > 30 \div 70$$

$$\frac{y}{\delta} < 0,15$$

г) внешняя турбулентная область

$$\frac{y}{\delta} > 0,15$$

Тема 4.6. Распределение скоростей по сечению потока.

Турбулентное течение. В напорных трубах круглого сечения распределение скорости по сечению трубы описывается формулами А. Д. Альтшуля:

$$\frac{u}{u_{\max}} = 1 - 2 \lg \frac{r_0/y}{\frac{0,975}{\sqrt{\lambda}} + 1,35}$$

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{r_0}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}} = \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}}$$

Где u – средняя местная скорость на расстоянии y от стенки трубы;
 u_{\max} – скорость на оси трубы;
 r_0 – радиус трубы;
 r – расстояние от оси трубы до рассматриваемого слоя;
 λ – коэффициент гидравлического трения.

Для ориентировочных расчетов можно приближенно пользоваться формулой Прандтля (закон одной седьмой):

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{r_0}\right)^{0,7}$$

Что соответствует значению $\lambda = 0,03$ в формуле 5.2.

Отношение средней скорости к максимальной определяется по следующей формуле:

$$\frac{u_{\max}}{v} = 1 + 1,35\sqrt{\lambda}$$

Слой, скорость которого равна средней скорости течения в трубе, находится от стенки трубы на расстоянии:

$$y_v = 0,223r_0$$

Пользуясь формулами 5.4 и 5.5 можно найти расход жидкости или газа, движущейся в трубе, измеряя скорость на оси трубы или в точке, где она равна средней скорости.

По поводу уравнения Бернулли: входящий в уравнение Бернулли коэффициент неравномерности распределения скорости по сечению потока определяется из формулы:

$$\alpha = 1 + 2,65\lambda$$

Которая при $\lambda = 0,025 \div 0,03$ преобразуется к виду:

$$\alpha = 1,08 \div 1,1$$

Ламинарное течение. Распределение скоростей по поперечному сечению круглой трубы подчиняется параболическому закону и описывается формулой Стокса:

$$u = \frac{gi}{4\nu} (r_0^2 - r^2) = \frac{gh_{\lambda}}{4\nu l} (r_0^2 - r^2)$$

Где $i = h_{\lambda}/l$ – гидравлический уклон.

Для отношения местной скорости к максимальной справедлива зависимость

$$\frac{u}{u_{\max}} = \frac{y}{r_0} \left(2 - \frac{y}{r_0}\right)$$

Отношение средней скорости к максимальной

$$\frac{v}{u_{\text{макс}}} = 0,5$$

Коэффициент неравномерности распределения скоростей по сечению $\alpha = 2$

Особенности движения жидкости в начальном участке трубы

Параболическое распределение скоростей при ламинарном движении в круглых трубах наступает не у самого начала трубы, а на некотором расстоянии от входного сечения, которое находят по формуле:

$$l_{\text{н}} = 0,029 d Re$$

Значения коэффициента гидравлического трения λ и коэффициента Кориолиса α изменяются по длине начального участка в значительных пределах.

Аналогичное явление наблюдается и при турбулентном течении в трубах, где длину начального участка можно найти по формуле:

$$l_{\text{в}} = \frac{2,45}{\sqrt{\lambda}} d$$

Это выражение действительно для всех трех зон турбулентного течения.

Все приведенные выше закономерности справедливы лишь для изотермического движения, при котором температуры во всех точках потока одинаковы.

Раздел 5. Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления.

Тема 5.1. Характеристики потерь напора. Измерение скорости потока.

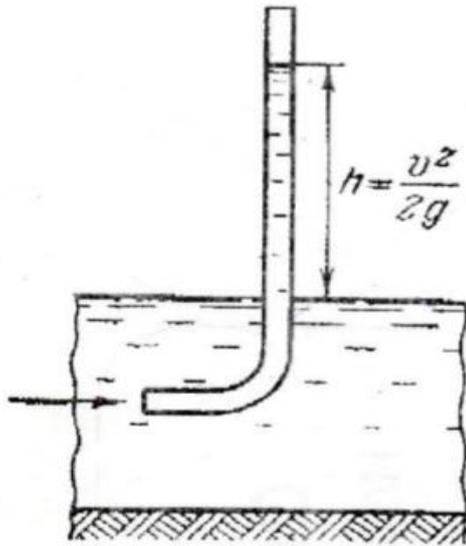
Входящая в уравнение Бернулли величина $h_{\text{пот}}$ – представляет собой сумму всех потерь напора, имеющих на данном участке потока. Потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений $h_{\text{пот}}$ обычно делят на 2 группы:

- а) потери напора, распределенные по длине потока (линейные). Эти потери затрачиваются на преодоление сопротивления трения;
- б) местные потери напора – это потери, вызываемые резким изменением конфигурации границ потока.

Полные потери на данном участке $h_{\text{пот}}$ равны сумме всех потерь:

$$h_{\text{пот}} = \sum h_{\text{л}} + \sum h_{\text{м}}$$

Измерение скорости в открытом потоке можно провести при помощи трубки Пито:



Скорость потока в точке расположения нижнего отверстия трубки Пито определяется как:

$$v = \varphi \sqrt{2gh}$$

φ – коэффициент, учитывающий параметры реальной жидкости и конструктивные особенности трубок;

h – высота жидкости в трубке, м.

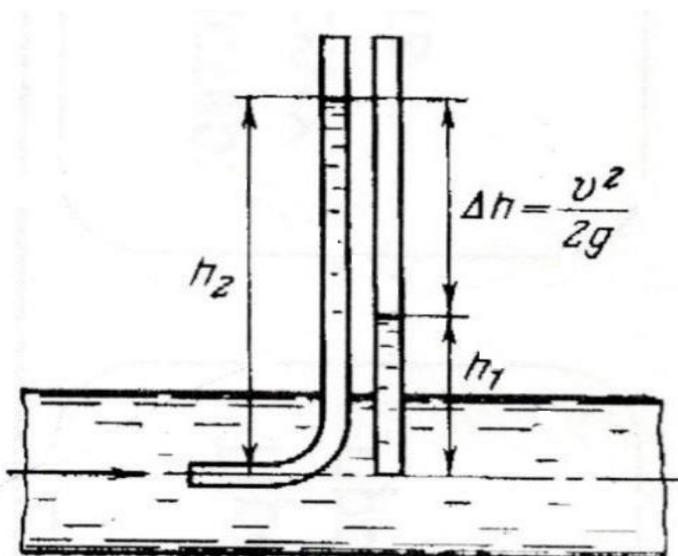
В закрытых трубопроводах скорость потока определяется по разности показаний трубки Пито, определяющей полный напор:

$$\frac{p}{\rho g} + \varphi \frac{v^2}{2g}$$

и пьезометрической трубки, определяющей пьезометрический напор

$$\frac{p}{\rho g}$$

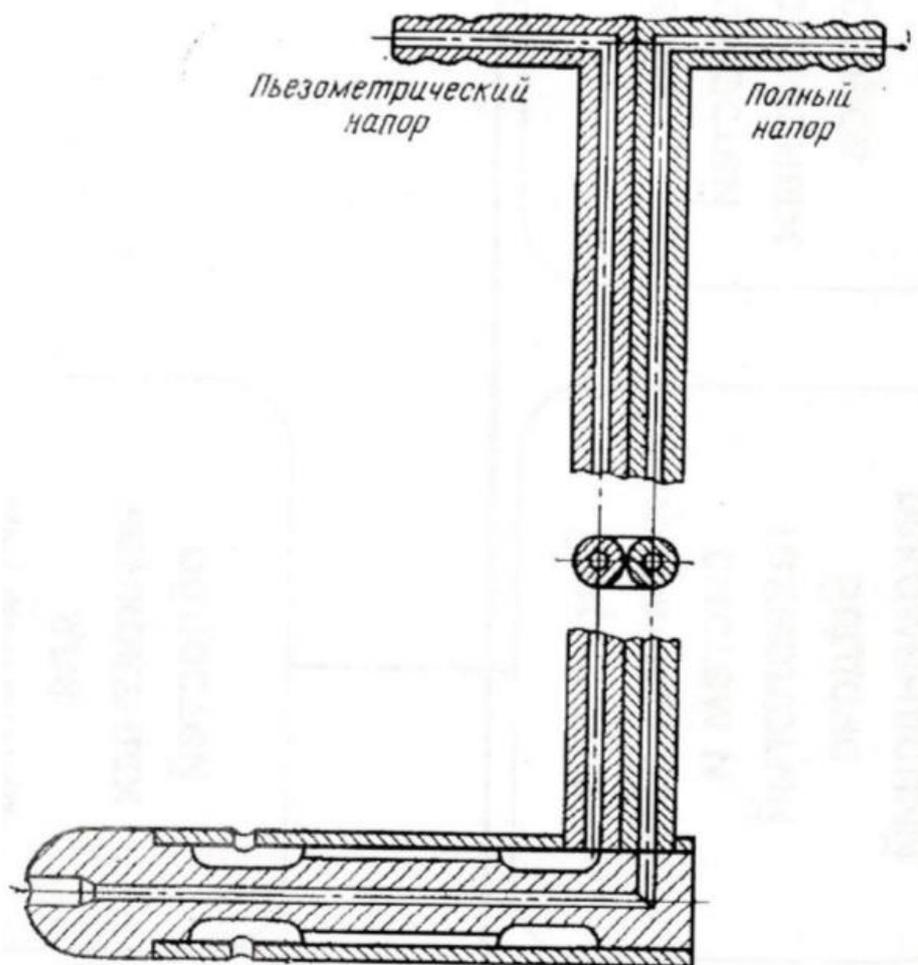
Приведем схему такой трубки:



Определив Δh с учетом поправочного коэффициента, можно определить скорость по выражению:

$$v = \varphi \sqrt{2g\Delta h}$$

На практике для измерения пользуются конструкцией, в которой обе трубки помещаются в 1 прибор:



В такой пневмо-трубке (трубка Прандтля) центральный канал служит для замера полного напора, а боковые отверстия внешней поверхности – пьезометрического напора. Выводы от центрального канала и боковых отверстий присоединяют к дифференциальному манометру и сразу получают разность уровней жидкости в коленях дифманометра Δh .

Скорость движения жидкости в точке установки пневмо-трубки определяется по формуле:

$$v = a \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right)}$$

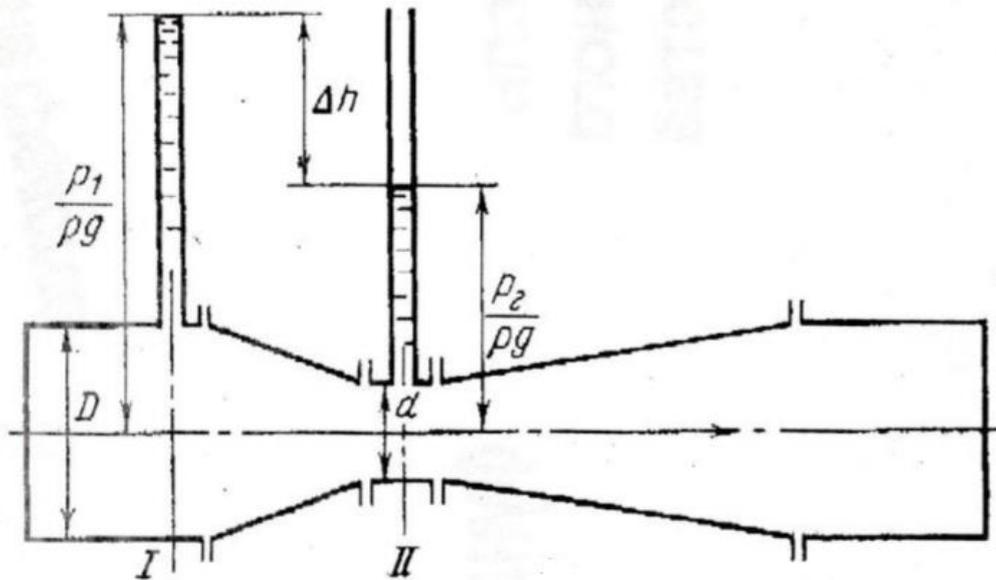
где Δh - разность уровней в коленях дифманометра, м;

ρ_1, ρ_2 – плотности жидкости, исследуемой и залитой в манометр, кг/м³.

a – поправочный коэффициент, зависящий от точности изготовления трубы и её размеров ($a=1-1,04$)

Тема 5.2. Определение расхода в каналах произвольных сечений. Формула Дарси, Пуазейля и др.

В длинных трубопроводах и каналах произвольных сечений измерение расхода без нарушений целостности потока может быть выполнено с помощью водомера Вентури.



Для определения расхода жидкости измеряют пьезометрические напоры в цилиндрических участках водомера Вентури (сечение 1 и сечение 2) и определяют их разность Δh . Если принять $h_{\text{пот}} = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, то из уравнения Бернули получим:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g\Delta h$$

Решая уравнение совместно с уравнение неразрывности потока, получаем выражение для скорости в первом сечении:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 - 1}}$$

Где f_1 и f_2 – площади соответственно первого и второго поперечных сечений.

Расход жидкости, протекающей через прибор, определится как произведение скорости v_1 на площадь поперечного сечения f_1 :

$$G = v_1 f_1 = f_1 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 - 1}}$$

С учетом коэффициента расхода μ формула принимает вид:

$$G = \mu f_1 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 - 1}}$$

Как правило $\mu = 0,96 \div 0,98$.

При движении реальной жидкости в трубе часть гидродинамического напора расходуется на преодоление линейных $h_{\text{л}}$ и местных $h_{\text{м}}$ гидравлических сопротивлений.

Линейное сопротивление (сопротивление трения) $h_{\text{л}}$ определяют по формуле Дарси:

$$h_{\lambda} = \lambda_{\text{тр}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \rho$$

Где $\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления трения по длине;

l - длина трубы, м;

d - диаметр трубы, м;

v – скорость движения в выходном сечении трубы, м/с.

ρ - плотность, кг/м³.

Для ламинарного движения жидкости коэффициент сопротивления $\lambda_{\text{тр}}$ – определяется по формуле Пуазейля:

$$\lambda_{\text{тр}} = \frac{64}{Re}$$

При турбулентном движении в трубах с гладкими стенками $\lambda_{\text{тр}}$ рассчитывается по формуле Блазиуса, если $Re = 10^4 \div 10^5$;

$$\lambda_{\text{тр}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$$

При значениях $Re > 10^5$ коэффициент $\lambda_{\text{тр}}$ определяется по формуле Никурадзе:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}$$

При движении жидкости по шероховатым трубам, когда $2300 < Re < Re_{\text{пред}}$ (переходная область), $\lambda_{\text{тр}}$ определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

$$Re_{\text{пред}} = 568 \frac{d}{k}$$

d - диаметр трубопровода, м;

k – абсолютная шероховатость труб, м.

Для шероховатых труб в квадратичной зоне применяется формула Шифринсона:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \left(\frac{k}{d} \right)^{0,25}$$

Из выражения 3.34 может быть получена формула для определения $v_{\text{пред.}}$, т.е. скорости потока, при которой наступает область квадратичного закона сопротивления:

$$Re = \frac{v_{\text{пред.}} \cdot d}{\nu} = 568 \frac{d}{k}$$

Откуда

$$v_{\text{пред.}} = 568 \frac{\nu}{k}$$

Где ν - кинематическая вязкость, м²/сек

Местные сопротивления обусловлены наличием по длине трубопровода вентилей, задвижек, сужений или расширения труб, поворотов и т.д.

Потери напора в местных сопротивлениях определяются по формуле:

$$h_{\text{м}} = \xi \frac{v^2}{2g}$$

ξ – коэффициент местного сопротивления;

v – скорость жидкости, м/сек.

Резкое повышение давления в водопроводной сети, возникающее в результате изменения скорости потока при быстром закрытии крана или задвижки, называют гидравлическим ударом. Гидравлический удар может привести к разрыву стенок трубы.

Повышение давления, возникающее при гидравлическом ударе определяется по формуле:

$$\Delta p = \rho cv$$

ρ – плотность жидкости.

v – скорость движения жидкости до закрытия задвижки (крана), м/сек.

c – скорость распространения ударной волны, м/сек.

Если время закрытия задвижки t больше времени гидравлического удара T ($T = 2l/c$, где l – длина трубопровода), то повышение давления не достигает максимальной величины. При медленном закрытии задвижки повышение давления определяется по формуле:

$$\Delta p = \rho cv \frac{T}{t} = \frac{2\rho lv}{t}$$

Тема 5.3. Гидравлический расчет трубопроводов.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час.).

В задачу гидравлического расчета водопровода может входить определение диаметра трубопровода d , расхода G , потери напора $h_{\text{пот}}$. При расчете длинных водопроводов учитывают только потери напора по длине, т.к. местные потери составляют обычно менее 10% всех потерь. При расчете коротких трубопроводов необходимо учитывать потери напора не только по длине, но и в местных сопротивлениях.

При скорости воды в трубе $v \geq 1,2$ м/сек гидравлический расчет простого трубопровода (не имеющего ответвлений) может производиться по следующим формулам.

1. Если заданы расход воды G , м³/сек и допустимые потери напора $h_{\text{пот}}$, м, а также длина l , м, определяют расходную характеристику K , м³/сек, по которой, пользуясь справочными таблицами, можно найти диаметр трубопровода d , м:

$$K = \frac{G}{\sqrt{\frac{h_{\text{пот}}}{l}}} = \frac{G}{\sqrt{i}}$$

$i = \frac{h_{\text{пот}}}{l}$ – гидравлический уклон;

l – длина трубопровода, м.

По коэффициенту K находят диаметр по таблицам.

2. Если заданы расход воды G , диаметр d и длина трубопровода, то можно определить потери напора $h_{\text{пот}}$:

$$h_{\text{пот}} = \frac{G^2 l}{K^2}$$

К находят по таблицам от d.

3. Если заданы диаметр d, длина l и потери $h_{\text{пот}}$, можно найти расход:

$$G = K \sqrt{\frac{h_{\text{пот}}}{l}} = K \sqrt{i}$$

Когда простой трубопровод состоит из нескольких последовательно соединенных труб различных диаметров, то полная потеря напора $h_{\text{пот}}$ определяется как сумма потерь напора на отдельных участках:

$$h_{\text{пот}} = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n$$

Трубопроводы с параллельными участками, которые расходятся и сходятся в общих точках, рассчитываются при условии равенства потерь по всем параллельным участкам, т.е.:

$$h_{\text{пот1}} = h_{\text{пот2}} = h_{\text{потn}}$$

При этом расходы в точках расхождения и схождения параллельных ветвей равны сумме расходов по отдельным ветвям:

$$G = G_1 + G_2 + G_n$$

Следовательно можно сделать вывод:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{K_1}{K_2} \sqrt{\frac{l_2}{l_1}} = \frac{K_1}{K_3} \sqrt{\frac{l_3}{l_1}} = \frac{K_1}{K_n} \sqrt{\frac{l_n}{l_1}}$$

При условии постоянства давления по сечению потока скорость истечения идеальной жидкости через отверстие в тонкой стенке рассчитывается по формуле Торичелли:

$$v_0 = \sqrt{2gH}$$

Где v_0 – скорость истечения жидкости, м/с;

H – превышение уровня жидкости над центром отверстия, м;

Для реальной жидкости скорость истечения несколько меньше теоретической, что учитывается коэффициентом скорости $\varphi = 0,97 \div 0,98$:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}$$

Расход идеальной жидкости G_0 через отверстие определяется по формуле:

$$G_0 = v_0 F = F \sqrt{2gH}$$

Где F – площадь выходного отверстия, м².

При расчете расхода реальной жидкости через конкретный внешний насадок вводят коэффициент расхода μ :

$$G = \mu G_0$$

μ определяется по справочным таблицам в зависимости от типа насадка.

Тема 5.4. Местные потери напора в трубах. Потери напора при внезапных изменениях сечения трубопровода.

Местные потери напора в трубах

Потери напора в местных сопротивлениях определяют по формуле Вейсбаха:

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g}$$

k_m – безразмерный коэффициент местного сопротивления.

v – средняя скорость в сечении, как правило, расположенном ниже по течению за данным сопротивлением.

Значения коэффициентов местных сопротивлений зависят от конфигурации местного сопротивления и режима потока, подходящего к сопротивлению. Этот режим определяется коэффициентом гидравлического трения λ подходящего потока, т.е. числом Рейнольдса и относительной шероховатостью.

При движении воды и воздуха влияние числа Рейнольдса на значения коэффициентов местных сопротивлений проявляется не всегда и в практических расчетах его часто можно не учитывать. Более заметным становится влияние чисел Рейнольдса при малых их значениях, а также при постепенном изменении величины или направления скорости (закругленный поворот, плавный вход в трубу и прочее).

Потери напора при внезапном изменении сечения трубопровода.

Внезапное расширение трубопровода. Потери напора при внезапном расширении трубопроводов находят по формуле Борда:

$$h_{\text{вн.р.}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = k_{\text{вн.р.1}} \frac{v_1^2}{2g} = k_{\text{вн.р.2}} \frac{v_2^2}{2g}$$

Где v_1 и v_2 - средние скорости течения соответственно до и после расширения.

$k_{\text{вн.р.1}}$ и $k_{\text{вн.р.2}}$ определяются по следующим формулам:

$$k_{\text{вн.р.1}} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2$$

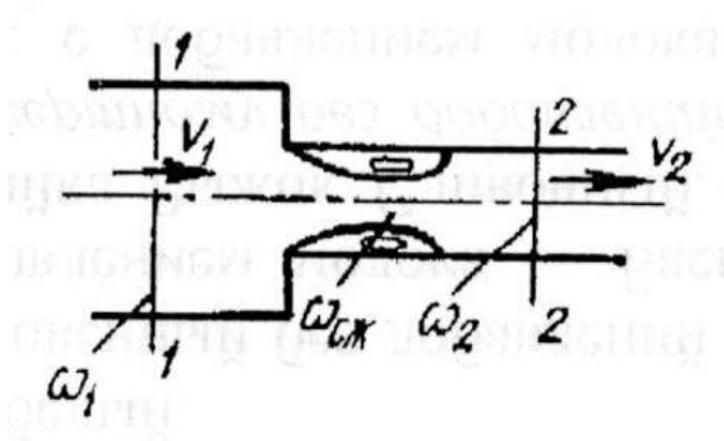
$$k_{\text{вн.р.2}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2$$

ω_1 и ω_2 – площади сечений трубопровода соответственно до и после расширения.

Внезапное сужение трубопровода. Коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении:

$$k_{\text{вн.с.}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2$$

Где ε - коэффициент сжатия струи, представляющий собой отношение площади сечения сжатой струи в узком трубопроводе $\omega_{сж}$ к площади сечения узкой трубы ω_2



$$\varepsilon = \omega_{сж} / \omega_2$$

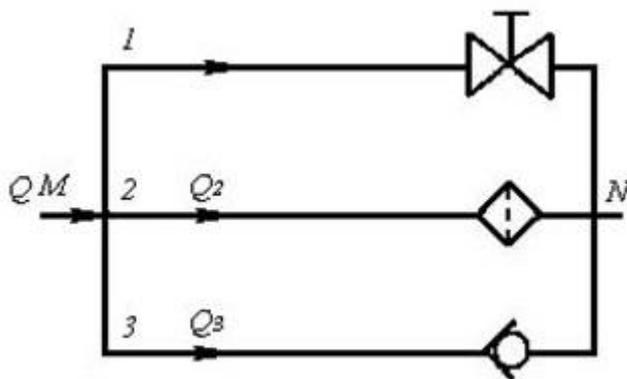
Коэффициент сжатия струи ε зависит от степени сжатия потока:

$$n = \omega_2 / \omega_1$$

и может быть найден по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}$$

При параллельном соединении простых трубопроводов потери напора в отдельных ветвях разветвления равны:



$$h_1 = h_2 = h_3 = h_n$$

Расходы по отдельным ветвям распределяются в соответствии с зависимостью:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{K_1}{K_2} \sqrt{\frac{l_2}{l_1}}$$

K - расходная характеристика.

Диафрагма на трубопроводе. Коэффициент местного сопротивления диафрагмы, расположенной внутри трубы постоянного сечения определяется из выражения:

$$k_{\text{диафрагмы}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon_{\text{диафр.}}} - 1 \right)^2$$

$n = \omega_0/\omega$ - отношение площади отверстия диафрагмы к площади сечения трубы.

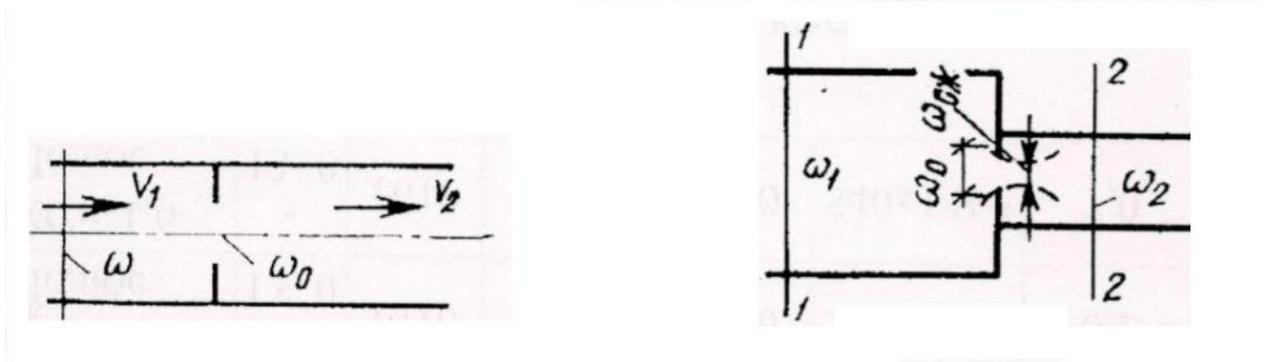


Рисунок – Диафрагма на трубе постоянного сечения и при изменении диаметра трубы.

Для диафрагмы, расположенной на выходе в трубопровод другого диаметра:

$$k_{\text{диафрагмы}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon_{\text{диафр.}}} - \frac{1}{m} \right)^2$$

Где $m = \omega_2/\omega_1$ $n_{\text{диаф}} = \omega_0/\omega_1$

$k_{\text{диафрагмы}}$ – коэффициент сопротивления, отнесенный к сечению узкого трубопровода.

Вход в трубу из резервуара. Для коэффициента сопротивления следует принимать следующие значения:

- при острых кромках = 0,4-0,5
- при закругленных = 0,2
- при весьма плавном входе = 0,05

Выход из трубы в резервуар, в реку и др. Коэффициент сопротивления равен:

$$k_{\text{вых}} = \frac{v_1^2}{2g}$$

v_1 – средняя скорость течения воды в трубе.

При выходе из трубы через диафрагму в конце трубопровода коэффициент определяется как:

$$k_{\text{вых}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon} \right)^2$$

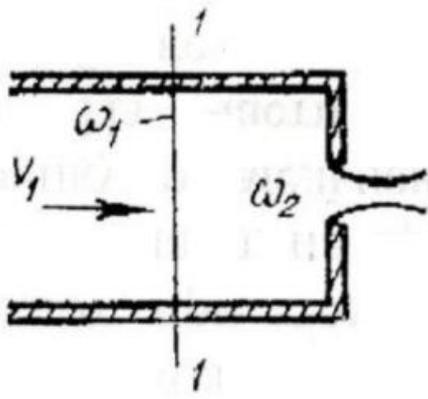


Рисунок – выход из трубы через диафрагму

Сварные стыки на трубопроводах. Коэффициент сопротивления стыка может быть найден по формуле:

$$k_{ст} = 14 \left(\frac{\delta}{d} \right)^{3/2}$$

δ – эквивалентная высота сварного стыка;

Для стыков с подкладными кольцами = 5 мм,

Для стыков электродуговой и контактной сварки = 3 мм.

Возрастание сопротивления, вызываемое стыками можно определить как:

$$K = 1 + \frac{k_{ст} d}{\lambda l}$$

$K = \lambda_1 / \lambda$ – относительное увеличение сопротивления трубопровода, т.е. отношение сопротивления трубопровода со стыками к сопротивлению трубопровода без стыков.

l – расстояние между стыками (длина труб)

Тема 5.5. Потери напора при постепенных изменениях сечения трубопровода.

Постепенное расширение трубопровода. Коэффициент для конически расходящихся переходных конусов (диффузоров) зависит от угла конусности и соотношении диаметров. Для коротких конусов коэффициент сопротивления, отнесенный к более широкому сечению можно найти как:

$$k_{п.р.} = K_{п.р.} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$$

$K_{п.р.}$ - коэффициент смягчения при постепенном расширении, зависящий от угла конусности.

Постепенное сужение трубопровода.

$$k_{п.с.} = K_{п.с.} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2$$

$K_{п.с.}$ – коэффициент смягчения, зависит от угла конусности.

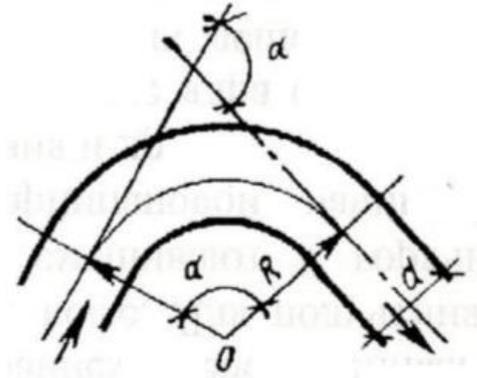
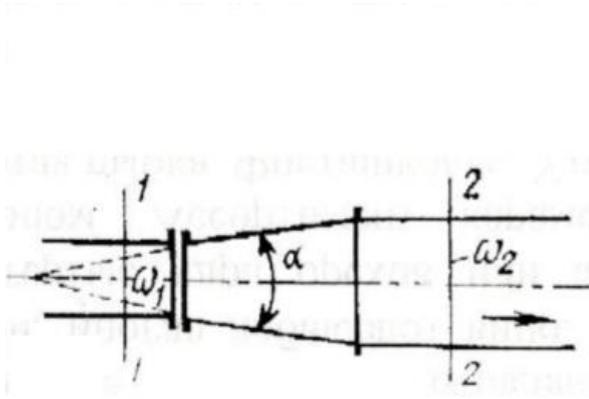


Рисунок – постепенное расширение трубопровода и плавный поворот трубы.

Потери напора при повороте трубы.

Резкий поворот трубы круглого поперечного сечения на угол α

$$k = k_{90}(1 - \cos \alpha)$$

k_{90} – значение коэффициента для угла 90 градусов для ориентировочных расчетов =1.

Потери напора в запорных устройствах трубопроводов.

$$k = \left(\frac{\omega}{\omega_0 \varepsilon} - 1 \right)^2$$

ω_0 - площадь сечения, не стесненная запорным устройством.

ω - площадь сечения трубы.

Потери напора в сетках.

Для сеток с квадратными ячейками:

$$k = \frac{92 - 78m}{Re_\alpha} + 0,7 (1,05 - m)$$

Где $m = \alpha^2/t^2$ - коэффициент скважности сетки

α - размер стороны ячейки сетки

t - шаг сетки

$Re_\alpha = v\alpha/\nu$

v - средняя скорость в ячейках.

Тема 5.6. Потери при малых числах Рейнольдса. Взаимное влияние местных сопротивлений. Кавитация в местных сопротивлениях.

Лекция проводится в интерактивной форме: просмотр и обсуждение видеоролика (1 час).

Местные потери в трубах при малых числах Рейнольдса.

Приведенные выше формулы относятся к турбулентному течению с большими числами Рейнольдса, когда влияние вязкости жидкости представляет себя в слабой степени. При движении жидкости с малыми числами Рейнольдса коэффициенты местных сопротивлений зависят не только от геометрических характеристик сопротивления, но и от числа Рейнольдса и могут быть при ориентировочных расчетах найдены по формуле Альтшуля:

$$k = \frac{A}{Re} + k_{\text{кв}}$$

$k_{\text{кв}}$ - коэффициент местного сопротивления в квадратичной области;
 Re – число Рейнольдса, отнесенное к нестесненному сечению трубопровода.
 A – параметр, зависящий от вида местного сопротивления.

Взаимное влияние местных сопротивлений

Местные потери напора часто суммируют в соответствии с так называемым принципом наложения потерь, согласно которому полная потеря напора представляет собой арифметическую сумму потерь, вызываемых отдельными сопротивлениями. Принцип наложения потерь дает надежные результаты лишь в случае, если расстояние между отдельными местными сопротивлениями достаточно велико для того, чтобы потери напора от одного сопротивления не влияли на потери в следующем сопротивлении. Для этого необходимо, чтобы местные сопротивления стояли друг от друга не ближе чем на расстоянии, определяемом по формуле:

$$\frac{l_{\text{вл}}}{d} = \frac{12}{\sqrt{\lambda}} - 50$$

$l_{\text{вл}}$ – длина влияния местного сопротивления;
 λ – коэффициент гидравлического трения трубы, на которой расположено местное сопротивление.

Эта формула действительна для турбулентного движения. При больших числах Рейнольдса в первом приближении

$$\frac{l_{\text{вл}}}{d} = (30 \div 40)d$$

При малых числах Рейнольдса (большие значения λ) взаимное влияние местных сопротивлений проявляется слабее, длина влияния имеет меньшую величину и приближенно может быть оценена по формуле:

$$\frac{l_{\text{вл}}}{d} = 1,25\sqrt{Re}$$

Иногда местные потери напора выражают в виде эквивалентной длины l_3 прямого участка трубопровода, гидравлическое сопротивление которого равно местному сопротивлению:

$$h = \lambda \frac{l_3 v^2}{d 2g} = k \frac{v^2}{2g}$$

откуда

$$\frac{l_3}{d} = \frac{k}{\lambda}$$

Поскольку коэффициент гидравлического трения λ зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости, эквивалентная длина при одном и том же значении коэффициента k может иметь различные значения в зависимости от величины λ

Кавитация в местных сопротивлениях

В местных сопротивлениях размеры проходных сечений, как правило, меньше, чем в трубопроводе, на котором эти сопротивления установлены. Во многих местных сопротивлениях поток испытывает дополнительное сжатие при отрыве от стенок. Увеличение скоростей вместе стеснения потока приводит к падению давления и возникновению опасности кавитации (возникновение пузырьков воздуха, т.е. парообразование в потоке жидкости, сопровождающееся шумом и гидравлическими ударами). Кавитация образуется в случае если абсолютное давление жидкости в сопротивлении станет равным давлению насыщенных паров. Давление насыщенных паров возрастает с увеличением температуры. При возникновении кавитации коэффициенты местных сопротивлений возрастают.

Возникновение и развитие кавитации характеризуется безразмерным числом кавитации:

$$x = \frac{2(p_1 - p_{н.п.})}{\rho v_1^2}$$

p_1 и v_1 – давление и скорость в некотором сечении потока.

При достижении предельно допустимого числа кавитации (критического) $x_{кр}$ в сопротивлении начинается кавитация. Значения критического числа кавитации для разных местных сопротивлений определяются экспериментально. Они связаны с коэффициентом местного сопротивления в бескавитационном режиме. В первом приближении для местных сопротивлений, вызванных изменением сечения потока, можно предложить зависимость:

$$x_{кр} = k + 2\sqrt{k}$$

k – коэффициент местного сопротивления.

Зная критическое число кавитации $x_{кр}$ для рассматриваемого местного сопротивления, можно определить предельно допустимую скорость перед сопротивлением по формуле:

$$v_{пр} \leq \sqrt{\frac{2(p_1 - p_{н.п.})}{\rho x_{кр}}}$$

Для скоростей течения, не превышающих $v_{пр}$ коэффициент местного сопротивления можно определять без учета кавитации.

Раздел 6. Течение жидкости и идеального газа.

Тема 6.1. Определяющие параметры газовых потоков. Скорость звука.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 час).

Скоростью звука называют скорость распространения волны очень малой интенсивности, т.е.

$$a = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{\Delta \rho}\right)_s}$$

Скорость звука определяет зависимость между изменением давления и плотности в волне и скоростью распространения волны.

При малой интенсивности волны потери в ней отсутствуют и поэтому распространение звуковой волны (а практически – и волн конечной, но малой интенсивности) можно рассматривать как изоэнтропическое течение. Соответственно этому индекс S в формуле подчёркивает, что производная должна браться при постоянной энтропии.

Скорость звука зависит от физических свойств газа и его температуры.

$$\alpha = \sqrt{kzRT}$$

Сопло Лавала для получения сверхзвуковых скоростей.

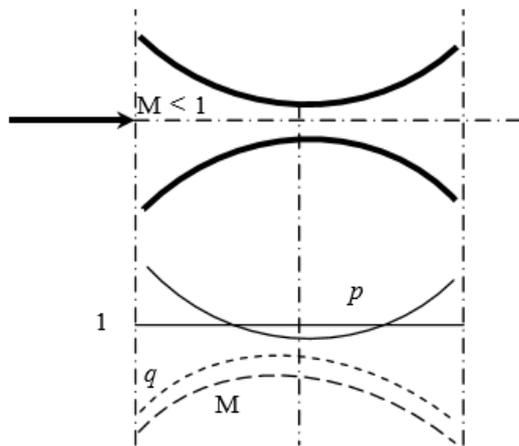


Рис. 7.2. Дозвуковое течение

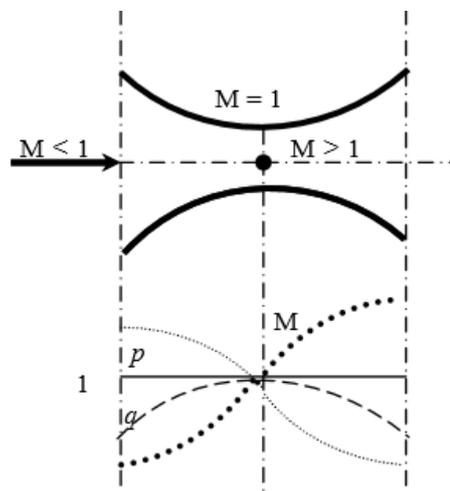


Рис. 7.3. Сверхзвуковое течение

Характер изменения скорости в канале переменного сечения зависит от числа M – числа Маха:

$$\frac{du}{u} = \frac{\frac{d\omega}{\omega}}{M^2 - 1}$$

Если течение дозвуковое, то $M^2 - 1 < 0$ и отрицательной производной $\frac{d\omega}{\omega}$ соответствует положительная производная $\frac{du}{u}$. Другими словами, в случае истечения газа при дозвуковых скоростях, как и в случае несжимаемой жидкости, уменьшение площади проходного сечения вызывает увеличение скорости истечения. Отличия по сравнению с течением несжимаемой жидкости только количественные.

При сверхзвуковом течении $M^2 - 1 > 0$ и $+\frac{d\omega}{\omega}$ соответствует $+\frac{du}{u}$. Т.е. увеличение площади проходного сечения канала вызывает также увеличение скорости истечения газа или жидкости.

Таким образом, в диффузоре дозвуковой поток замедляется, а сверхзвуковой – ускоряется, т.е. число Маха $M = 1$ является границей, начиная с которой наблюдается изменение в характере течения.

Тема 6.2. Скачки уплотнения

Скачки уплотнения.

Одним из существенных свойств сверхзвукового потока является возможность существования ударных волн. Ударная волна или скачок уплотнения – это область сверхзвукового течения, в которой происходит резкое уменьшение его скорости и рост давления, температуры плотности и энтропии. Толщина ударной волны мала – порядка

средней длины свободного пробега молекул. При решении многих задач газовой динамики толщиной ударной волны пренебрегают.

Ударная волна, скачок уплотнения, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью тонкая переходная область, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости газа. Ударные волны возникают при взрывах, при сверхзвуковых движениях тел. Ударная волна, в которой вектор скорости набегающего потока направлен по нормали к поверхности разрыва параметров, называется прямым скачком уплотнения. В прямом скачке уплотнения линия тока не изменяет своего направления, поэтому течение можно считать одномерным. Косым скачком называется такое течение, вектор скорости направлен под острым углом к фронту ударной волны. При косом скачке уплотнения происходит поворот вектора скорости на некоторый угол φ . Плоскость разрыва параметров (скачка) располагается по отношению к вектору скорости набегающего потока под углом β . При обтекании сверхзвуковым потоком клина течение вдоль боковой поверхности клина отделяется от набегающего потока плоским скачком уплотнения, идущим от вершины клина. При углах раскрытия клина, больших некоторого предельного, скачок уплотнения становится криволинейным, отходит от вершины клина и за ним появляется область с дозвуковой скоростью течения газа. Такая картина течения характерна для сверхзвукового обтекания тел с тупой головной частью

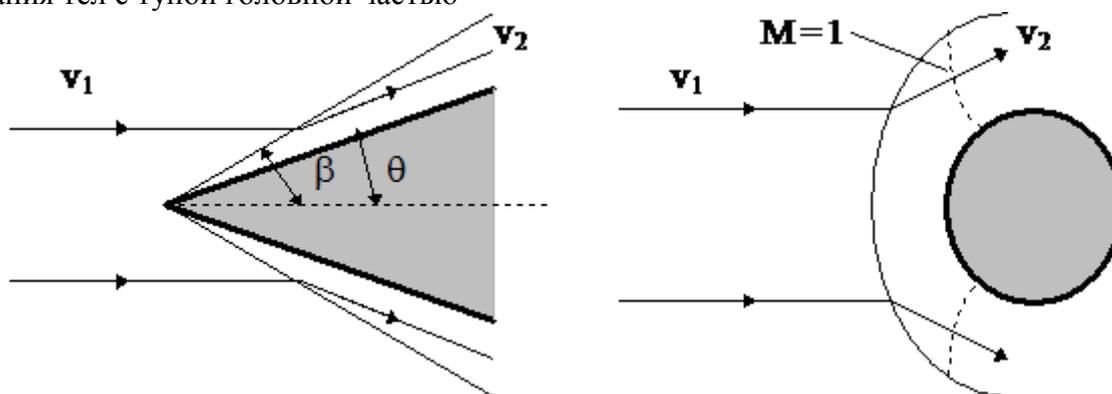


Рисунок – обтекание тел сверхзвуковым потоком

Классическим примером возникновения и распространения ударных волн в газе - это сжатие газа в трубе поршнем. Если поршень вдвигается в газ медленно, то по газу со скоростью звука распространяется акустическая (упругая) волна сжатия. Если скорость поршня соизмерима со скоростью звука, возникает ударная волна. Скорость распространения ударной волны по невозмущенному газу больше скорости движения частиц газа, которая совпадает со скоростью поршня.

При теоретических исследованиях толщиной ударной волны пренебрегают, фронт ударной волны заменяют поверхностью разрыва, считают, что при прохождении через ударную волну параметры газа изменяются скачком.

Значения параметров газа по обе стороны скачка связаны соотношениями, вытекающими из законов сохранения массы, импульса и энергии :

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2,$$

$$p_1 + \rho_1 v_1^2 = p_2 + \rho_2 v_2^2,$$

$$\varepsilon_1 + p_1 / \rho_1 + v_1^2 / 2 = \varepsilon_2 + p_2 / \rho_2 + v_2^2 / 2,$$

где p, ρ, ε - соответственно давление, плотность и удельная внутренняя энергия газа, индексом 1 отмечены параметры до ударной волны, 2 - за ударной волной.

Исключая из равенств скорости, можно получить уравнение ударной адиабаты

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 1/2(p_2 - p_1)(V_1 - V_2),$$

$$w_2 - w_1 = 1/2(p_2 - p_1)(V_1 + V_2),$$

где $V = 1/\rho$ - удельный объем, $w = \varepsilon + p/\rho$ - удельная энтальпия.

Если известны термодинамические свойства вещества, т.е. функция $\varepsilon(p, \rho)$ или $w(p, \rho)$, то ударная адиабата дает зависимость конечного давления p_2 от конечного объема V_2 при ударном сжатии газа из начального состояния p_1, V_1 , т.е. зависимость

$$p_2 = H(V_2, p_1, V_1)$$

При переходе через ударную волну энтропия вещества s меняется, причем скачок энтропии $s_2 - s_1$ для данного вещества определяется только законами сохранения, которые допускают существование двух режимов: скачка сжатия ($r_2 > r_1$, $p_2 > p_1$) и скачка разрежения ($r_2 < r_1$, $p_2 < p_1$). В обычных веществах энтропия возрастает только в ударных волнах сжатия, поэтому ударная волна разрежения не реализуется (теорема Цемплена).

Ударная волна распространяется по невозмущенному газу со сверхзвуковой скоростью $v_1 > a_1$ (где a_1 - скорость звука в невозмущенном газе) тем большей, чем больше интенсивность ударной волны, т.е. чем больше $(p_2 - p_1)/p_1$. При стремлении интенсивности ударной волны к нулю скорость ее распространения стремится к a_1 . Скорость ударной волны относительно сжатого газа, находящегося за ней, является дозвуковой: $v_2 < a_2$ (где a_2 - скорость звука в сжатом газе за ударной волной).

Тепловые и конденсационные скачки в потоке.

В условиях концентрированного выделения теплоты термодинамические параметры и скорости газа изменяются скачкообразно, т.е. образуется тепловые скачки.

(конденсация паров в движущемся газе, горение, детонация)

Анализ течения газа через фронт теплового скачка проводят, считая скачок прямым, в рамках модели идеального газа. Граничные условия непрерывности потоков массы и импульса определяются как:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$$

$$\rho_1 v_1^2 + p_1 = \rho_2 v_2^2 + p_2$$

Условие непрерывности потока энергии содержит дополнительное слагаемое – удельную энергию q , выделяемую на скачке:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} + q = h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

В общем случае идеальный газ за фронтом теплового скачка имеет иной химический состав, нежели перед скачком. Поэтому уравнения состояния газа до и после скачка различны:

$$p_1 = \rho_1 R_1 T_1$$

$$p_2 = \rho_2 R_2 T_2$$

Реальные тепловые скачки бывают двух типов:

- 1) Сверхзвуковые скачки, в которых выделение тепла сопровождается сжатием газа
- 2) Дозвуковые скачки, в которых выделение теплоты сопровождается разряжением газа.

В зависимости от пространственной ориентации фронта скачка по отношению к скорости потока тепловые скачки также могут быть косыми и криволинейными.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Инструктаж по технике безопасности. Особенности выполнения лабораторных работ по гидрогазодинамике, способы и приборы для измерения давления и расхода жидкостей и газов.	2	Разбор конкретных ситуаций (2 час.)
2	1.	Определение коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах	4	-
4	5.	Определение потерь напора по длине трубы	4	-
5	5.	Определение потерь напора при внезапном расширении потока	4	-
6	5.	Определение потерь напора при внезапном сужении потока	4	-
ИТОГО			18	2

4.4. Семинары/ практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем в часах</i>	<i>Вид занятия в интеракт. форме</i>
1	1.	Определение размерностей параметров в гидрогазодинамике. Свойства жидкостей. Получение навыков использования справочными пособиями.	2	Дискуссия (1 час.)
2	2.	Силы, действующие в жидкости, распределение и измерение гидростатических давлений.	4	-
3	4.	Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Режим течения жидкости в трубах. Гидравлический удар.	4	-
4	5.	Приёмы решения задач для потоков при наличии гидравлических сопротивлений	4	-
ИТОГО			18	1

4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа (для заочной формы обучения)

Цель: углубление теоретических знаний и развитие практических навыков студентов по самостоятельному и грамотному выполнению расчетов простых и сложных трубопроводов.

Структура: для выполнения контрольной работы студенту выдается индивидуальное задание, согласно которому нужно выполнить 2 задания: №1 – графоаналитически определить пропускную способность трубопровода; №2 – определить общий перепад давления водопровода.

Рекомендуемый объем: контрольная работа выполняется в письменном или печатном виде, объем 5-6 страниц. Приводятся полные и краткие условия задач, их решения согласно варианту задания.

Выдача задания, прием КР и защита КР проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
зачтено	Выполнены все задания, могут иметься 1-2 несущественных недочета, не повлиявшие на конечный результат решения, работа хорошо оформлена
не зачтено	Не выполнены все задания или выполненная часть заданий содержит ошибки, приведшие к неправильным ответам.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенция</i>	Σ <i>комп.</i>	$t_{ср}$ <i>час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ОПК-1</i>				
1	2	3	5	6	7	8
1. Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов	28	+	1	28	Лк, ПЗ, ЛР	экзамен
2. Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов	28	+	1	28	Лк, ПЗ	экзамен
3. Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.	18	+	1	18	Лк, ЛР	экзамен
4. Динамика вязкой жидкости	36	+	1	36	Лк, ПЗ	экзамен
5. Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления	54	+	1	54	Лк, ПЗ, ЛР	экзамен
6. Течение жидкости и идеального газа	16	+	1	16	Лк	экзамен
<i>Всего часов</i>	180	180	1	180		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Жуков Н.П. Гидрогазодинамика: учебное пособие / Н.П. Жуков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011.– 92 с. [Электронный ресурс].- URL: <http://ecat.brstu.ru/catalog/Ресурсы%20свободного%20доступа/Жуков%20Н.П.Гидрогазодинамика.Учеб.%20пособие.2011.pdf>

2. Кулагин В.А. Гидрогазодинамика: электрон. учеб. пособие / В. А. Кулагин, Е. П. Грищенко. – Электрон. дан. (6 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. [Электронный ресурс].- URL:<http://ecat.brstu.ru/catalog/Ресурсы%20свободного%20доступа/Кулагин%20В.А.Гидрогазодинамика.Учеб.пособие.2009.pdf>

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Жуков Н.П. Гидрогазодинамика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.П. Жуков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 92 с. [Электронный ресурс].- URL: http://ecat.brstu.ru/catalog/Ресурсы%20свободного%20доступа/Жуков%20Н.П.Гидрогазодинамика.Учеб.%20пособие.2011.pdf	Лк, ПЗ, ЛР	ЭР	1
Дополнительная литература				
2.	Кулагин В.А. Гидрогазодинамика [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. А. Кулагин, Е. П. Грищенко. – Электрон. дан. (6 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. [Электронный ресурс].- URL: http://ecat.brstu.ru/catalog/Ресурсы%20свободного%20доступа/Кулагин%20В.А.Гидрогазодинамика.Учеб.пособие.2009.pdf	Лк, ПЗ, ЛР	ЭР	1
3	Механика жидкости и газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. В.С. Швыдкого. – М.:ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.	Лк, ЛР	20	1
4.	Кудинов В.А. Гидравлика: Учеб. пособие/ В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 199 с.: ил.	Лк, ЛР	9	1
5.	Задачник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов /Б.Б. Некрасов, И.В. Фатеев, Ю.А. Беленков и др.; Под ред. Б.Б. Некрасова. – М.: Высш. шк., 1989. – 192 с.: ил.	ПЗ	81	1
6.	Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями: Учеб. пособие для вузов/ В.Н. Метревели. – Высш. шк., 2007.– 192 с.: ил.	ПЗ	18	1
7.	Гутчинский Л.Ф. Гидрогазодинамика. Определение потерь напора по длине трубы и на местных сопротивлениях : методические указания к выполнению лабораторных работ / Л.Ф. Гутчинский. – Братск : Изд-во БрГУ, 2012. – 24 с.	ЛР	94	1

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog>.
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru>.
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com>.
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru>.
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>.
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/>.
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных/практических работ

Лабораторная работа №1

Определение коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах

Цель работы:

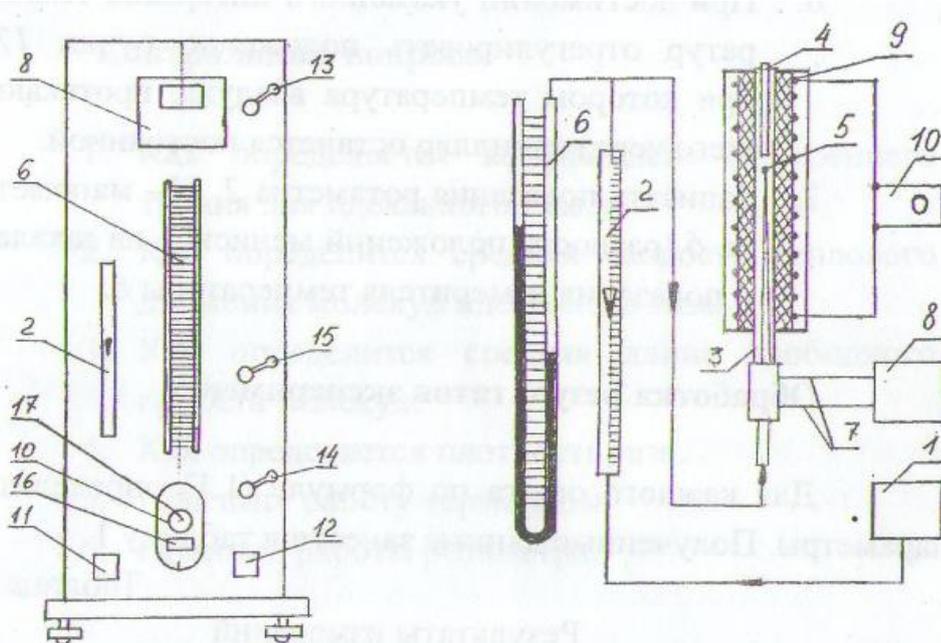
Экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха методом, основанным на истечении воздуха через капилляр.

Задание:

1. Изучить основные зависимости при течении воздуха.
2. Получить практические навыки по определению коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах.

Порядок выполнения:

Лабораторная работа производится на установке, изображенной на рисунке 9.1.



Включаем электропитание установки тумблером 1. Включаем компрессор 1 тумблером 14, измеритель температуры 8 тумблером 13. Включаем питание регулятора температуры 10 тумблером 12 и нажатием клавиши 16. Поворачиваем со щелчком ручку 17 регулятора температуры по часовой стрелке и устанавливаем его метку в среднее положение. По показаниям измерителя температуры 8 наблюдаем её увеличение до 200-220 градусов. При достижении указанного интервала температур регулируем положение ручки 17, при котором температура воздуха, протекающего через капилляр останется постоянной. Записываем показания ротаметра 2, U-манометра 6 (разность положений менисков на шкале) и показания измерителя температуры 8. Данные заносим в таблицу, проводим необходимые расчеты.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Краткое описание и схема установки
4. таблицу экспериментальных данных
5. расчеты по определению показателей
6. выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 1.2 и 1.3 раздела 1.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 3, 4, 8] .

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Как определяется коэффициент внутреннего трения для идеального газа.
2. Как определится средняя скорость теплового движения молекул идеального газа.
3. Как определится средняя длина свободного пробега молекул.
4. Как определяется плотность газа.
5. Поясните работу термодвигателя.
6. Принцип работы ротаметра.
- 7.

Лабораторная работа №2 Определение потерь напора по длине трубы

Цель работы:

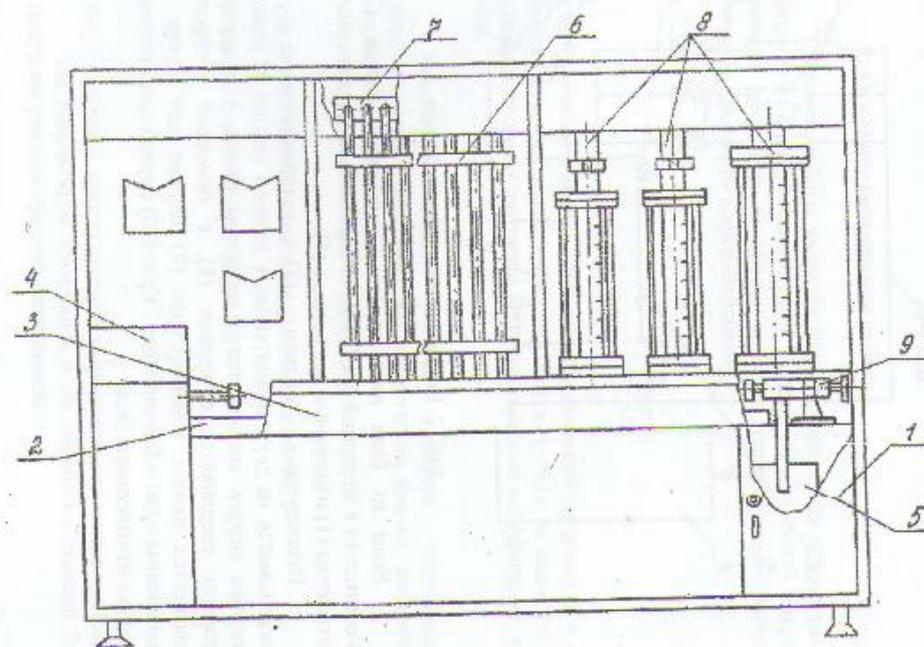
Экспериментальная иллюстрация формулы, определяющей связь потерь механической энергии потока жидкости по длине трубы с параметрами трубы и течения.

Задание:

1. Изучить теоретические сведения о потерях напора.
2. Получить практические навыки по определению потерь напора по длине трубы.

Порядок выполнения:

Лабораторная работа производится на установке ТМЖ-2, изображенной на рисунке 9.3.



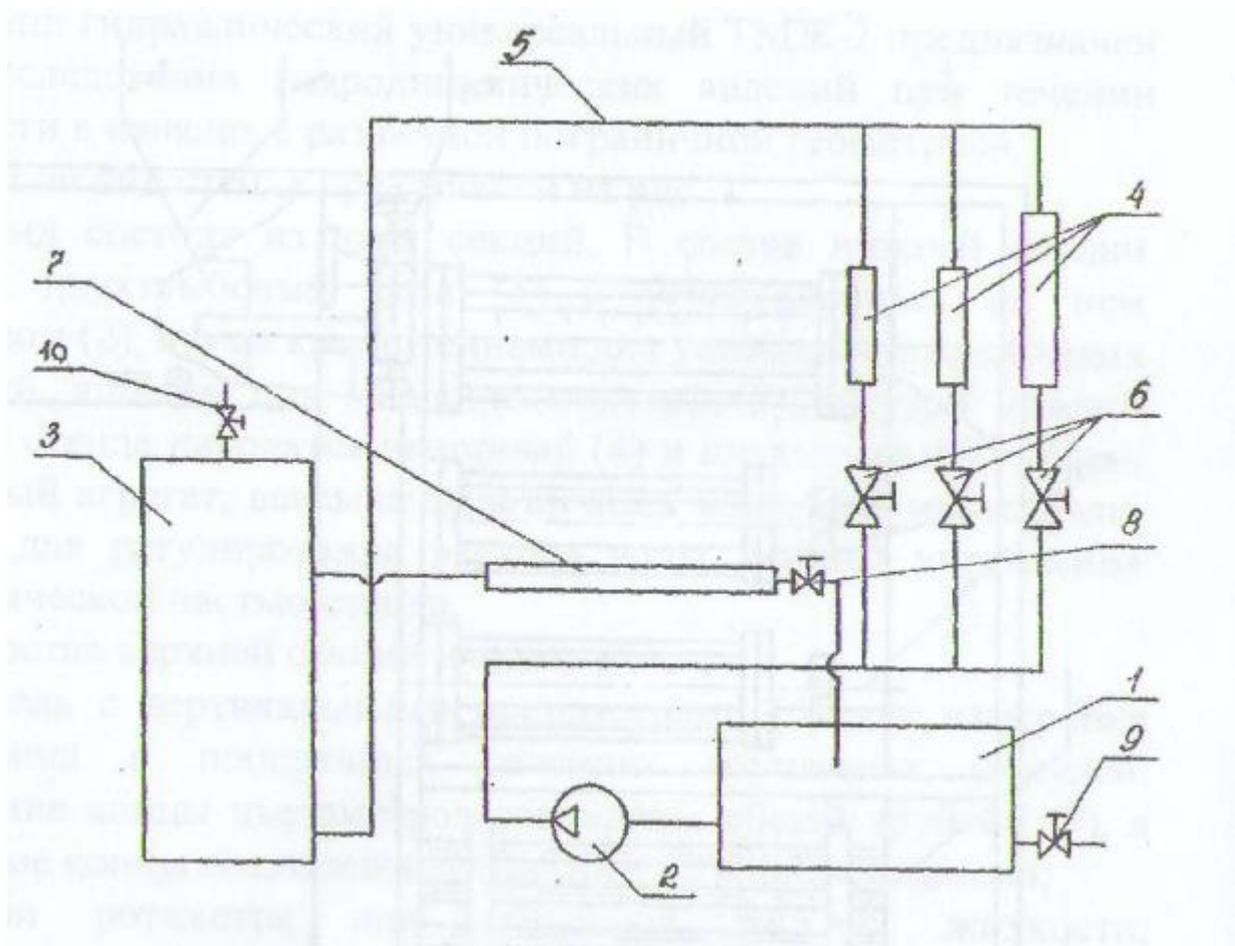
Стенд состоит из двух секций. В состав нижней секции входят двухтумбовый стол 1 с установленным на нем поддоном 2, двумя кронштейнами для установки исследуемых модулей, ящиком для хранения модулей 3. Внутри нижней секции стенда находятся напорный 4 и питательный 5 баки, насосный агрегат, всасывающая и часть напорной магистрали, краны для регулирования расхода воды, органы управления электрической частью стенда.

В состав верхней секции входят:

- панель с вертикальными пьезометрами 6 для измерения давления в поперечных сечениях изучаемых модулей. Верхние концы пьезометров соединены общей трубкой 7, а нижние концы соединены штуцерами на внешней панели;
- три ротаметра для измерения расхода жидкости, протекающей через модули 8;
- кран для регулирования расхода жидкости, протекающей через модуль 9;
- напорный трубопровод с диафрагмой для измерения больших расходов. Перепад давления на диафрагме измеряется с помощью двух пьезометров, установленных на вертикальной панели;
- планшеты для размещения справочных материалов.

Порядок выполнения измерений:

Перепад напоров на исследуемом участке трубы L определяется путем измерений пьезометрических напоров в двух сечениях. Для этого служат пьезометры, размещенные на приборной панели и соединенными гибкими трубками со штуцерами отверстий в стене трубы в двух сечениях. Расход измеряется с помощью ротаметров, каждый из которых предназначен на определенный диапазон расходов, указанных на приборах.



Для выполнения работы следует освободить зажим на воздуховыпускной трубке 10 (рисунок 9.4) и, пустив насос включателем, выждать несколько минут, пока наполнится напорный бачок 3, о чем будет свидетельствовать появление потока воды из воздуховыпускной трубки. После этого следует зажать эту трубку зажимом и открыть вентиль 8, регулирующий подачу воды в рабочий модуль. Наблюдая за столбиками воды в двух пьезометрах, убедиться, что достигнут установившийся режим течения и произвести измерения:

- расхода воды по ротаметрам, учитывая, что при некоторых расходах включаются одновременно два ротаметра и тогда расход определяется как сумма расходов через каждый из них;
- показания двух пьезометров.

Результаты измерений заносятся в таблицу, проводятся необходимые вычисления.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. титульный лист
2. цель лабораторной работы
3. необходимы рисунки, схемы, графики
4. основные расчетные формулы
5. таблицы измерений и расчетных данных
6. выводы

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.4 раздела 5.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 3, 4, 7] .

Контрольные вопросы для самопроверки

1. При каком режиме движения жидкости абсолютная шероховатость не оказывает влияния на сопротивление по длине? В каком случае это влияние определяющее?
2. Какое влияние оказывает увеличение температуры на величину коэффициента трения в области абсолютно шероховатых труб? В области гидравлических гладких труб? При ламинарном режиме?
3. Чему равен коэффициент трения при движении в области гидравлически гладких труб, если $Re = 10000$? Как изменится величина коэффициента трения при увеличении абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубы? (режим – ламинарный).
4. Зависят ли потери на трение от вязкости при движении в области абсолютно шероховатых труб? В области гидравлически гладких труб? При ламинарном режиме?
5. От каких параметров зависит коэффициент гидравлического трения в области шероховатых труб?
6. Как изменится толщина ламинарного слоя при увеличении скорости движения жидкости? Вязкости? Диаметра трубопровода?
7. Нарисуйте график зависимости потерь давления по длине трубопровода от средней скорости:
 - при ламинарном режиме;
 - в области абсолютно шероховатых труб.
8. Во сколько раз уменьшатся потери давления по длине трубопровода при уменьшении скорости движения жидкости в два раза при ламинарном режиме?

Лабораторная работа №3

Определение потерь напора при внезапном расширении трубы

Цель работы:

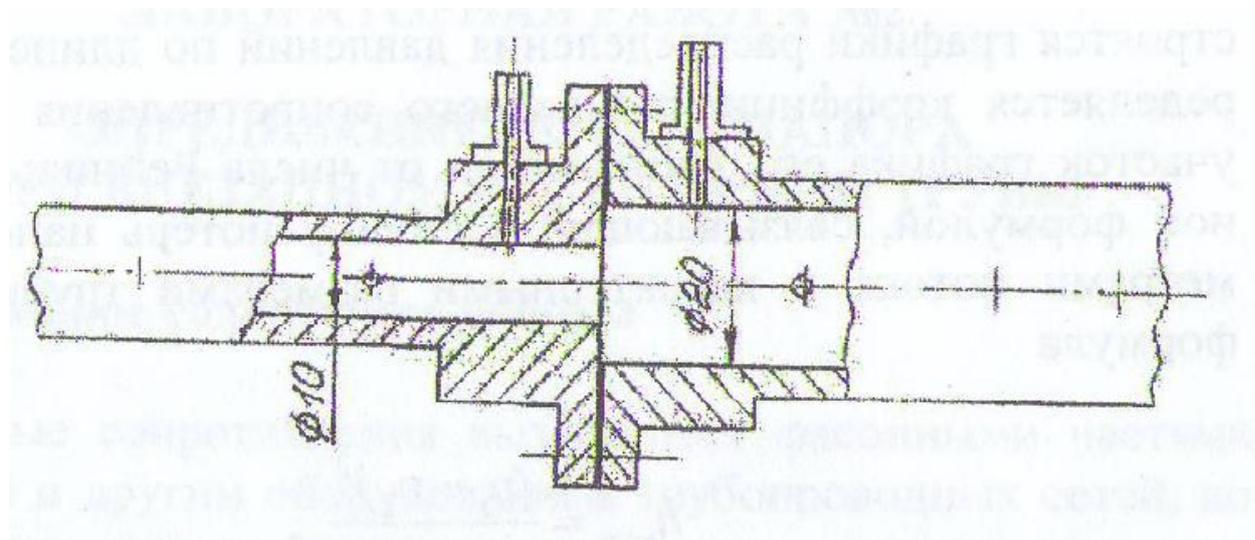
Экспериментальное изучение закономерностей потерь напора и распределения давлений в местных сопротивлениях, конкретным видом которых является расширение трубы.

Задание:

1. Изучить теоретические сведения о потерях напора в местных сопротивлениях.
2. Получить практические навыки по определению потерь напора при внезапном расширении трубы.

Порядок выполнения:

Лабораторная работа производится на установке ТМЖ-2. Модуль №2, изображенный на рисунке 9.5.



Включив насос стенда, необходимо дождаться освобождения напорного бачка от воздуха. Затем устанавливается фиксированный расход воды, и производятся измерения давлений по пьезометрам, присоединенным к штуцерам, расположенным в разных сечениях трубы. Расход измеряется с помощью ротаметра.

После проведения измерений в первом режиме, расход изменяется с помощью вентиля 8 и, после установления установившегося режима, все измерения повторяются. Для надежной серии опытов рекомендуется произвести измерения не менее, чем в трех режимах для трех значений расходов. Далее результаты заносим в таблицу, выполняем необходимые расчеты.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

7. титульный лист
8. цель лабораторной работы
9. необходимы рисунки, схемы, графики
10. основные расчетные формулы
11. таблицы измерений и расчетных данных
12. выводы

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.4 раздела 5.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 3, 4, 7] .

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Виды местных сопротивлений.
2. Признак местного сопротивления.
3. Формула Вейсбаха.
4. Как выразить местные потери напора через эквивалентную длину прямого участка трубопровода?
5. Вывод формулы Борда.
6. Формула для коэффициента внезапного расширения.
7. Во сколько раз изменится коэффициент местного сопротивления внезапного расширения если диаметр выходного сечения увеличить в 2 раза?
8. Как изменятся потери напора на внезапном расширении если расход жидкости увеличить в два раза?

Лабораторная работа №4

Определение потерь напора при внезапном сужении трубы

Цель работы:

Экспериментальное изучение закономерностей потерь напора и распределения давлений в местных сопротивлениях, конкретным видом которых является сужение трубы.

Задание:

3. Изучить теоретические сведения о потерях напора в местных сопротивлениях.
4. Получить практические навыки по определению потерь напора при внезапном сужении трубы.

Порядок выполнения:

Работа выполняется на модуле №3, схема которого изображена на рис. 6.

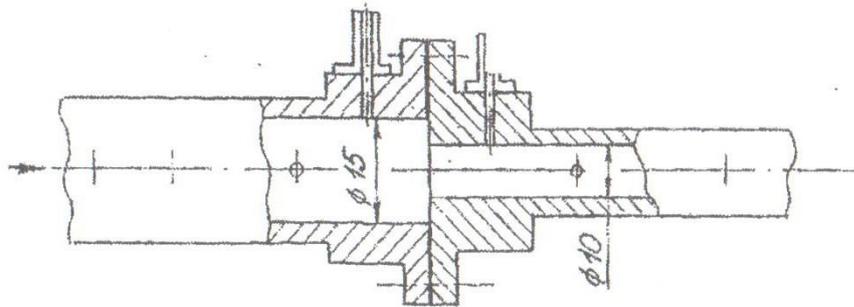


Рис. 6. Модуль №3 (внезапное сужение)

Порядок выполнения работы и измерений – тот же, что и в работе №5. Следует сделать не менее 3-х опытов при разных расходах, для каждого из которых построить пьезометрическую линию. Для обнаружения зависимости коэффициента от числа Рейнольдса таких опытов должно быть сделано значительно больше.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

13. титульный лист
14. цель лабораторной работы
15. необходимы рисунки, схемы, графики
16. основные расчетные формулы
17. таблицы измерений и расчетных данных
18. выводы

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.4 раздела 5.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 3, 4, 7] .

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Виды местных сопротивлений.
2. Признак местного сопротивления.
3. Формула Вейсбаха.
4. Как выразить местные потери напора через эквивалентную длину прямого участка трубопровода?
5. Формула для коэффициента внезапного сужения.
6. Во сколько раз изменится коэффициент местного сопротивления внезапного сужения если диаметр входного сечения увеличить в два раза?
7. Как изменятся потери напора на внезапном сужении если диаметр начального сечения уменьшить в два раза?

Практическое занятие №1
Определение размерностей параметров в гидрогазодинамике. Свойства жидкостей.
Получение навыков использования справочными пособиями.

Цель работы:

Решение задач по данной тематике.

Пример задачи:

Манометр, установленный на водопроводе, показывает давление 2 кгс/см². Определить, чему равно абсолютное давление, измеренное в Па, м.вод.ст. и мм.рт.ст. Атмосферное давление принять равным $P_{атм} = 1 \text{ кгс/см}^2$.

Решение:

$$P_{абс} = P_{изб} + P_{атм}$$

$$P_{абс} = 2 + 1 = 3 \text{ кгс/см}^2$$

$$1 \text{ м}^2 = 10000 \text{ см}^2$$

$$1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}$$

$$1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$$

$$P_{абс} = 3 \cdot 9,81 \cdot 10000 = 294300 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 294300 \text{ Па} = 0,29 \text{ МПа}$$

$$P = \rho_e g h$$

$$h = \frac{P}{g \rho_e}$$

$$\rho_e = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$h = \frac{294300}{9,81 \cdot 1000} = 30 \text{ м. вод. ст.}$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$$

$$h = \frac{294300}{9,81 \cdot 13600} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ мм.рт.ст.}$$

$$1 \text{ Па} = 0,0075 \text{ мм рт. ст.}$$

Форма отчетности:

Решение задач оформляется и сдается в печатном или рукописном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Условия задач
3. Решение
4. Необходимые выводы

Задания для самостоятельной работы:
Предусмотрены вариантом студента.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6] .

Практическое занятие №2
Силы, действующие в жидкости, распределение и измерение гидростатических давлений.

Цель работы:
Решение задач по данной тематике.

Пример задачи:

Вертикальный цилиндрический резервуар емкостью 3,14 м³ и высотой 4 м заполнен водой. Определить силы давления на боковую стенку и дно резервуара.

Решение:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi h}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,14}{3,14 \cdot 4}} = 1 \text{ м}$$

$$P_{\text{ст}} = \rho g \frac{h}{2} \cdot Dh = 1000 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 = 78,4 \text{ кН}$$

$$F_{\text{дна}} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$P_{\text{дна}} = \rho g h \cdot F_{\text{дна}} = P_{\text{дна}} = \rho g h \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 1000 \cdot 9,8 \cdot 4 \cdot \frac{3,14 \cdot 1}{4} = 30,7 \text{ кН}$$

Форма отчетности:

Решение задач оформляется и сдается в печатном или рукописном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Условия задач
3. Решение
4. Необходимые выводы

Задания для самостоятельной работы:
Предусмотрены вариантом студента.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6] .

Практическое занятие №3
Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Режим течения жидкости в трубах.
Гидравлический удар.

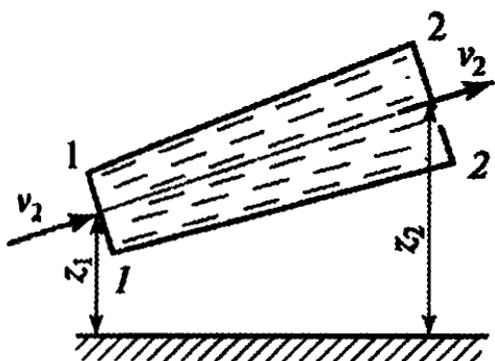
Цель работы:

Решение задач по данной тематике.

Пример задачи:

Расход идеальной жидкости относительной плотности $\delta=0,860$ в расширяющемся трубопроводе в диаметрах $d_1 = 480$ мм и $d_2 = 942$ мм равен $Q = 0,18$ м³/сек. Разница в позициях центра сечений равна 2 м. Показание манометра в сечении 2-2 равно $3 \cdot 10^5$ Н/м². Нужно определить скорость жидкости в сечениях 1-1 и 2-2, давление p_2 в сечении 1-1. Плотность воды берем 1000, режим течения турбулентный, потери напора равны 0.

Решение:



$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

$$v_1 = \frac{0,18 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,48^2} = 0,995 \text{ м/с}, v_2 = 0,258 \text{ м/с}$$

Находим плотность жидкости:

$$\rho_{ж} = \rho_{ж} \delta = 1000 \cdot 0,860 = 860 \text{ кг/м}^3$$

Уравнение Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Поделим на g и ρ :

$$z_1 \rho g + p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

$$p_1 = (z_2 \rho g - z_1 \rho g) + p_2 + \left(\frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2} \right)$$

$$p_1 = \rho g (z_2 - z_1) + p_2 + \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

$$p_1 = 860 \cdot 9,8 \cdot 2 + 3 \cdot 10^5 + \frac{860}{2} (0,258^2 - 0,995^2) = 3,1645 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$$

Форма отчетности:

Решение задач оформляется и сдается в печатном или рукописном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Условия задач
3. Решение
4. Необходимые выводы

Задания для самостоятельной работы:
Предусмотрены вариантом студента.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6] .

Практическое занятие №4

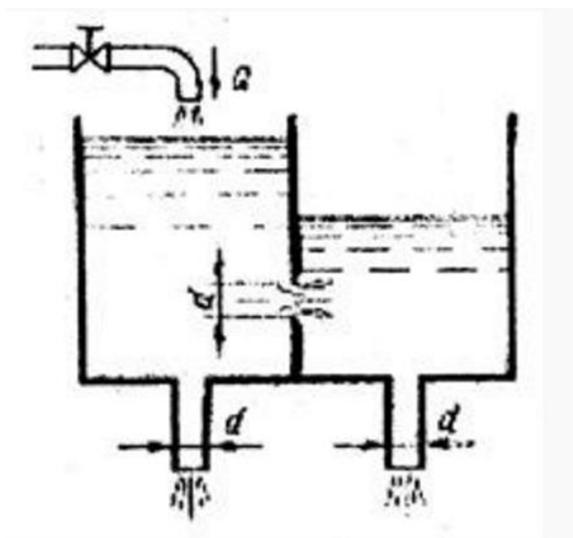
Приёмы решения задач для потоков при наличии гидравлических сопротивлений

Цель работы:

Решение задач по данной тематике.

Пример задачи:

В бак, разделенный на две секции перегородкой, имеющей отверстие диаметром 100 мм с острой кромкой, поступает вода в количестве 80 л/сек. Из каждой секции вода вытекает через цилиндрический насадок, диаметр которого равен диаметру отверстия в перегородке. Определить расход через каждый насадок при установившемся режиме. Значения коэффициентов конструкции труб для отверстия = 0,6, для насадков 0,82.



Решение:

$$Q = Q_{\text{отв}} + Q_{\text{насадка}}$$

$$Q_{\text{отв}} = \varphi_{\text{отв}} \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} \sqrt{2gh}$$

$$Q_{\text{нас лев}} = \varphi_{\text{нас}} \frac{\pi d_{\text{нас}}^2}{4} \sqrt{2gh}$$

$$\frac{Q_{\text{нас лев}}}{Q_{\text{отв}}} = \frac{0,82}{0,6} = 1,366$$

$$Q_{\text{нас лев}} = 1,366 Q_{\text{отв}}$$

$$Q = Q_{\text{отв}} + 1,366 Q_{\text{отв}} = 2,366 Q_{\text{отв}}$$

$$Q_{\text{отв}} = \frac{Q}{2,366} = \frac{80}{2,366} = 33,8 \text{ л/сек}$$

$$Q_{\text{нас лев}} = 80 - 33,8 = 46,2 \text{ л/сек}$$

$$Q_{\text{нас прав}} = 33,8 \text{ л/сек}$$

Форма отчетности:

Решение задач оформляется и сдается в печатном или рукописном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Условия задач
3. Решение
4. Необходимые выводы

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6] .

9.2. Методические указания по выполнению контрольной работы

Выполнение контрольной работы является важнейшей формой учебной работы и способствует закреплению и углублению знаний, полученных обучающимися на лекциях и практических занятиях, воспитывает навыки самостоятельной творческой работы и ведения инженерных расчетов.

Данные методические указания призваны помочь обучающимся выполнить 2 задачи по расчетам простых и сложных трубопроводов.

Задача №1. Графоаналитически определить пропускную способность трубопровода, если известен начальный напор, длина трубопровода, его внутренний диаметр, разность геодезических отметок, плотность и кинематическая вязкость перекачиваемой жидкости.

Каждому студенту выдается задание согласно варианту.

Таблица: Исходные данные.

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напор, м	160	120	110	90	105	115	110	180	110	105
Длина, м	2000	2500	2000	1000	1500	2000	1800	2000	1200	8000
Диаметр, мм	95	110	146	95	113	100	100	109	100	311
Кинематическая вязкость, $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	0,076	0,2	0,2	0,076	0,2	0,25	1	0,59	0,25	0,137
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2
Объемные расходы, $\text{м}^3/\text{с}$										
$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	0,018	0,018	0,02	0,025	0,03	0,012	0,013	0,016	0,012	0,1
$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	0,016	0,016	0,025	0,022	0,025	0,013	0,014	0,018	0,014	0,12
$Q_3, \text{м}^3/\text{с}$	0,014	0,014	0,03	0,02	0,022	0,014	0,015	0,019	0,016	0,14
$Q_4, \text{м}^3/\text{с}$	0,012	0,012	0,04	0,018	0,02	0,015	0,016	0,02	0,018	0,16
$Q_5, \text{м}^3/\text{с}$	0,01	0,01	0,05	0,016	0,018	0,016	0,017	0,022	0,02	0,18

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Напор, м	100	230	125	425	95	1100	65	45	70	105
Длина, м	1000	2000	1000	3000	2500	6000	2000	1000	900	4500
Диаметр, мм	100	100	100	105	256	95	112	93	235	146
Кинематическая вязкость, $10^{-4} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	0,25	0,28	0,25	0,2	0,08	0,65	0,14	0,076	0,25	0,09
Абсолютная эквивалентная шероховатость Δ , мм	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1
Объемные расходы, $\text{м}^3/\text{с}$										
$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	0,012	0,018	0,03	0,01	0,1	0,025	0,012	0,018	0,1	0,03
$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	0,014	0,019	0,025	0,015	0,12	0,022	0,014	0,016	0,12	0,025
$Q_3, \text{м}^3/\text{с}$	0,016	0,02	0,02	0,02	0,14	0,02	0,016	0,014	0,14	0,02
$Q_4, \text{м}^3/\text{с}$	0,018	0,021	0,015	0,025	0,16	0,018	0,018	0,012	0,16	0,015
$Q_5, \text{м}^3/\text{с}$	0,02	0,022	0,01	0,03	0,18	0,016	0,02	0,01	0,18	0,01

Решение задачи производится по следующему алгоритму:

1. Определяется площадь сечения трубопровода:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

где d – диаметр трубопровода, м.

2. Определяется скорость течения жидкости при различных расходах:

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

где Q – объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$.

3. Определяется число Рейнольдса и режим движения жидкости:

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$$

ν – коэффициент кинематической вязкости ($\nu = 0,165 \cdot 10^{-4}$)

4. При использовании лекционного материала при определенном режиме движения жидкости определяется коэффициент внутреннего трения. Например при $10 \frac{d}{\Delta} < Re < 500 \frac{d}{\Delta}$ необходимо применить формулу:

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

где Δ – абсолютная шероховатость, мм

5. Определяются напор при различных расходах жидкости:

$$h = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g}$$

6. Строим график $h=f(Q)$ и графоаналитически определяем пропускную способность трубопровода при известном начальном напоре.

Задача №2. В начало трубопровода поступает вода для водоснабжения потребителей. Трубопровод имеет 3 точки отбора с определенными расходами. Требуется определить общий перепад давления. Водопровод расположен горизонтально и местных сопротивлений не имеет.

Каждому студенту выдается задание согласно варианту.

Таблица: Исходные данные.

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина трубопровода, км	10	8	6	12	15	7	5	9	4	3
Длина первого участка, м	3500	2000	3000	6000	5000	1500	2000	3000	1000	1000
Длина второго участка, м	1000	2000	500	2000	3000	2500	1000	3000	1000	1000
Диаметр трубопровода, мм	205	219	312	426	426	312	217	219	247	219
Массовый расход воды, т/ч	180	200	250	270	260	240	210	230	190	235
Температура воды, °С	50	60	80	70	90	60	100	70	80	50
Отбор на 1 участке, т/ч	30	50	40	45	50	40	20	45	25	35
Отбор на 2 участке, т/ч	40	20	40	30	20	30	30	45	35	50
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,15	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,01

Исходные данные	Варианты									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Длина трубопровода, км	9	5	11	14	6	9	4	10	4	7
Длина первого участка, м	4200	1000	2500	6300	3000	1500	2000	5000	1500	3000
Длина второго участка, м	1000	3200	3500	2600	1000	4500	500	2800	1000	1300
Диаметр трубопровода, мм	200	319	242	405	426	290	215	236	247	370
Массовый расход воды, т/ч	180	160	230	370	210	340	110	230	220	235
Температура воды, °С	50	60	80	70	90	60	100	70	80	50
Отбор на 1 участке, т/ч	40	35	50	45	30	20	40	35	45	25
Отбор на 2 участке, т/ч	30	15	20	40	15	10	30	45	25	30
Абсолютная эквивалентная шероховатость, мм	0,12	0,1	0,15	0,1	0,11	0,01	0,15	0,14	0,16	0,03

Таблица: Зависимость динамической вязкости и плотности от температуры воды.

Температура воды, °С	Динамическая вязкость μ , Па·сек, 10^{-3}	Плотность, кг/м ³
0	1,787	999,9
5	1,519	1000
10	1,307	999,7
20	1,002	998,2
30	0,798	995,7
40	0,653	992,2
50	0,547	988,1
60	0,467	983,2
70	0,404	977,8
80	0,355	971,8
90	0,315	965,3
100	0,282	958,4

Алгоритм решения данной задачи заключается в представлении сложного трубопровода состоящим из нескольких участков, различающихся по величине расходов. Каждый участок рассчитывается отдельно как простой трубопровод. Общий перепад давления равен сумме потерь давления по участкам.

1. Определяется скорость воды до первой точки отбора:

$$\omega_1 = \frac{Q}{S} = \frac{4G}{(\pi d^2) \rho}$$

2. Определяется режим движения на данном участке:

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

3. Определяется коэффициент гидравлического трения в зависимости от режима движения жидкости.

4. Определяются потери давления на участке:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \rho$$

5. По описанным ранее формулам определяют потери давления на остальных участках с учетом последовательных отборов жидкости. В качестве ответа указывается суммарный перепад давления в трубопроводной сети.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Microsoft Imagine Premium
2. ОС Windows 7 Professional
3. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level
4. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security
5. Adobe Reader
6. Архиватор 7-Zip
7. Для самостоятельной работы предусмотрен читальный зал №3 (1 корпус, ауд. 1001). Оборудование 15 ПК-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР</i>
1	2	3	4
Лк	Лекционная аудитория	Меловая доска	№1-18
ЛР	Гидрогазодинамика	Действующий стенд гидравлического универсального ТМЖ-2	№№2-4
		Действующая установка по определению коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах	№1
СР	Читальный зал №3	15 ПК-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005.	-
ПЗ	Дисплейный класс	AMD Athlon 64 (5GHz/250Gb/2Gb/DD-RW), 2 ядра	№1-5

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-1	способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий	1. Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов	1.1. Предмет и задачи гидрогазодинамики 1.2. Основные свойства жидкостей и газов 1.3. Молекулярная структура и особенности жидкого и газообразного состояний	Экзаменационные вопросы 1-7
		2. Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов	2.1. Силы, действующие в жидкости. Основное уравнение гидростатики. Силы давления жидкости, действующие на плоские и криволинейные стенки. 2.2. Гипотеза сплошности среды 2.3. Свойства напряжений поверхностных сил 2.4. Основные понятия о движении жидкости	Экзаменационные вопросы 8-15
		3. Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.	3.1. Понятия линии тока, траектории частицы, трубки тока, установившегося и неустановившегося движения 3.2. Подобие гидромеханических процессов. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения 3.3. Одномерные потоки жидкостей и газов. Уравнение Даниила-Бернулли	Экзаменационные вопросы 16-24
		4. Динамика вязкой жидкости	4.1. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения Бернулли 4.2. Теория пограничного слоя. Уравнение пограничного слоя в дифференциальной форме 4.3. Уравнение пограничного слоя в интегральной форме 4.4. Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя 4.5. Турбулентный пограничный слой 4.6. Распределение скоростей по сечению потока	Экзаменационные вопросы 25-36
		5. Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления	5.1. Характеристики потерь напора. Измерение скорости потока 5.2. Определение расхода в каналах произвольных сечений. Формула Дарси, Пуазейля и др. 5.3. Гидравлический расчет трубопроводов 5.4. Местные потери напора в	Экзаменационные вопросы 37-49

			трубах. Потери напора при внезапных изменениях сечения трубопровода	
			5.5.Потери напора при постепенных изменениях сечения трубопровода	
			5.6.Потери при малых числах Рейнольдса. Взаимное влияние местных сопротивлений. Кавитация в местных сопротивлениях	
		6. Течение жидкости и идеального газа	6.1.Определяющие параметры газовых потоков. Скорость звука	Экзаменационные вопросы 50-54
			6.2.Скачки уплотнения	

2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела	
	Код	Определение			
1	2	3	4	5	
1.	ОПК-1	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1.Основные физические свойства жидкостей. Определение жидкостей; плотность жидкостей; удельный вес; сжимаемость и температурные расширения жидкостей.	1.Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов	
			2.Закон Ньютона. Динамическая вязкость. Кинематическая вязкость. Гипотеза Ньютона о вязкостном трении. Вязкость в условных градусах Энглера.		
			3.Поверхностное натяжение жидкостей, формула Лапласа. Поверхностное натяжение в капиллярных трубках.		
			4.Пластичные жидкости. Ньютоновские жидкости.		
			5.Методы и приемы изучения механики жидкости и газа.		
			6.Молекулярная структура и особенности жидкого и газообразного состояний; силы притяжения и отталкивания.		
			7.Основные уравнения кинетической теории газов.		
			8.Основные определения гидростатики (поверхностные и массовые силы, гидростатическое давление).		2. Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов
			9.Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля.		
			10.Силы, действующие в покоящейся жидкости на плоские стенки. Сила суммарного давления жидкости на плоские поверхности.		
			11.Сила суммарного давления жидкости на цилиндрические поверхности (центр давления, полная сила давления, объем тела давления).		
			12.Закон Архимеда и его приложения. Водоизмещение.		3.Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости.
			13.Гипотеза сплошности среды. Длина свободного пробега молекул.		
			14.Свойства напряжений поверхностных сил.		
			15.Основные понятия о движении жидкости (живое сечение, смоченный периметр, расход, скорость, гидравлический радиус. Установившееся и неустановившееся движение).		
			16.Идеальная жидкость. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения.		
			17.Уравнение неразрывности течения (уравнение постоянства расхода).		
			18.Ламинарное и турбулентное течение жидкости. Критерий Рейнольдса.		
			19.Ламинарное течение жидкости в круглой трубе с		

			<p>прямой осью.</p> <p>20. Установившееся и неустановившееся движение жидкости.</p> <p>21. Линии тока и траектории.</p> <p>22. Трубка тока (поверхность тока).</p> <p>23. Уравнение Д. Бернулли для движения идеальной жидкости.</p> <p>24. Одномерные потоки жидкости и газа.</p>	
			<p>25. Реальная жидкость. Интегральная форма количества движения и момента количества движения.</p> <p>26. Турбулентное течение, гипотеза связи пульсационных составляющих со средней скоростью потока.</p> <p>27. Уравнение Д. Бернулли для движения реальной жидкости. Физический и геометрический смысл уравнения Д. Бернулли.</p> <p>28. Модели турбулентных течений. Уравнения Рейнольдса для турбулентных потоков.</p> <p>29. Уравнения Навье-Стокса.</p> <p>30. Основные понятия и определения пограничного слоя.</p> <p>31. Ламинарный пограничный слой на пластине.</p> <p>32. Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя.</p> <p>33. Уравнение пограничного слоя в интегральной форме.</p> <p>34. Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный.</p> <p>35. Турбулентный пограничный слой на пластине.</p> <p>36. Распределение скоростей по сечению потока. Особенности движения жидкости в начальном участке трубы.</p>	4. Динамика вязкой жидкости
			<p>37. Измерение скорости потока в открытом канале и закрытых трубопроводах. Трубка Пито-Прандтля.</p> <p>38. Измерение расхода потока в каналах произвольных сечений с помощью водомера Вентури.</p> <p>39. Гидравлические сопротивления. Потери напора на трение по длине трубопровода. Формула Дарси-Вейсбаха.</p> <p>40. Местные потери напора в трубах. Гидравлический удар.</p> <p>41. Потери напора при внезапном (резком) изменении сечения трубопровода.</p> <p>42. Расчет длинных трубопроводов при квадратичном законе сопротивления.</p> <p>43. Потери напора при постепенном изменении сечения трубопровода.</p> <p>44. Потери напора при повороте трубы.</p> <p>45. Местные потери в трубах при малых числах Рейнольдса. Взаимное влияние местных сопротивлений.</p> <p>46. Кавитация в местных сопротивлениях.</p> <p>47. Простые трубопроводы. Методика расчета.</p> <p>48. Сложные трубопроводы. Методика расчета.</p> <p>49. Истечение жидкостей через отверстия и насадки.</p>	5. Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления
			<p>50. Определяющие параметры газовых потоков. Скорость звука.</p> <p>51. Сопло Лавалья для получения сверхзвуковых скоростей.</p> <p>52. Прямые скачки уплотнения.</p> <p>53. Косые скачки уплотнения.</p> <p>54. Тепловые и конденсационные скачки в потоке.</p>	6. Течение жидкости и идеального газа

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать (ОПК-1) - Основные физические свойства жидкостей и газов, общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов, особенности физического и математического моделирования одномерных и трехмерных, дозвуковых и сверхзвуковых, ламинарных и турбулентных течений идеальной и реальной несжимаемой и сжимаемой жидкостей.</p> <p>Уметь (ОПК-1) - Рассчитывать гидродинамические параметры потока жидкости (газа) при внешнем обтекании тел и течения в каналах (трубах), проточных частях гидрогазодинамических машин, проводить гидравлический расчет трубопроводов.</p> <p>Владеть (ОПК-1) - Методиками проведения типовых гидродинамических расчетов гидромеханического оборудования и трубопроводов.</p>	отлично	Оценка «отлично» выставляется в случае, если обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал и демонстрирует: - всестороннее знание программного материала; - умение правильного применения основных положений программного материала; - владеет всеми навыками, полученными в ходе изучения программного материала.
	хорошо	Оценка «хорошо» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует: -недостаточно полное знание программного материала; - применение с несущественными ошибками основных положений программного материала
	удовлетворительно	Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует частичное знание программного материала; неоднократно допускал ошибки в ответе
	неудовлетворительно	Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, если уровень владения программным материалом не отвечает требованиям; все вышеуказанные разделы не усвоены.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Гидрогазодинамика направлена на изучение физических основ гидравлических явлений и методов теоретического определения статических, кинематических и динамических характеристик жидкостей, находящихся в состоянии относительного покоя и движения, освоение гидравлических расчетов трубопроводов и технологического оборудования.

Изучение дисциплины Гидрогазодинамика предусматривает:

- лекции;
- лабораторные занятия;
- практические занятия;
- контрольную работу;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 «Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов» студенты должны уяснить:

- основные цели и задачи гидрогазодинамики;
- основные свойства жидкостей и газов;
- в чем состоит структура и особенности жидкого и газообразного состояний, основные зависимости.

В ходе освоения раздела 2 «Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов» студенты должны уяснить:

- какие силы действуют в жидкости, их определение, основные зависимости и методики изучения;

- основные понятия о движении жидкости.

В ходе освоения раздела 3 «Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости» студенты должны уяснить:

- основные понятия, такие как: идеальная и реальная жидкость, линия тока, траектория частицы, установившееся и неуставившееся движение и др.;

- основные уравнения динамики жидкости, лишенной вязкости.

В ходе освоения раздела 4 «Динамика вязкой жидкости» студенты должны уяснить:

- основные уравнения и зависимости, применимые к вязкой жидкости;

- в чем состоит понятие пограничного слоя в жидкости, его виды и влияние на определение параметров жидкости.

В ходе освоения раздела 5 «Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления» студенты должны уяснить:

- в чем состоит расчет трубопроводов, научиться проводить расчеты простых и сложных трубопроводов;

- какие бывают местные сопротивления в трубопроводах, как они влияют на определение основных параметров жидкости, протекающей в трубопроводах.

В ходе освоения раздела 6 «Течение жидкости и идеального газа» студенты должны уяснить:

- основные понятия и принятые допущения газовой динамики, уравнения сохранения и критерии;

- основные виды скачков уплотнения в газовых потоках и методы их расчета.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Основные физические свойства жидкостей
2. Методы и приемы изучения механики жидкости и газа
3. Основные определения гидростатики
4. Силы, действующие в жидкости и методы их определения
5. Основные понятия о движении жидкости
6. Понятие идеальной жидкости, уравнения количества движения и момента количества движения
7. Уравнение неразрывности течения
8. Ламинарное и турбулентное течение жидкости. Критерий Рейнольдса
9. Установившееся и неуставившееся движение жидкости
10. Уравнение Д. Бернулли для движения идеальной и реальной жидкости
11. Физический и геометрический смысл уравнения Д. Бернулли
12. Уравнения Навье-Стокса
13. Основные понятия и определения пограничного слоя
14. Критическое число Рейнольдса. Отрыв пограничного слоя
15. Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный
16. Распределение скоростей по сечению потока. Особенности движения жидкости в начальном участке трубы
17. Измерение скорости потока в открытом канале и закрытых трубопроводах
18. Измерение расхода потока в каналах произвольных сечений
19. Гидравлические сопротивления, потери напора на трение по длине трубопровода
20. Местные потери напора в трубах. Гидравлический удар
21. Потери напора при внезапном и постепенном изменениях сечения трубопровода
22. Кавитация в местных сопротивлениях
23. Методика расчета простых и сложных трубопроводов
24. Истечение жидкостей через отверстия и насадки

В процессе проведения лабораторных и практических работ происходит закрепление теоретического материала, навыков решения задач Гидрогазодинамики.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные моменты.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (лекции-беседы, лекции с разбором конкретных ситуаций, просмотр и обсуждение видеоматериалов) в сочетании с внеаудиторной работой.

АННОТАЦИЯ **рабочей программы дисциплины**

Гидрогазодинамика

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является: ознакомление студентов с местом и ролью гидрогазодинамики в современном мире, формировать личность студента путём развития их интеллектуальных способностей, в частности логическому мышлению; обучение основным гидрогазодинамическим методам, применяемым в анализе и моделировании типовых процессов и в инженерии.

Задачей изучения дисциплины является: понимание физической сущности явлений, возникающих в покоящихся и движущихся однородных, двухфазных и двухкомпонентных жидких средах; усвоение формальных уравнений, описывающих эти явления; овладение методами использования уравнений для практических задач энергетики.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк 36 ч; Лр 18 ч; ПЗ 18 ч; СР 108 ч.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 216 часа, 6 зачетных единиц

2.2 Основные разделы дисциплины:

- 1 - Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов;
- 2 - Общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов;
- 3 - Кинематика жидкости. Динамика жидкости, лишенной вязкости;
- 4 - Динамика вязкой жидкости;
- 5 - Основы гидравлических расчетов трубопроводов. Местные сопротивления;
- 6 - Течение жидкости и идеального газа;

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- ОПК-1 - Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий

4. Вид промежуточной аттестации: экзамен

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от «___» _____ 20__ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

(Ф.И.О.)

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.13.01 Теплоэнергетика и теплотехника от «01» октября 2015г. № 1081.

для набора 2014 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для заочной формы обучения от «03» июля 2018 г. № 413

для набора 2015 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «04» декабря 2015 г. №771 , заочной формы обучения от «04» декабря 2015 г. №771

для набора 2016 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» июня 2016 г. №429 , заочной формы обучения от «06» июня 2016 г. №429 для заочной формы (ускоренного обучения) от «06» июня 2016 г. № 429

для набора 2017 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» марта 2017 г. №125 , заочной формы обучения от «06» марта 2017 г. №125 для заочной формы (ускоренного обучения) от «04» апреля 2017 г. №203

для набора 2018 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018 г. №130 , заочной формы обучения от «12» марта 2018 г. №130

Программу составил:

Нефедов А.С., ассистент каф. ПТЭ _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ПТЭ

от «13» декабря 2018 г., протокол № 4

Заведующий кафедрой ПТЭ _____

А.А. Федяев

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой ПТЭ _____

А.А. Федяев

Директор библиотеки _____

Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета ЭиА

от «28» декабря 2018 г., протокол № 5

Председатель методической комиссии факультета ЭиА _____

А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления _____

Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____