

УДК 532:627.8  
ББК 30.123  
3-91

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор *Д.В. Штеренлихт*,  
заведующий кафедрой,  
доктор технических наук, профессор *Н.В. Ханов*, профессор,  
кафедра гидравлики, ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
университет природообустройства»;  
кандидат технических наук *Н.К. Пономарев*, заведующий кафедрой,  
доктор технических наук, профессор *Б.А. Животовский*, профессор,  
кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений,  
ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов»;  
доктор технических наук *В.В. Беликов*, начальник отдела численных  
гидравлических исследований ОАО «НИИЭС»

**Зуйков, Андрей Львович.**  
3-91 Гидравлика : учебник : в 2 томах / А.Л. Зуйков ; М-во науки и высшего образования Росс. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — 3-е изд., испр. — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2019 — .  
ISBN 978-5-7264-1817-9  
Т. 1 : Основы механики жидкости. 2019. — 544 с.  
ISBN 978-5-7264-1818-6 (т. 1)

Изложен соответствующий государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлению 08.03.01 Строительство материал курса «Основы механики жидкости», который охватывает первую из трех частей дисциплины «Гидравлика». Раскрыты основные законы равновесия и движения жидкостей.

Для студентов всех уровней, форм и профилей подготовки в высших учебных заведениях по направлению 08.03.01 Строительство, а также аспирантов, инженерно-технических и научных работников в области гидравлики и механики жидкости.

УДК 532:627.8  
ББК 30.123

ISBN 978-5-7264-1818-6 (т. 1)  
ISBN 978-5-7264-1817-9

© Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет, 2019,  
с исправлениями

## О Г Л А В Л Е Н И Е

<b>1. ЖИДКОСТИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА</b>	<b>5</b>
1.1. Предмет механики жидкости	5
1.2. Краткий исторический обзор	8
1.3. Основные физические свойства жидкостей	9
1.4. Силы, действующие на жидкость	17
<b>2. ГИДРОСТАТИКА</b>	<b>19</b>
2.1. Свойства гидростатического давления	19
2.2. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (уравнения Эйлера)	21
2.3. Интегрирование дифференциальных уравнений гидростатики	23
2.4. Поверхности равного давления	24
2.5. Основное уравнение гидростатики и его следствия	25
2.6. Пьезометрическая высота. Вакуум. Измерение давления	31
2.7. Относительный покой жидкости	33
2.8. Давление жидкости на плоскости конечных размеров	38
2.9. Давление жидкости на криволинейные поверхности	44
2.10. Напряжения в стенках труб круглого сечения. Котельная формула	49
2.11. Плавание тел	51
2.11.1. Закон Архимеда	51
2.11.2. Метацентр и метацентрический радиус	55
2.11.3. Статическая остойчивость плавающих тел	58
<b>3. КИНЕМАТИКА ЖИДКОСТИ</b>	<b>62</b>
3.1. Методы описания движения жидкости	62
3.2. Движение бесконечно малой частицы жидкости. Первая теорема Гельмгольца	65
3.3. Линии тока и элементарная струйка жидкости	72
3.4. Уравнение неразрывности (сплошности) в переменных Эйлера	75
3.5. Уравнение неразрывности для элементарной струйки	78
3.6. Уравнение неразрывности в переменных Лагранжа	80
3.7. Поток жидкости	83
3.8. Безвихревое (потенциальное) движение	86
3.8.1. Функция потенциала скорости	86
3.8.2. Плоское потенциальное движение	89
3.8.3. Формы плоских потенциальных течений	97

3.9. Вихревое движение	110
3.9.1. Основные понятия	111
3.9.2. Вторая теорема Гельмгольца	112
3.9.3. Циркуляция скорости. Теорема Стокса	114
3.9.4. Винтовое течение	115
4. ДИНАМИКА НЕВЯЗКОЙ (ИДЕАЛЬНОЙ) ЖИДКОСТИ	120
4.1. Дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости в переменных Эйлера	120
4.2. Дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости в переменных Лагранжа	124
4.3. Преобразование Громеки	130
4.4. Уравнения Гельмгольца для движения невязкой жидкости	132
4.5. Уравнение Бернулли для невязкой жидкости	134
4.5.1. Вывод и области действительности уравнения Бернулли	134
4.5.2. Интерпретация уравнения Бернулли	138
4.5.3. Уравнение Бернулли для неустановившегося движения	141
4.6. Основы теории поверхностных гравитационных волн	145
4.6.1. Классификация волн и терминология	145
4.6.2. Описание гравитационных волн в переменных Эйлера	149
4.6.3. Описание прогрессивных волн в переменных Лагранжа	172
4.6.4. Групповая скорость волн	188
4.6.5. Разрушение волн на «мелководье»	192
4.6.6. Энергия волн	194
5. ДИНАМИКА ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ	197
5.1. Два режима движения вязкой (реальной) жидкости	197
5.2. Уравнения движения вязкой жидкости в компонентах напряжений	202
5.3. Тензор вязких напряжений	206
5.4. Дифференциальные уравнения движения вязкой жидкости (уравнения Навье — Стокса)	211
5.5. Уравнения Громеки — Стокса	216
5.6. Уравнения Гельмгольца для движения вязкой жидкости	217
5.7. Интеграл Бернулли для вязкой жидкости. Диссипация механической энергии	220
5.7.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости в установившемся потоке	220
5.7.2. Интерпретация уравнения Бернулли	222
5.7.3. Уравнение Бернулли для неустановившегося движения вязкой несжимаемой жидкости	224
5.7.4. Установившееся плавно изменяющееся движение	227

5.7.5. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости	229
5.8. Равномерные ламинарные течения	234
5.8.1. Ламинарное течение в круглой трубе	234
5.8.2. Ламинарное течение в слое на наклонной плоскости	244
5.9. Установившееся неравномерное ламинарное течение на начальном участке круглой трубы	253
<b>6. ДИНАМИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ</b>	<b>271</b>
6.1. Турбулентность	271
6.2. Уравнения Рейнольдса	275
6.3. Уравнения Тейлора	282
6.4. Уравнения Гельмгольца при турбулентном движении жидкости	284
6.5. Уравнение Бернулли для турбулентного неустановившегося движения вязкой несжимаемой жидкости	286
6.6. Полуэмпирические теории турбулентности	290
6.6.1. Гипотеза Буссинеска	291
6.6.2. Гипотеза Прандтля	294
6.6.3. Гипотеза Кармана	298
6.6.4. Гипотеза Тейлора	300
6.7. Равномерные турбулентные течения	310
6.7.1. Турбулентное течение в круглой трубе	310
6.7.2. Турбулентное течение в слое на наклонной плоскости	332
6.8. Одномерные течения. Законы сохранения	348
<b>7. ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ И ТЕОРИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ</b>	<b>354</b>
7.1. Силы, действующие на обтекаемое тело	354
7.2. Внешняя задача обтекания тел плоским потенциальным потоком	364
7.2.1. Функции комплексного переменного	364
7.2.2. Примеры плоских потенциальных течений	369
7.2.3. Формулы Чаплыгина для главного вектора и главного момента сил давления на обтекаемое тело	382
7.2.4. Метод конформных отображений	388
7.2.5. Обтекание эллипса и пластины	397
7.2.6. Крыловые профили Жуковского — Чаплыгина	408
7.2.7. Кавитационное обтекание тел	414
7.2.8. Обтекание тел в условиях неустановившегося движения	421
7.3. Теория пограничного слоя	427
7.3.1. Особенности течения жидкости в пограничном слое	427
7.3.2. Уравнения движения жидкости в ламинарном пограничном слое (уравнения Прандтля)	429

7.3.3. Уравнения Мизеса и Крокко _____	435
7.3.4. Задачи расчета и примеры решения уравнений ламинарного пограничного слоя _____	439
7.3.5. Интегральное соотношение ламинарного пограничного слоя _____	452
7.3.6. Отрыв пограничного слоя _____	458
7.3.7. Структура и уравнения турбулентного пограничного слоя _____	462
7.3.8. Расчет турбулентного пограничного слоя _____	464
<b>8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ _____</b>	<b>476</b>
8.1. Виды моделирования _____	476
8.2. Численное моделирование гидродинамических задач _____	478
8.2.1. Численное решение уравнений Навье — Стокса _____	479
8.2.2. Численное моделирование турбулентных течений _____	484
8.2.3. Основные лицензированные программные комплексы _____	487
8.3. Гидравлическое (физическое) моделирование _____	491
8.3.1. Гидромеханическое подобие _____	492
8.3.2. Инспекционный анализ дифференциальных уравнений _____	495
8.3.3. Автомодельность _____	500
8.3.4. Метод анализа размерностей ( $\pi$ -теорема) _____	502
8.4. Средства измерений гидравлических характеристик _____	506
8.4.1. Средства измерения давлений и уровней воды _____	506
8.4.2. Средства измерения скоростей потока _____	510
8.4.3. Средства измерения расхода потока _____	519
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК _____</b>	<b>530</b>
<b>ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ _____</b>	<b>531</b>
<b>ТЕРМИНЫ _____</b>	<b>532</b>