

УДК 532:627.8
ББК 30.123
З-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.
З-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

1. ЖИДКОСТИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА _____	5
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
2. ГИДРОСТАТИКА _____	19
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
3. КИНЕМАТИКА ЖИДКОСТИ _____	62
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
6. ДИНАМИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ	271
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
7. ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ И ТЕОРИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ	354
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
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ _____	476
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 (π -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
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК _____	530
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ _____	531
ТЕРМИНЫ _____	532