



# ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫЕ ОСРЕДНЕННЫЕ ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ

Л. И. Высоцкий  
И. С. Высоцкий



**Л. И. ВЫСОЦКИЙ,  
И. С. ВЫСОЦКИЙ**

# ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫЕ ОСРЕДНЕННЫЕ ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ

Монография

*Издание второе, дополненное*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР  
2021

ББК 30.123я73

В 93

**Высоцкий Л. И., Высоцкий И. С.**

**В 93** Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки: Монография. — 2-е изд., доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 672 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-1866-4**

В монографии изложена новая трактовка многих из известных положений гидравлики продольно-однородных осредненных турбулентных потоков. Основополагающим является утверждение о наличии вблизи гладкой стенки тонкого слоя, в котором коэффициент турбулентной вязкости — величина отрицательная. Из прикладных результатов главным является сквозная для всех зон сопротивлений формула распределения осредненных скоростей.

Монография рассчитана на широкий круг читателей: инженеров, специализирующихся на расчетах трубопроводных систем, научных работников, студентов, магистрантов и аспирантов технических вузов и может служить своеобразным путеводителем по изучению различных аспектов продольно-однородных турбулентных течений.

ББК 30.123я73

Издается в авторской редакции

**Рецензенты:**

*А. И. ЕСИН* — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой гидравлики и гидравлических машин Саратовского государственного аграрного университета;  
*Н. П. ЛАВРОВ* — доктор технических наук, профессор кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Книга удостоена диплома участника  
35 Международного Парижского книжного салона

Обложка  
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2021  
© Л. И. Высоцкий, И. С. Высоцкий, 2021  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
<b>1. КОНСПЕКТ ОСНОВОПОЛАГАЮЩИХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ И ПОНЯТИЙ .....</b>	<b>15</b>
1.1. Жидкости. Их основные свойства.....	16
1.2. Режимы движения жидкости.....	18
1.3. Величины, характеризующие движение жидкости.....	18
1.4. Турбулентное движение жидкости.....	21
1.5. Уравнения, используемые при анализе движения жидкостей и газов .....	23
1.6. Модели потоков жидкости .....	27
1.7. Твердые поверхности. Граничные условия .....	28
1.8. Криволинейные координаты и их использование.....	29
1.9. Альтернативный способ разложения актуальной скорости. Новое представление кинематической турбулентной вязкости.....	30
1.10. О турбулентной вязкости.....	33
<b>2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ РАЗДЕЛОВ ГИДРАВЛИКИ.....</b>	<b>40</b>
2.1. Примеры моделей продольно-однородных течений.....	40
2.2. Турбулентные продольно-однородные течения.....	41
2.3. Турбулентность. Так что же это такое?.....	42
2.4. Механизм поддержания турбулентности.....	47
2.5. Энергия, потребная для поддержания турбулентности.....	49
2.6. К проблеме устойчивости ламинарных течений.....	53
<b>3. КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ И ПЛОСКИХ КАНАЛАХ.....</b>	<b>55</b>
3.1. Общие сведения.....	55
3.2. Исследование потерь на трение в трубах и каналах .....	60
3.3. Исследования распределения осреднённых скоростей в трубах и каналах.....	65
3.3.1. <i>Исследование распределения осреднённых скоростей в каналах.....</i>	<i>65</i>
3.3.2. <i>Исследование распределения осреднённых скоростей в трубах.....</i>	<i>67</i>
3.3.3. <i>Развитие представлений о влиянии степени шероховатости русел.....</i>	<i>71</i>
3.3.4. <i>Исследования распределения осреднённых скоростей в пограничном слое на плоской пластине при нулевом градиенте давления.....</i>	<i>72</i>
<b>4. О ТУРБУЛЕНТНОМ (БУССИНЕСКОВОМ) КИНЕМАТИЧЕСКОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ВЯЗКОСТИ.....</b>	<b>82</b>
4.1. Понятие о турбулентном кинематическом коэффициенте вязкости.....	82
4.2. Роль касательных и нормальных турбулентных напряжений в поддержании турбулентности.....	86
4.3. Современные представления о возможности существования отрицательной турбулентной вязкости .....	95
4.4. Теорема о существовании вблизи гладкой стенки в продольно-однородном турбулентном потоке слоя жидкости с отрицательной турбулентной вязкостью.....	103

4.4.1. Анализ граничных условий на гладкой стенке. Теорема.....	104
4.4.2. Второй метод доказательства существования отрицательной турбулентной вязкости .....	118
4.4.3. Экспериментальные подтверждения существования слоя с контргradientным течением у гладкой стенки в продольно-однородных турбулентных потоках.....	121
4.5. Расширение теоремы о существовании вблизи гладкой стенки в плавно-изменяющемся турбулентном потоке слоя жидкости с контргradientным течением .....	126
4.6. Еще раз об отрицательной турбулентной вязкости.....	135
4.7. Квадрантный анализ возможных соотношений роли касательных турбулентных напряжений в продольно-однородных течениях .....	149
4.7.1. Экспериментальные исследования Е.М. Хабахнашевой и др. [133] .....	149
4.7.2. Исследования Джэра и Шмида [174].....	151
4.8. Влияние неравномерности турбулентного плавноизменяющегося течения при гладких стенках на роль турбулентных касательных и нормальных напряжений.....	154
4.9. Трактовка модели строения продольно-однородного потока при гладких стенках с учетом результатов квадрантного анализа перемежаемости турбулентных напряжений.....	156
4.10. Экспериментальные данные о распределении турбулентной вязкости в продольно-однородных потоках.....	158
4.11. Построение модели распределения турбулентной вязкости по нормали к гладкой стенке в продольно-однородных потоках .....	161
4.12. Теорема о точке перегиба.....	165

<b>5. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ В ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫХ ПОТОКАХ ПРИ ГЛАДКИХ СТЕНКАХ.....</b>	<b>189</b>
5.1. Некоторые сведения о коэффициенте Дарси.....	189
5.1.1. Исходные данные для решения задачи. Оценка формулы Кольбрука – Уайта для определения $\lambda$ .....	189
5.1.2. О применимости формулы Кольбрука – Уайта к плоским потокам.....	200
5.2. Возможные подходы к решению задачи.....	217
5.3. Генерирование идей о распределении турбулентной вязкости и поправок к ним .....	222
5.4. Результаты решения задачи о распределении осредненных скоростей с использованием предлагаемой модели распределения турбулентной вязкости .....	227
5.4.1. Распределение скоростей в пристенном слое.....	227
5.4.2. Распределение скоростей во внутренней зоне турбулентного ядра.....	235
5.4.3. Распределение скоростей во внешней зоне турбулентного ядра.....	237
5.5. Распределение осредненных скоростей в продольно-однородных плоских потоках при гладких стенках .....	238
5.6. Решение задачи о распределении осредненных скоростей в продольно-однородных потоках при шероховатых стенках .....	239
5.7. Построение сквозной формулы для распределения осредненных скоростей, применимой для всех зон сопротивления.....	241
5.8. Условия, удовлетворяемые новой универсальной формулой.....	246

6. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСХОДА, СРЕДНЕЙ И МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ И СКОРОСТИ НА ГРАНИЦЕ ПРИСТЕННОГО СЛОЯ.....	249
6.1. Формулы для расхода, средней и максимальной скорости при гладких стенках.....	249
6.1.1. Формулы для расхода, средней и максимальной скорости для гладких труб.....	249
6.1.2. Соотношение для средних и максимальных скоростей в плоских продольно-однородных течениях при гладких стенках.....	256
6.1.3. Соотношение для средних и максимальных скоростей при шероховатых стенках.....	257
6.1.4. Случай погранслоеного течения на плоской пластине при нулевом градиенте давления.....	258
6.2. Метод определения параметров турбулентности $a$ и $A$ для продольно-однородных течений.....	262
6.3. Алгоритм вычислительного эксперимента.....	265
7. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ.....	267
7.1. Цель и задачи вычислительного эксперимента.....	267
7.2. Результаты вычислительного эксперимента с продольно-однородными течениями в круглых трубах.....	269
7.3. Результаты вычислительного эксперимента с продольно-однородными течениями при наличии свободной поверхности.....	284
8. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ С ОПЫТНЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ ФОРМУЛАМ.....	294
8.1. Методика сопоставления расчетных и опытных данных.....	294
8.2. Сопоставление расчетных и опытных данных в случае круглых труб.....	296
8.2.1. Круглые гладкие трубы.....	296
8.2.1.1. Сопоставление расчетных данных с опытными, полученными И. Никурадзе для гладких труб.....	296
8.2.1.2. Сопоставление расчетных данных с опытами М.В. Загаролы.....	304
8.2.2. Круглые трубы при доквадратичной зоне сопротивления.....	311
8.2.2.1. Сопоставление с опытными данными МИИГС.....	311
8.2.2.2. Сопоставление с экспериментальными данными Ф.А. Шевелева.....	315
8.2.2.3. Проверка неизменности эпюры безразмерных осредненных скоростей при квадратичном сопротивлении по опытным данным Ф.А. Шевелева.....	317
8.2.3. Круглые «шероховатые» трубы.....	319
8.2.3.1. Сопоставление с опытными данными И. Никурадзе.....	319
8.2.3.2. Сопоставление с данными Альтшуля.....	321
8.3. Сопоставление расчетных и опытных данных в случае течений со свободной поверхностью в плоских каналах.....	326
8.3.1. Исследования А. Томинаги и И. Незу.....	326
8.3.2. Опыты В. Роди и И. Незу.....	332
8.3.3. Исследования А.Х. Кардосо и Г. Гаста.....	334
8.3.4. Исследования П. Приноса и А. Цериса [201].....	335
8.4. Сопоставление расчетных и опытных данных в случае погранслоеных течений.....	342

8.4.1. Сопоставление с опытными данными <i>Остерлунда</i> при нулевом градиенте давления.....	342
8.5. Некоторые дополнительные результаты сопоставления расчетных и опытных данных.....	347
8.5.1. Исследования <i>Эккельмана</i> .....	347
8.5.2. Исследования <i>А.Гюнтера</i> .....	351
8.5.3. Исследования <i>Д. Сабота</i> .....	353
8.5.4. Сопоставления с данными <i>Ф. Дурста, Ж. Йовановича и Ж. Сендера</i> .....	355
9. СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ.....	356
9.1. Об эквивалентной шероховатости.....	356
9.1.1. Существующие методы определения эквивалентной шероховатости.....	356
9.1.2. Критический анализ существующего метода определения эквивалентной шероховатости.....	360
9.1.3. Трубы с естественной или неравнозернистой шероховатостью.....	363
9.1.4. О практическом значении уточнения понятия эквивалентной шероховатости.....	386
9.1.5. Трубы с искусственной шероховатостью.....	392
9.1.6. Плоские равномерные потоки.....	397
9.1.7. Открытые русла с искусственной шероховатостью.....	407
9.1.8. Выводы.....	415
9.1.9. О необходимой точности представления данных об эквивалентной шероховатости.....	416
9.2. К выбору положения плоскости отсчета расстояния от стенки.....	418
9.3. О допустимой высоте шероховатости.....	422
9.4. О трансформации эпюры осредненных скоростей в продольно-однородных турбулентных потоках.....	435
9.5. К вопросу о масштабах длин и скоростей в различных зонах продольно-однородных турбулентных потоков.....	439
9.6. К одноточечному способу измерения расходов в продольно-однородных потоках.....	481
9.7. О распределении температуры в турбулентных продольно-однородных потоках.....	492
9.7.1. Существующая методика расчета распределения температуры (по <i>Карману</i> ) в турбулентных потоках.....	498
9.7.2. Расчет распределения температуры в круглой гладкостенной трубе.....	507
9.7.3. Расчет распределения осредненной температуры по <i>Т. Карману</i> .....	508
9.8. О возможности управления отрицательной турбулентной вязкостью.....	518
9.9. О возможности использования формул для определения параметров течения в круглых трубах при расчетах равномерных открытых потоков.....	520
9.10. Об универсальной константе <i>Кармана</i> и дефиците средней скорости.....	527
9.10.1. О константе <i>Кармана</i> .....	527
9.10.2. О дефиците средней скорости.....	532
9.11. О турбулентной вязкости вблизи оси трубы или свободной поверхности.....	534
9.12. Зоны переходного и квадратичного сопротивления.....	536
9.13. О соотношении средних и максимальных скоростей.....	542
9.14. О соотношении относительной шероховатости и коэффициента шероховатости $n$ .....	545

9.15. О трансформации эпюры касательных напряжений в продольно-однородных потоках при гладких стенках.....	547
9.16. Прогноз возможной трансформации эпюр касательных напряжений и осредненных скоростей при $v_T < -v$ .....	551
9.17. Современные представления о процессах, происходящих в пограничном слое .....	553
9.18. Гипотеза о процессах, происходящих в слоях контргradientного течения в продольно-однородных турбулентных потоках .....	560
<b>ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ПРЕДЛАГАЕМОЙ АВТОРАМИ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНОГО ПОТОКА .....</b>	<b>563</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>573</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>584</b>