

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Инженерно-технологическая академия

**А. П. ВОЛОЩЕНКО**  
**С. П. ТАРАСОВ**  
**П. П. ПИВНЕВ**

# **НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ**

*Учебное пособие*

Ростов-на-Дону – Таганрог  
Издательство Южного федерального университета  
2020

УДК 534.222

ББК 32.875

В686

*Печатается по решению кафедры электрогидроакустической  
и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники  
и приборостроения Южного федерального университета  
(протокол № 21 от 5 февраля 2020 г.)*

**Рецензенты:**

начальник отдела, главный конструктор АО «НИИП  
им. В. В. Тихомирова», кандидат технических наук *А. В. Скняря*  
генеральный директор ООО «УльтранК», кандидат технических наук  
*И. Г. Деренский*

**Волощенко, А. П.**

В686 Нелинейные волновые процессы : учебное пособие / А. П. Волощенко, С. П. Тарасов, П. П. Пивнев ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – 114 с.

ISBN 978-5-9275-3572-9

В учебном пособии изложены результаты теории и практики нелинейных акустических волн, а также сведения об основных нелинейных характеристиках, сопровождающих распространение этих волн. Приведены примеры и задачи по расчету характеристик нелинейных параметрических антенн.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 12.04.01 «Приборостроение», 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», а также научных работников по специальностям 01.04.06 «Акустика» и 05.11.06 «Акустические приборы и системы».

УДК 534.222

ББК 32.875

ISBN 978-5-9275-3572-9

© Южный федеральный университет, 2020  
© Волощенко А. П., Тарасов С. П.,  
Пивнев П. П., 2020  
© Оформление. Макет. Издательство  
Южного федерального университета, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. УРАВНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ЗАКОНЫ СОХРА- НЕНИЯ .....	12
1.1. Уравнение Навье – Стокса. Уравнение непрерывности .....	12
1.2. Уравнение состояния .....	13
1.3. Закон сохранения импульса. Радиационное напряжение .....	15
2. УРАВНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ. РАСПРОСТРА- НЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН .....	20
2.1. Числа Маха и Рейнольдса. Малые параметры .....	20
2.2. Уравнение нелинейной акустики с точностью до квадратич- ных членов .....	21
2.3. Метод медленно изменяющегося профиля. Уравнение Хох- лова – Заболотской – Кузнецова для звуковых пучков .....	24
2.4. Плоские нелинейные волны .....	26
2.4.1. Уравнение Бюргерса .....	26
2.4.2. Решение уравнения Бюргерса для малых чисел Рейнольдса .....	26
2.4.3. Решение уравнения Бюргерса. Эффект «насыщения» ....	27
2.4.4. Развитие нелинейных эффектов при больших числах Рейнольдса .....	29
2.4.5. Распространение нелинейных волн после образования разрыва .....	31
2.4.6. Гармонический состав волн конечной амплитуды .....	32
2.4.7. Затухание волн конечной амплитуды .....	35
2.4.8. Отражение волны конечной амплитуды от границы раздела .....	36
2.5. Сферические и цилиндрические одномерные волны конеч- ной амплитуды .....	38
2.6. Волны в средах с дисперсией .....	39
2.6.1. Уравнение Кортевега – де Вриза .....	40
2.6.2. Метод последовательных приближений для уравнения КДВ .....	41
2.6.3. Стационарное решение уравнения КДВ. Солитоны .....	43
2.6.4. Волны на поверхности жидкости конечной глубины .....	45

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ .....	47
4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ .....	52
4.1. Модель излучающей и приемной антенн. Общие сведения ...	52
4.2. Теория излучающей параметрической антенн .....	55
4.2.1. Решение уравнения ХЗК методом последовательных приближений .....	55
4.2.2. Осевое распределение амплитуды и фазы волны разностной частоты .....	59
4.2.3. Диаграмма направленности .....	61
4.2.4. Амплитудные характеристики .....	64
4.3. Параметрическая антенна в режиме излучения сложных сигналов .....	65
4.3.1. Передача ЛЧМ-сигналов .....	66
4.3.2. Самодетектирование акустических импульсов .....	67
4.4. Влияние плоских отражающих границ .....	68
4.4.1. Особенности расчета поля ВРЧ при отражении .....	68
4.4.2. Анализ характеристик излучающей антенны при отражении .....	70
4.5. Устройство излучающих параметрических антенн и некоторые особенности измерения их характеристик .....	73
4.6. Приемные параметрические антенны .....	74
4.7. Применение параметрических антенн .....	77
5. ЗАДАЧИ ПО РАСЧЕТУ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ .....	79
5.1. Общие сведения .....	79
5.2. Соотношения для аналитического расчета акустического тракта параметрического излучателя .....	82
5.3. Расчет характеристик параметрического излучателя по номограммам .....	83
5.3.1. Основные параметры нелинейного акустического излучателя .....	84
5.3.2. Некоторые особенности расчета и вопросы оптимизации параметрических излучателей .....	85

Содержание

---

5.3.3. Порядок расчета звукового давления ВРЧ в ближней зоне на оси излучателя по номограммам .....	88
5.3.4. Порядок расчета звукового давления ВРЧ в дальней зоне ( $x > L_D$ ) на оси излучателя с учетом затухания по номограммам .....	90
5.3.5. Порядок расчета ширины характеристики направленности параметрического излучателя .....	92
5.4. Пример численного расчета типового задания .....	94
5.4.1. Расчет максимального уровня ВРЧ и амплитудно-частотной характеристики параметрического излучателя .....	95
5.4.2. Расчет осевого распределения звукового давления параметрического излучателя .....	98
5.4.3. Расчет ширины характеристики направленности сигнала разностной частоты по уровню 0,7 в рабочем диапазоне частот .....	100
5.5. Задания по расчету акустического тракта нелинейных параметрических излучателей .....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	110