

УДК 532.529; 536.24
ББК 26.233
Н 34



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 10-08-07030

Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. **Торнадо.** —
М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 344 с. — ISBN 978-5-9221-1249-9.

Книга посвящена фундаментальным проблемам изучения свободных концентрированных вихрей. Рассмотрены возможности математического моделирования воздушных смерчей (торнадо). Впервые в отечественной и мировой практике ставится и решается задача физического (лабораторного) моделирования воздушных смерчей без использования механических закручивающих устройств. Рассмотрены вопросы генерации и устойчивости свободных вихрей, а также методы управления их характеристиками. Описаны возможности воздействия на вихревые атмосферные образования различных масштабов.

Для научных работников, занимающихся исследованиями гидродинамики и тепломассообмена вихревых потоков, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Научное издание

ВАРАКСИН Алексей Юрьевич
РОМАШ Михаил Эдуардович
КОПЕЙЦЕВ Виктор Николаевич
ТОРНАДО

Редактор *Е.Б. Гугля*
Оригинал-макет: *Д.В. Горбачев*
Оформление переплета: *В.Ф. Киселев*

Подписано в печать 15.09.11. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,5. Уч.-изд. л. 28,5. Тираж 300 экз. Заказ № 1618

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
http://www.fml.ru

Отпечатано с электронных носителей издательства
в ООО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

© ФИЗМАТЛИТ, 2011
© А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш,
В. Н. Копейцев, 2011

ISBN 978-5-9221-1249-9

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Основные условные обозначения	14
Глава 1. Вводная	18
1.1. Предварительные замечания	18
1.2. Основные определения	19
1.3. Ветры	21
1.3.1. Шкала скорости (силы) ветра Бофорта (21).	
1.4. Ураганы	23
1.4.1. Шкала ураганов Саффира–Симпсона (23). 1.4.2. Сезон ураганов 2005 г. (25). 1.4.3. Ураган Катрина (30). 1.4.4. Ураганные смерчи (38).	
1.5. Смерчи	44
1.5.1. Шкала торнадо Фуджиты (44). 1.5.2. Расширенная шкала торнадо (49).	
1.6. Некоторые выводы	59
Глава 2. Краткие сведения о циклонах (антициклонах)	62
2.1. Предварительные замечания	62
2.2. Атмосфера Земли	63
2.2.1. Состав и строение атмосферы (63). 2.2.2. Поле атмосферного давления (65). 2.2.3. Вертикальное равновесие атмосферы (66). 2.2.4. Фронтальные зоны (69). 2.2.5. Атмосферные фронты (70). 2.2.6. Погода при прохождении фронтов (73).	
2.3. Свойства циклонов (антициклонов)	73
2.3.1. Стадии развития (74). 2.3.2. Особенности движения воздуха (75). 2.3.3. Частота и места возникновения (76). 2.3.4. Характерные величины давления (77).	
2.4. Природные явления, сопутствующие циклонам (антициклонам)	78
2.4.1. Атмосферные осадки в системе циклонов (78). 2.4.2. Ураганные ветры в системе циклонов (антициклонов) (79).	
2.5. Перенос тепла (холода) внетропическими циклонами	81
2.5.1. Основные механизмы переноса тепла (холода) (81). 2.5.2. Влияние вихрей на перенос тепла океаническими течениями (83).	
2.6. Тропические циклоны	84

Глава 3. Краткие сведения о смерчах	87
3.1. Предварительные замечания	87
3.2. Смерчевые облака	88
3.2.1. Общая характеристика (89). 3.2.2. Форма и размеры (89).	
3.2.3. Внутреннее строение (89). 3.2.4. Горизонтальные смерчевые	
облака (89). 3.2.5. Башенные смерчевые облака (93).	
3.3. Строение смерча	93
3.3.1. Воронка (93). 3.3.2. Каскад (95).	
3.4. Формы смерчей	98
3.4.1. Плотные смерчи (98). 3.4.2. Расплывчатые смерчи (99).	
3.4.3. Группы смерчей (102).	
3.5. Свойства смерчей.	102
3.5.1. Стадии развития (102). 3.5.2. Скорость перемещения, время	
жизни и длина пути (104). 3.5.3. Размеры и масса (105). 3.5.4. Ча-	
стота и места возникновения (105).	
3.6. Виды смерчей и вихрей.	106
3.6.1. Невидимые смерчи и вихри (106). 3.6.2. Пыльные смерчи	
и вихри (107). 3.6.3. Водяные смерчи и вихри (109). 3.6.4. Огнен-	
ные смерчи и вихри (112). 3.6.5. Снежные смерчи и вихри (115).	
3.7. Краткое описание наиболее известных смерчей.	116
3.7.1. Россия (116). 3.7.2. Западная Европа (123). 3.7.3. Соединен-	
ные Штаты Америки (127).	
3.8. Изучение торнадо и возможности защиты	147
3.8.1. Исследования и прогнозирование торнадо (147). 3.8.2. Ущерб	
от торнадо (152). 3.8.3. Защита от торнадо (154).	
Глава 4. Основы теории вихревого движения	159
4.1. Предварительные замечания	159
4.2. Системы координат	160
4.3. Некоторые определения.	160
4.3.1. Линия тока (160). 4.3.2. Элементарная струйка. Трубка то-	
ка (161). 4.3.3. Вихревая линия (161). 4.3.4. Вихревой шнур. Вих-	
ревая трубка (162).	
4.4. Характеристики вихревых течений	162
4.4.1. Азимутальная (тангенциальная) скорость (162). 4.4.2. Па-	
раметр закрутки (163). 4.4.3. Завихренность. Угловая ско-	
рость (164). 4.4.4. Циркуляция (165). 4.4.5. Число Россби (165).	
4.5. Элементарные сведения о вихрях	166
4.5.1. Свободный (потенциальный) вихрь (167). 4.5.2. Вынужден-	
ный вихрь (твердотельное вращение) (167). 4.5.3. Комбинирован-	
ный вихрь (вихрь Рэнкина) (167).	
4.6. Основные уравнения.	169
4.6.1. Уравнение неразрывности (169). 4.6.2. Уравнение Навье-	
Стокса (170). 4.6.3. Уравнение завихренности (170).	
4.7. Элементы гидростатики	174

4.7.1. Равновесие капельной жидкости во вращающемся со-	
суде (174). 4.7.2. Равновесие газов. Сухоадиабатический гради-	
ент (175).	
4.8. Сила Кориолиса и ее влияние на движение материальной точки . .	176
4.8.1. Причина возникновения силы Кориолиса (177). 4.8.2. Влия-	
ние силы Кориолиса на вертикальное движение (180). 4.8.3. Вли-	
яние силы Кориолиса на движение в горизонтальной плоско-	
сти (186).	
Глава 5. Математическое моделирование смерчей	190
5.1. Предварительные замечания	190
5.2. Простая аналитическая модель.	191
5.2.1. Простейшее решение для торнадо (192). 5.2.2. Точное реше-	
ние для торнадо (193). 5.2.3. Стратифицированное торнадо (195).	
5.3. Анализ вихревой неустойчивости	196
5.3.1. Вывод уравнения завихренности (196). 5.3.2. Анализ урав-	
нения завихренности (197). 5.3.3. Результаты расчетов (199).	
5.4. Аналитическое решение уравнений Навье–Стокса.	201
5.4.1. Обобщенное решение для вихревого стока (202). 5.4.2. Ис-	
пользование решения для анализа торнадо (206).	
5.5. Моделирование восходящего закрученного потока.	207
5.5.1. Формирование восходящего закрученного потока (207).	
5.5.2. Система уравнений с учетом силы Кориолиса (209).	
5.5.3. Возникновение закрутки в придонной части восходящего	
потока (212). 5.5.4. Стационарное течение в придонной части	
восходящего потока (214).	
5.6. Численное моделирование торнадо	217
Глава 6. Физическое моделирование смерчей	221
6.1. Предварительные замечания	221
6.2. Экспериментальная установка	222
6.2.1. Описание установки (225). 6.2.2. Тепловые режимы (226).	
6.3. Результаты	227
6.3.1. Подстилающая поверхность (распределение температу-	
ры) (227). 6.3.2. Воздух (распределение температуры) (229).	
6.3.3. Обобщение данных (числа Рэлея) (234). 6.3.4. Инте-	
гральные параметры вихревых структур (235). 6.3.5. Динамика	
вихревых структур (236). 6.3.6. Следы вихревых структур (239).	
6.3.7. Визуализация воронки вихря (241). 6.3.8. Параметр закру-	
тки. Число Россби (248). 6.3.9. Поля мгновенных скоростей (251).	
Глава 7. Новый метод борьбы со смерчами	254
7.1. Предварительные замечания	254
7.2. Краткие сведения о методах борьбы	255
7.3. Экспериментальная установка	257

7.4. Результаты	258
7.4.1. Взаимодействие с вертикальными сетками (статистика) (260). 7.4.2. Взаимодействие с вертикальными сетками (динамика) (261). 7.4.3. Взаимодействие с мелкими вертикальными сетками (263). 7.4.4. Взаимодействие с горизонтальными сетками (266). 7.4.5. Сравнительный анализ эффективности (268).	
7.5. Новый пассивно-активный метод защиты	269
7.5.1. Физические основы воздействия на торнадо и преимущества метода (270). 7.5.2. Верификация метода (277).	
Приложение 1. Оценка смерчопасности территории	280
Приложение 2. Каталог смерчей на территории бывшего СССР . . .	294
Приложение 3. Каталог смерчей на территории Российской Федерации за период 1987–2001 гг.	312
Заключение	326
Список литературы	331

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена изучению свободных концентрированных воздушных вихрей. Вихревое движение является одной из распространенных форм движения воздуха. Существует много разновидностей вихревого движения атмосферного воздуха, различающихся размерами, характерными скоростями и временами жизни. Отметим лишь те из них, которые приводят к катастрофическим последствиям: смерчи (торнадо), вихревые бури и ураганы.

Примерами технических устройств, в которых используются вихревые потоки, являются циклонные сепараторы, вихревые трубы [1], центробежные форсунки, вихревые топочные камеры и горелки [1], различные турбулизаторы и многое другое. Использование вихревых эффектов открывает широкие возможности для интенсификации ряда процессов (смешение, горение) и управления их устойчивостью.

Генерация сложных вихревых структур происходит зачастую вдоль поверхности различных объектов авиационной и ракетно-космической техники, а также в их аэродинамических следах [2]. Управление обтеканием тел с использованием вихревых ячеек является одним из перспективных и актуальных направлений современной гидрогазодинамики [3].

Изучение свободных (не ограниченных стенками) концентрированных (завихренность локализована в пространстве) вихрей осложнено вследствие целого ряда причин: спонтанности образования, пространственно-временной неустойчивости, практической невозможности управления характеристиками и т. д.

Одним из частных, но, пожалуй, самым интригующим и загадочным проявлением свободных вихрей в природе являются воздушные смерчи (или торнадо). Поэтому авторы сочли возможным использовать этот термин в названии книги.

В первой, вводной, главе приведены краткие сведения об основных формах движения воздуха. Даны определения циклонам (тропическим и внетропическим), ураганам, бурям, смерчам, ураганным смерчам и вихрям. Рассмотрена 12-балльная шкала скорости (силы) ветра Бофорта. В следующем разделе описана шкала ураганов Саффира–Симпсона. Данная шкала содержит 5 категорий и призвана продлить шкалу Бофорта на ветры большой ураганной силы. Далее рассмотрены некоторые характеристики ураганов на примере обзора атлантических