

### Предисловие

### Введение

- § 1. Неравновесные состояния сред
- § 2. Движение жидкости с высоты птичьего полета
- § 3. Течение "модельной" жидкости
  - 3.1. Закон сохранения вещества в гидродинамике
  - 3.2. Уравнение Бернулли возьмем за основу
  - 3.3. Вихри и их свойства
- § 4. Течение реальной жидкости
  - 4.1. Почему возникает торможение потока жидкости?
  - 4.2. Пуазейлевское течение
  - 4.3. Неравномерно нагретая жидкость
  - 4.4. Задача, которую решал Фурье
  - 4.5. Диффузия. Растворение кристалла в жидкости
- § 5. Взгляд изнутри: случайные процессы в газах
  - 5.1. Пробег и сечение столкновения
  - 5.2. Молекулярное рассмотрение процесса диффузии
  - 5.3. Диффузия как задача о случайном блуждании частиц
  - 5.4. Связь между случайными процессами переноса в газах
- § 6. Законы сопротивления движению тел в жидкости
  - 6.1. Метод подобия. Число Рейнольдса
  - 6.2. Сопротивление при малых скоростях. Формула Стокса и опыты Милликена по определению элементарного электрического заряда
  - 6.3. Сопротивление при больших (дозвуковых) скоростях. Вихревая цепочка Кармана
  - 6.4. Подъемная сила крыла. Формула Жуковского
- § 7. Неустойчивости в гидродинамике
  - 7.1. Когда слоистое правильное течение становится сильно запутанным?
  - 7.2. Пограничный слой
  - 7.3. Попытки как-то описать турбулентные движения
  - 7.4. Переход от молекулярного к конвекционному переносу тепла. Солнечная грануляция
  - 7.5. Течение Куэтта и тороидальные вихри Тейлора. Фейнман о возможностях гидродинамического описания
  - 7.6. Детерминированный хаос и турбулентность
- § 8. Волны на воде
  - 8.1. То глубоко, то мелко...
  - 8.2. Волновая азбука
  - 8.3. Пологие и крутые волны
  - 8.4. Солисты в волновом хоре
  - 8.5. Шторм на море остается загадкой
  - 8.6. Волны звука в океане
  - 8.7. Колебания заряженной капли или начало ядерной эры
- § 9. Сверхзвуковые потоки газа
  - 9.1. Уравнение Бернулли и термодинамика
  - 9.2. Когда среда становится сжимаемой?
  - 9.3. То широко, то узко...

- 9.4. Сопло Лавая
- § 10. Гидродинамика и физико-химические процессы
  - 10.1. Вводные замечания
  - 10.2. Газовый поток и горение
  - 10.3. Газовый поток как активная лазерная среда
  - 10.4. Электризация грозовых облаков
  - 10.5. Перемешивание жидкостей демонстрирует упорядоченный хаос
- § 11. Знакомьтесь с ударными волнами
  - 11.1. С ними изредка встречаются все
  - 11.2. Распространение возмущений в потоке сжимаемого газа
  - 11.3. Общие соотношения для ударного скачка
  - 11.4. Ударные волны в идеальном газе
  - 11.5. Задача о сильном взрыве в атмосфере
- § 12. Эффекты гидродинамической кумуляции
  - 12.1. Кумулятивные струи
  - 12.2. Схлопывание пузырьков в жидкости
  - 12.3. Сходящиеся сферические и цилиндрические ударные волны
  - 12.4. Роль неустойчивостей в ограничении кумуляции. Создание сверхсильных магнитных полей
  - 12.5. Выход ударной волны на поверхность звезды. Происхождение космических лучей
- § 13. Кавитация в жидкости
- § 14. Моделирование и опыт
  - 14.1. Аэродинамические и плазменные трубы
  - 14.2. Баллистические установки и ударные трубы
- § 15. Эксперимент на дисплее
  - 15.1. Кратко об ЭВМ
  - 15.2. Что такое численный эксперимент?
- § 16. За пределами гидродинамики
  - 16.1. Походный термос и торможение спутников
  - 16.2. Как можно накопить ядерное топливо
  - 16.3. "Вакуум" в...кристалле и гидродинамика фононов
  - 16.4. Флуктуационные явления в гидродинамике
- § 17. Чудеса в лаборатории Капицы, или почему Ландау увлекся гидродинамикой
  - 17.1. Жидкий гелий и квантовая механика
  - 17.2. Жидкость, которая стоит и движется одновременно
  - 17.3. Мысленный эксперимент Фейнмана: квантованные вихри
  - 17.4. Сверхтекучесть в звездах и атомных ядрах
- § 18. Экзотические жидкости
  - 18.1. О "неожиданных" свойствах классической жидкости. О квантовой турбулентности. О путях обобщения гидродинамики
  - 18.2. Электронная жидкость металлов
  - 18.3. Экситонная жидкость полупроводников
  - 18.4. Течения полимерной жидкости
- § 19. Исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и магнитная гидродинамика. Турбулентное динамо Земли и Солнца. Нелинейные явления в плазме
  - 19.1. Самостягивающийся разряд и его гидродинамическая неустойчивость
  - 19.2. Как возникают и "живут" магнитные поля звезд и планет

- 19.3. О "карнавале" колебаний и волн в магнитной гидродинамике
- 19.4. Нелинейные волновые эффекты в плазме и их аналоги в гидродинамике, акустике, оптике
- 19.5. Волновая турбулентность плазмы
- § 20. О солнечно-земных связях и геофизической гидродинамике
  - 20.1. Вводные замечания
  - 20.2. Солнце -- плазменное образование и природный термоядерный реактор
  - 20.3. Магнитосфера Земли
  - 20.4. Атмосфера и океан. Задача о вращающейся жидкости
- § 21. Мир сверхвысоких плотностей энергии и релятивистская гидродинамика
- § 22. Крупномасштабная гидродинамика Вселенной
  - 22.1. Основные этапы эволюции Вселенной
  - 22.2. Иерархия структур во Вселенной
  - 22.3. Гидродинамические процессы при формировании структур Вселенной

## Приложение

### Очерки к параграфам

#### Астрофизика

Космические выбросы вещества: объект SS 433 и его теоретическая модель -- к § 21

Механизм гидромагнитного динамо в космических структурах -- к § 19.2

Мазерный эффект в космосе -- к § 10.3

О жидкой планете, похожей на звезду -- к § 20.4

#### Геофизика и солнечно-земные связи

Торнадо: его топология, физика и гидродинамика -- к § 20.4

О солнечной сейсмологии и акустическом зондировании океанов и мантии Земли -- к § 20.4

#### Физика плазмы

Самоподдерживающийся режим "горения" термоядерной плазмы -- к § 19.1

Кумулятивное сверхсжатие лазерной плазмы -- к § 19.1

"Серфинг" на плазменной волне -- новый метод ускорения частиц -- к § 19.5

#### Физико-техническая область

Нелинейная среда становится антенной -- к § 19.4

Пузырьковые камеры в физике частиц высоких энергий -- к § 13

"Окна" для газодинамических лазеров -- к § 10.3

Магнитогидродинамический генератор (МГД-генератор) -- к § 9.4

Роль "капельной физики" в эффективной работе газодинамических двигателей (ГД) -- к § 10.2

#### Ударные волны

К истории учения об ударных волнах -- к § 11.2

Расчет ударного скачка в газе -- к § 11.4

Задача о скорости звука -- к § 21

## Литература

### Предисловие

Одной из черт современного естествознания является исследование нелинейных систем и систем далеких от равновесия. Гидродинамика хорошо приспособлена для решения подобного рода задач. Действительно, в состоянии равновесия макродвижения невозможны, а сами движения сред есть предмет гидродинамики. И далее,

в гидродинамике сильно развиты нелинейные эффекты (нелинейная среда). Соответственно сложны и нелинейны гидродинамические уравнения. Это затрудняет прямое их исследование и решение. Частично эту нишу заполняет эксперимент (численный на ЭВМ и лабораторный). Замечательный анализ этих вопросов дан в заметках акад. В.Ч.Захарова в §7.3 и Р.Фейнмана в §7.5.

Гидродинамика, вместе с физикой плазмы, могут стать исходной базой для формирования "нелинейного" физического мышления. При этом в рамках гидродинамики нелинейные объекты выступают наглядно и зримо (например, крутые морские волны).

Академик Б.Б.Кадамцев в одном из интервью (1990 г.) по этому поводу заметил: "Исследования плазмы оказались благодатнейшей областью для создания нового физического мышления, хотя практические применения есть уже сейчас....Плазма мне напоминает живое существо. Чтобы хоть отдаленно приблизиться к пониманию плазмы, потребовалась новая система знаний -- физика нелинейных явлений и физика сложных объектов... Исследования плазмы ведут ученых к пониманию процессов упорядочения структур, самоорганизации вещества, стремления неживого к подобию живого".

Во второй половине XX столетия появились фундаментальные математические и физические идеи, сформировавшие представление о так называемом детерминированном хаосе, возникающем в нелинейных классических системах, подчиняющихся динамическим законам. Дело в том, что хорошо известные результаты, связанные с однозначностью и предсказуемостью поведения тел и частиц в полях, течений жидкостей и газов, оказались справедливыми лишь для устойчивых режимов движения. Поведение таких динамических нелинейных систем (даже совсем простых) в режиме неустойчивости становится хаотичным и непредсказуемым. Однако хаос в указанных условиях оказывается упорядоченным, и его структура подчиняется определенным правилам.

Все разделы физики, разве что кроме ее квантовых частей, допускают обобщение на нелинейность в "экстремальных" условиях. Представление о детерминированном хаосе становится универсальным в физике. В гидродинамике оно связано с ключевым понятием турбулентности (см. в дальнейшем §7.6).

Какой способ изложения избран в предлагаемой книге? Автор исходил из простейшего уравнения гидродинамики -- уравнения Бернулли и на его основе рассмотрел довольно широкий круг вопросов. При этом сам рассматриваемый материал взят из наиболее актуальных областей приложения гидродинамики (например, кумулятивные эффекты, кавитация, движение сжимаемых жидкостей и др.). Качественно дается представление также об уравнении Навье--Стокса и связанных с ним явлениях. В целях математической простоты автор широко пользуется соображениями размерностей и симметрии и оценками результатов лишь по их порядку величины. Рассмотрение материала в книге ведется в основном с использованием системы единиц СИ.

Как пользоваться принятой в книге нумерацией формул и рисунков? В номерах формул (и рисунков) сначала указан номер параграфа, в котором использована эта формула (рисунок), а затем порядковый номер формулы (рисунка). Например, ссылка на формулу (11.3), означает, что нужно обратиться к §11, а рис.6.2 отыщется в §6.

На кого рассчитана предлагаемая книга?

Прежде всего на широкий круг лиц, интересующихся достижениями и развитием современного естествознания, которым автор уделил много внимания. Так, большинство параграфов изложено лишь на качественном уровне, математика дана в форме начал анализа (в рамках школьной программы), текст хорошо иллюстрирован, приведена библиография обзорных работ ведущих специалистов в своих областях (опубликованных в популярных изданиях).

Идейный багаж современной гидродинамики значительно пополнился и усложнился, а сфера ее применения (в форме различных обобщений: магнитная гидродинамика, геофизическая гидродинамика и др.) необычайно расширилась. В связи с этим книга может оказаться полезной физикам, гидродинамикам, астрофизикам, геофизикам. Студенты и преподаватели соответствующих специальностей могут найти в книге немало материала для использования в учебном процессе.

*Б.Иванов*

### Представление книги (выдержки из рецензии)

Книга охватывает широкий спектр применений гидродинамических концепций в различных разделах естественных наук. Удачно показан универсальный характер многих законов и моделей, первоначально возникших в гидродинамике и распространенных затем как на смежные, так и на довольно далекие разделы физики, механики и т.д., что придает изложению зачастую и мировоззренческий характер.

Постепенность ознакомления читателя с явлениями этой сферы позволяет автору достаточно корректно и с незначительными потерями популяризировать весьма сложные положения гидродинамической науки. Язык книги сбалансирован и не переусложнен. Исторические экскурсы, в общем, адекватны оценкам, сформировавшимся в научном сообществе.

...Описание применений гидродинамики к ядерной физике, космологии и т.д. в целом правильно, хотя и заметно схематизировано. Впрочем, изложение этих вопросов могло бы стать предметом отдельной книги.

Член-корр. АН Украины В.П.Шелест

### Об авторе

#### **Борис Николаевич Иванов**

Участник Великой Отечественной войны. После войны учился в Петрозаводском государственном университете, диплом делал в Черновицком государственном университете. После окончания аспирантуры Института физики Академии наук Украины (Киев) работал научным сотрудником Радиотехнического института Государственного комитета по атомной энергии (Москва). Впоследствии научный сотрудник Института высоких температур Академии наук СССР (Москва). Участвовал в совместных работах этого института с Институтом атомной энергии им. И.В.Курчатова.

Научные труды: "Новая физика. Обзор основных принципов современной физики" (М., 1963, 1965, вышла в переводе на английском, французском, арабском языках, а также на немецком языке (ГДР, Берлин -- два издания)), "Законы физики" (М., 1986; 2-е изд. М.: URSS, 2004; вышла на английском языке (1989)), "Мир физической гидродинамики. От проблем турбулентности до физики космоса" (М.: URSS, 2002).