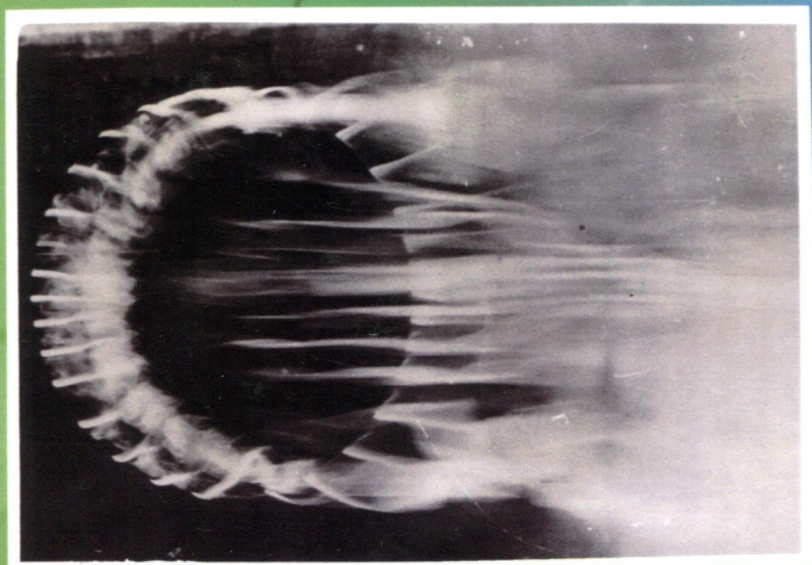


С.К. Бетяев

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КЛАССИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ



С. К. Бетяев

**Асимптотические методы
классической динамики жидкости**



Москва ♦ Ижевск

2014

УДК 532.5
ББК 22.253.3
Б 547

Интернет-магазин

MAFFESIS

<http://shop.rcd.ru>

• физика
• математика
• биология
• нефтегазовые
технологии

Бетяев С. К.

Асимптотические методы классической динамики жидкости. — М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. — 516 с.

Книга посвящена методам возмущений динамики ламинарных течений жидкости. Рассмотрены локальные задачи, принципы построения математических моделей, топологические методы и парадоксы. Проанализированы сингулярности и бисингулярности уравнения Навье–Стокса. Обсуждается методология и проблематика.

Книга предназначена ученым, инженерам, студентам, преподавателям вузов и всем тем, кто интересуется современной гидродинамикой.

ISBN 978-5-4344-0188-3

© С. К. Бетяев, 2014

© Ижевский институт компьютерных исследований, 2014

Оглавление

Предисловие.....	11
Введение. Базовые математические модели	18
Глава I. Основы гидродинамического моделирования.....	20
1. Основные принципы	20
2. Физическая модель.....	23
3. Математическая модель.....	24
4. Инспекционный анализ (основные этапы, методы возмущений, принцип триадной редукции, локальные теории, локально-вихревые структуры).....	28
5. Линеаризация (возможности и ограничения, принцип суперпозиции).....	41
6. Уменьшение числа независимых переменных	45
7. Метод граничных уравнений (вихревая пелена, контактный разрыв, свободная граница).....	47
8. Уменьшение числа зависимых переменных.....	53
9. Теория вихрей (объемные вихри, тангенциальные разрывы, вихревые нити, точечные вихри, точечно-круговой вихрь)	54
10. Асимптотика ламинарного течения при $Re \rightarrow \infty$	63
Глава II. Автомодельность	64
1. Первые шаги (анализ размерностей, классификация, два рода автомодельности, топология)	64
2. Невязкая жидкость (вырождение по времени, вырождение по координате, логарифмическая автомодельность, одномерные нестационарные течения).....	74
3. Вязкая жидкость (уравнения Навье–Стокса, уравнения пограничного слоя)	81
4. Сжимаемая жидкость (о постановке автомодельных задач в газовой динамике, равномерное течение, гиперзвуковое течение, вырожденное течение).....	87

Глава III. Коническое, квазиконическое и обобщенное коническое течения	104
1. Инспекционный анализ (нестационарное течение, стационарное течение).....	104
2. Невязкое обтекание острых вершин (клин, конус, треугольное крыло)	107
3. Течения вязкой жидкости (разложение Карьера–Линя, вихри Мофата, плоский диффузор, осесимметричный диффузор).....	118
4. Осесимметричные течения с закруткой (вихрь Лонга, линейный вихресточник в конусе, распад линейного вихресточника, линейный вихресточник над плоскостью).....	125
5. Нестационарное течение (задача о подвижных границах, генерация меридианного течения циркуляционным течением, линейная волна, вырожденное течение)	129
6. Квазиконическое течение (плоское течение невязкой жидкости, осесимметричное течение невязкой жидкости, ползущее течение)	135
7. Обобщенное коническое течение	139
Глава IV. Спиральные течения невязкой жидкости	142
1. Введение. Элементарная геометрия спиральных кривых и поверхностей (плоские кривые, поверхности и пространственные кривые).....	143
2. Основные уравнения	151
3. Логарифмические спирали (контактный разрыв, замечание о непотенциальном вихре).....	153
4. Алгебраические спирали	155
5. Примеры (задача о внезапном исчезновении тела, задача Кадена, задача Рихтмайера–Мортонa, разгонный вихрь Прандтля, течение Никольского, вход клина в воду).....	157
Глава V. Полиномиальные решения уравнений Навье–Стокса	169
1. Суть метода	171
2. Параметрическое разложение по обратным степеням числа Re	173
3. Временные полиномы	175
4. Координатные полиномы	177

Глава VI. Источники и стоки	186
1. Источники невязкой жидкости (источник в однородном потоке, затопленный источник, источник с разрывной обильностью)....	187
2. Источники вязкой жидкости (линейный анизотропный источник, линейный изотропный источник, точечный вихреисточник, задача об обрезании линейного источника, спиральные структуры).....	196
Глава VII. Введение в топологические методы	206
1. Мысленный эксперимент (задача Сирса, обтекание вершины треугольного крыла, свертывание жидкой пленки, задача о взаимодействии твердого тела с тангенциальным разрывом скорости)	209
2. Локальная топология (седло, полуседло, плоскость симметрии, поверхность тела)	217
3. Обтекание простейших крыльев (нижняя поверхность крыльев, треугольные крылья без V-образности, влияние V-образности, прямоугольные крылья с удлинением $\lambda > 1$, прямоугольные крылья с удлинением $\lambda > 1$)	226
Глава VIII. Парадоксы бесконечности	237
1. Введение	237
2. Сингулярный анализ (поверхностная особенность, линейная особенность)	238
3. Бисингулярность (линейная особенность на краю полуплоскости, точечная особенность на краю особой линии, точечная особенность на пересечении особой линии с особой плоскостью, особая точка на особой плоскости).....	243
4. Парадокс Стернберга–Койтера в течениях невязкой жидкости (стационарное течение в угле, нестационарное течение в угле, замечание об обтекании вершины конуса)	245
5. Парадокс Стернберга–Койтера в течениях вязкой жидкости (продольное течение в вершине клина, нестационарное течение в угле).....	254
6. Задача о параллельном сближении плоскостей (постановка задачи, классификация течений, решения)	257
7. Задача о симметричном сближении параболических поверхностей (постановка задачи, приближение тонкого слоя, решения).....	264

8. Задача о качении цилиндра по плоскости.....	271
9. Замечание о временной асимптотике.....	272
Глава IX. К теории отрывных течений	274
1. Течение Стокса — асимптотика большой вязкости	277
2. Невязкое течение — асимптотика малой вязкости (постановка задачи, предотрывная область, заотрывное течение вблизи угловой кромки, обтекание пластины, заотрывное течение на гладкой поверхности, парадокс динамического краевого угла).....	279
3. Генезис отрыва (угловая кромка, гладкая поверхность).....	291
4. Пограничный слой.....	296
Глава X. Асимптотическое расслоение течений	299
1. Обтекание профиля дисперсной смесью (постановка задачи, основная модель течения, другие математические модели).....	299
2. Температурный пограничный слой	308
3. Взрыв вихря	311
4. Теория устойчивости почти параллельных течений	312
Глава XI. Теория крыла.....	315
1. Основы общей теории.....	315
2. Крыловой профиль	318
3. Крыло большого удлинения.....	321
4. Крыло малого удлинения.....	322
5. Теория тонкого тела (комбинация «крыло-круглый корпус», два типа перехода $3D \rightarrow 2D$, стационарная аналогия, плоское течение, тело в закрученном потоке, вращающееся тело в плоскопараллельном потоке).....	327
6. Крыло конечного удлинения.....	336
7. Крыло в нестандартных условиях	338
Глава XII. Динамика спутных следов	344
1. Осесимметричный колоннообразный вихрь (структура, плоскость Трефца, продольная асимптотика)	345
2. Неосесимметричный колоннообразный вихрь (приосевое течение, приближение слабой закрутки, приближение сильной закрутки —	

метод сращивания асимптотик, приближение сильной закрутки — метод осреднения, асимптотика невязкого следа со слабой осевой асимметрией).....	351
3. Другие следы (примеры, структура плоского следа)	362
Глава XIII. Задачи истечения	367
1. Знакомые примеры стационарных течений (безотрывное истечение невязкой жидкости, отрывное истечение невязкой жидкости, истечение сильновязкой жидкости, задачи втекания, задачи истечения).....	368
2. Эволюция фронта невязкой струи (схемы истечения, эволюция вихревой пелены, линейная теория, автомодельное решение, кумулятивный эффект, эволюция свободной границы, симметричное проникание пары точечных вихрей через щель).....	381
3. Стационарное обтекание продольных щелей идеальной жидкостью (узкий вырез в плоскости, решетка щелей).....	396
4. Стационарное обтекание поперечных щелей (единичное отверстие, решетка щелей)	400
5. Отсос пограничного слоя (постановка задачи, две неклассические схемы, частая перфорация, умеренная перфорация, редкая перфорация, замечание о вдуве жидкости в пограничный слой)	408
6. Другие задачи об отсосе жидкости (отсос в предотрывной области, отсос невязкой жидкости).....	417
Приложение А. Краткая история теоретической гидродинамики	426
1. Введение	426
2. Первая парадигма (теория струй, теория вихрей, волны на воде, газовая динамика, акустика, гидростатика).....	428
3. Вторая парадигма (уравнения и граничные условия, ламинарный пограничный слой, ползущее течение, сверхтекучесть).....	435
4. Третья парадигма (уравнения Рейнольдса, турбулентный пограничный слой, теория однородной турбулентности).....	441
Приложение В. Начала аэродинамического проектирования	453
1. Аэродинамика самолета (история, связь с теорией, этапы проектирования)	453

2. Аэродинамическая труба (одномерное приближение, сопло, дефлектор — отражатель скачков, диффузор, рабочая часть трансзвуковой трубы, течение газа в проницаемых границах).....	462
3. Агрегаты авиационных двигателей (входной диффузор, реактивное сопло, гидродинамический инжектор — приближение сильной вязкости, гидродинамический инжектор — приближение слабой вязкости).....	475
Литература	487
Именной указатель	507