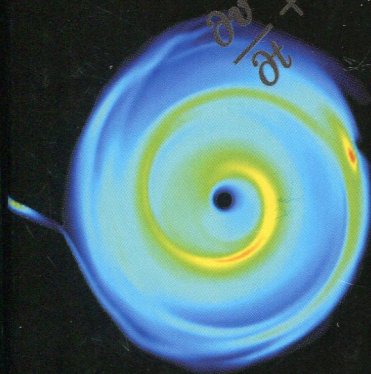


**Д.В. БИСИКАЛО,  
А.Г. ЖИЛКИН, А.А. БОЯРЧУК**

# **ГАЗОДИНАМИКА ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД**



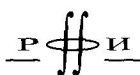
**Д.В. БИСИКАЛО,  
А.Г. ЖИЛКИН, А.А. БОЯРЧУК**

**ГАЗОДИНАМИКА  
ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ  
ЗВЕЗД**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2013

УДК 524.38  
ББК 22.66  
Б 65



Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 12-02-07104д

Бисикало Д.В., Жилкин А.Г., Боярчук А.А. **Газодинамика тесных двойных звезд.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 632 с. — ISBN 978-5-9221-1404-2.

В книге обобщаются результаты фундаментальных исследований газодинамики переноса вещества в тесных двойных звездах, находящихся на стадии обмена массой. Приводятся основные сведения о физике процессов обмена веществом в тесных двойных системах. Рассмотрены общие принципы численного моделирования и представлен обзор современных численных методов, наиболее часто применяемых для решения газодинамических астрофизических задач. Представлены результаты численного моделирования газодинамики вещества в тесных двойных системах без магнитного поля. Рассмотрены изменения в картине течения, вызванные наличием магнитных полей в тесных двойных системах.

Книга предназначена научным работникам, аспирантам и студентам старших курсов, обучающимся по специальности «Астрофизика».

---

Научное издание

*БИСИКАЛО Дмитрий Валерьевич*  
*ЖИЛКИН Андрей Георгиевич*  
*БОЯРЧУК Александр Алексеевич*

## **ГАЗОДИНАМИКА ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД**

Редактор *О.В. Салецкая*  
Редактор-организатор: *Т.Ю. Давидовская*  
Оригинал-макет: *Т.Н. Савицкая*  
Оформление переплета: *Н.Л. Лисицына*

Подписано в печать 22.05.2013. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 39,5. Уч.-изд. л. 43,5. Тираж 300 экз. Заказ №876.

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 изда-  
в ООО «Чебоксарская типография № 1»  
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15  
Тел.: (8352) 28-77-98, 57-01-87  
Сайт: [www.volga-print.ru](http://www.volga-print.ru)

---

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

© Д. В. Бисикало, А. Г. Жилкин,  
А. А. Боярчук, 2013

ISBN 978-5-9221-1404-2

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	9
Введение . . . . .	10

### Часть I. Тесные двойные звезды. Общие сведения

Глава 1. <b>Форма компонентов в тесных двойных системах</b> . . . . .	17
1.1. Поле сил в двойных звездах . . . . .	17
1.2. Понятие полости Роша . . . . .	20
1.3. Расчет равновесной конфигурации компонента двойной системы для случаев политропного и вырожденного газов . . . . .	23
1.4. Несинхронное вращение . . . . .	26
1.4.1. Случай соосных векторов собственного и орбитального вращения (26). 1.4.2. Особые режимы вращения (31). 1.4.3. Общий случай несоосных векторов собственного и орбитального вращения (33).	
1.5. Некруговые орбиты . . . . .	33
Глава 2. <b>Обмен веществом в тесных двойных системах</b> . . . . .	36
2.1. Параметры струи вблизи внутренней точки Лагранжа $L_1$ . . . . .	36
2.2. Траектория струи . . . . .	39
2.3. Аккреционный диск . . . . .	42
2.4. Особенности переноса вещества в системах с магнитным полем . . . . .	49
Глава 3. <b>Температура аккреционных дисков</b> . . . . .	53
3.1. Основные уравнения . . . . .	53
3.2. Оптически толстые диски . . . . .	59
3.3. Оптически тонкие диски . . . . .	65

<b>Глава 4. Математическое описание переноса вещества в тесных двойных звездах.</b> . . . . .	67
4.1. Уравнение Больцмана . . . . .	67
4.2. Уравнения для моментов . . . . .	70
4.3. Приближение газовой динамики . . . . .	74
4.4. Кинетическое описание плазмы . . . . .	78
4.4.1. Кинетические уравнения (78). 4.4.2. Квазигазодинамическое приближение (81). 4.4.3. Уравнения для массовых величин (86).	
4.5. Магнитная газодинамика . . . . .	88
4.5.1. Полностью ионизованная плазма (88). 4.5.2. Слабоионизованная плазма (91). 4.5.3. Магнитогазодинамическое приближение (92).	

## **Часть II. Численные методы в астрофизике**

<b>Глава 5. Принципы численного моделирования.</b> . . . . .	101
5.1. Дискретизация . . . . .	101
5.1.1. Описание общего подхода (101). 5.1.2. Расчетные сетки и представления величин в ячейках (104).	
5.2. Конечно-разностная аппроксимация . . . . .	108
5.2.1. Аппроксимация дифференциальных операторов (108). 5.2.2. Метод конечных объемов (112). 5.2.3. Конечно-разностные задачи (115). 5.2.4. Метод расщепления (120).	
5.3. Анализ устойчивости . . . . .	123
5.3.1. Метод дискретных возмущений (123). 5.3.2. Дифференциальные приближения (125). 5.3.3. Спектральный метод (127). 5.3.4. Энергетический метод (130).	
5.4. Адаптивные сетки . . . . .	132
5.4.1. Основные способы адаптации сеток (132). 5.4.2. Интегрированные адаптивные сетки (134). 5.4.3. Адаптивная сетка в многомерном случае (136).	
<b>Глава 6. Численное решение гиперболических уравнений</b> . . . . .	142
6.1. Разностные схемы для гиперболических систем уравнений . . . . .	142
6.1.1. Классификация методов (142). 6.1.2. Метод характеристик (143). 6.1.3. Схема Лакса-Вендроффа (147).	
6.2. Методы квазичастиц . . . . .	150
6.2.1. Основные принципы (150). 6.2.2. Метод частиц в ячейке (152). 6.2.3. Метод крупных частиц (154).	
6.3. Метод SPH . . . . .	155
6.3.1. Базовые принципы (155). 6.3.2. Аппроксимация основных уравнений (157). 6.3.3. Искусственная вязкость и самогра-	

витация (159). 6.3.4. Переменная ширина размазывания (161).  
6.3.5. Преимущества и недостатки (162).

Глава 7. Годуновские методы . . . . .	171
7.1. Стандартная схема Годунова . . . . .	171
7.1.1. Общие принципы (171). 7.1.2. Линейные уравнения (173). 7.1.3. Представления потока (175). 7.1.4. Учет источниковых членов (177).	
7.2. Методы, основанные на приближенном решении задачи Римана . . . . .	181
7.2.1. Описание различных подходов (181). 7.2.2. Схема Лакса-Фридрихса (183). 7.2.3. Схема HLL (187). 7.2.4. Схема Ошера (190).	
7.3. Схема Роу . . . . .	193
7.3.1. Общее описание (193). 7.3.2. Вариант схемы для уравнений газовой динамики (195). 7.3.3. Энтропийная поправка (199). 7.3.4. Случай произвольного уравнения состояния (203).	
7.4. Схемы для уравнений магнитной газодинамики . . . . .	206
7.4.1. Краткий обзор схем (206). 7.4.2. Схема Лакса-Фридрихса (206). 7.4.3. Схема HLLD (210). 7.4.4. Схема Роу (214). 7.4.5. Методы очистки дивергенции магнитного поля (219). 7.4.6. Динамическая адаптация расчетных сеток в МГД-задачах (221).	
Глава 8. Схемы повышенного порядка аппроксимации . . . . .	229
8.1. Метод PPM . . . . .	229
8.1.1. Схема PPM для уравнения адвекции (230). 8.1.2. Случай системы линейных уравнений (232). 8.1.3. Вариант метода для уравнений газодинамики (234).	
8.2. TVD-схемы . . . . .	242
8.2.1. Положительность и монотонность (242). 8.2.2. Линейные схемы (245). 8.2.3. Принцип TVD (247).	
8.3. Построение повышающих поправок . . . . .	249
8.3.1. Основные концепции (249). 8.3.2. Схема высокого порядка аппроксимации для уравнения адвекции (251). 8.3.3. Случай гиперболической системы уравнений (257). 8.3.4. Примеры тестовых расчетов (262).	

### Часть III. Структура течения вещества в тесных двойных звездах без магнитного поля

Глава 9. Морфология течения . . . . .	277
9.1. Системы с горячими аккреционными дисками . . . . .	278
9.2. Системы с холодными аккреционными дисками . . . . .	280
9.3. Наблюдательные проявления элементов структуры течения . . . . .	285

9.3.1. «Горячая линия» (285).	9.3.2. Приливная спиральная волна (289).	9.3.3. Отошедшая ударная волна (292).	
<b>Глава 10. Волны плотности в аккреционных дисках</b>			<b>300</b>
10.1. «Прецессионная» волна в холодных дисках			300
10.2. Спирально-вихревая структура в горячих дисках			306
10.3. Влияние волн плотности на картину течения			313
10.3.1. С упервспышки в системах типа SU UMa (314).			
10.3.2. Изменения яркости на внезатменных частях кривых блеска CVs (315).			
10.3.3. О возможности возникновения газодинамической турбулентности в аккреционных дисках (317).			
<b>Глава 11. Формирование общей оболочки</b>			<b>322</b>
11.1. Механизм образования оболочки			323
11.2. Структура оболочки			332
11.2.1. Общая картина течения (332).			
11.2.2. Формирование спирального шлейфа (333).			
11.2.3. Внутренняя часть оболочки (335).			
11.2.4. Внешняя часть оболочки (338).			
11.3. Наблюдательные проявления общей оболочки.			339
11.4. Влияние потери массы и углового момента на эволюцию двойной звезды			345
11.4.1. Основные факторы, определяющие эволюцию двойных звезд (345).			
11.4.2. Расчет скорости потери углового момента в трехмерных газодинамических моделях (350).			
<b>Глава 12. Обмен веществом в двойных системах с несинхронным вращением компонентов</b>			<b>353</b>
12.1. Полуразделенные двойные системы.			354
12.2. Системы с компонентами, не заполняющими свои полости Роша			360
12.3. Двойные Ве-звезды			364

## **Часть IV. Динамика вещества в магнитных тесных двойных звездах**

<b>Глава 13. Особенности численных моделей для систем с магнитным полем</b>			<b>381</b>
13.1. Плазма в сильном магнитном поле			381
13.1.1. Свойства МГД-течений в ТДС (381).			
13.1.2. Модификация уравнений МГД (382).			
13.1.3. Учет холловских токов (386).			
13.2. Численная модель, основанная на усредненных характеристиках течения			389

13.2.1. Основные уравнения (389). 13.2.2. Магнитное поле аккректора и диска (393). 13.2.3. Диффузия магнитного поля (397).	
13.3. Численный метод. . . . .	398
13.3.1. Расщепление по физическим процессам (398). 13.3.2. Гиперболическая подсистема (401). 13.3.3. Численный метод решения уравнения диффузии (404).	
<b>Глава 14. Структура течения</b> . . . . .	406
14.1. Общая морфология течения в промежуточных полярах . . . . .	406
14.2. Роль диффузии магнитного поля . . . . .	412
14.3. Влияние величины магнитного поля на решение . . . . .	416
14.4. Зависимость решения от степени асинхронности вращения аккректора. . . . .	419
14.5. Картина течения вещества в полярах — системах с сильным магнитным полем. . . . .	425
14.6. Случай сложного (мультипольного) магнитного поля . . . . .	431
14.6.1. Системы со сложным магнитным полем (431). 14.6.2. Описание модели (433). 14.6.3. Особенности динамики вещества (440). 14.6.4. Наблюдательные проявления (452).	
<b>Глава 15. Магнитное поле в аккреционном диске</b> . . . . .	459
15.1. Механизмы усиления поля . . . . .	459
15.2. Результаты численного эксперимента . . . . .	460
15.3. Основные закономерности генерации поля в дисках. . . . .	468
15.3.1. Базовые уравнения (468). 15.3.2. Генерация поля дифференциальным вращением (469). 15.3.3. $\alpha\omega$ -динамо (472).	
15.4. Особенности дисковой аккреции в промежуточных полярах . . . . .	477
Заключение. Перспективы численного моделирования газодинамики тесных двойных систем. . . . .	480

## Приложения

Приложение А. Гиперболические системы уравнений . . . . .	483
А.1. Основы теории гиперболических систем одномерных уравнений. . .	483
А.1.1. Основные определения (483). А.1.2. Частные случаи (485). А.1.3. Нелинейные системы (487). А.1.4. Обобщенные решения (489).	
А.2. Задача Римана . . . . .	493
А.2.1. Автомодельные решения (493). А.2.2. Линейные уравнения (497). А.2.3. Нелинейные уравнения (499).	
А.3. Уравнения газовой динамики . . . . .	504
А.3.1. Характеристические свойства (504). А.3.2. Бегущие волны (507). А.3.3. Задача Римана (510).	
А.4. Уравнения магнитной газодинамики . . . . .	515



А.4.1. Характеристические свойства (515).	А.4.2. Сильные разрывы (519).	
Приложение Б. Перенос излучения . . . . .		526
Б.1. Уравнение переноса . . . . .		527
Б.1.1. Особенности учета излучения при моделировании астрофизических течений (526).	Б.1.2. Основные понятия теории излучения (528).	
Б.1.3. Вывод уравнения переноса (531).	Б.1.4. Локальное термодинамическое равновесие (532).	
Б.1.5. Кинетическое уравнение для фотонов (534).	Б.1.6. Моментные уравнения (536).	
Б.2. Приближенные модели переноса излучения . . . . .		538
Б.2.1. Функции нагрева и охлаждения (538).	Б.2.2. Диффузионное приближение (542).	
Б.2.3. Приближение Шварцшильда–Шустера (544).	Б.2.4. Приближение Эддингтона (545).	
Б.2.5. Приближение диффузии с ограниченным потоком (546).	Б.2.6. Приближение Соболева (548).	
Б.3. Перенос излучения в движущейся среде . . . . .		550
Б.3.1. Эффект Доплера (550).	Б.3.2. Моментные уравнения для движущейся среды (553).	
Б.3.3. Медленно движущаяся среда (555).	Б.3.4. Диффузия излучения в медленно движущейся среде (557).	
Б.3.5. Уравнения газодинамики и магнитной газодинамики с учетом излучения (559).		
Приложение В. Релятивистские эффекты . . . . .		562
В.1. Описание релятивистских течений в тесных двойных системах . . . . .		562
В.1.1. О возможных постановках задач моделирования структуры течения в ТДС с релятивистскими компонентами (562).	В.1.2. Описание систем отсчета в теории относительности (565).	
В.1.3. Метод кинематических инвариантов (568).	В.1.4. Тензор энергии–импульса (570).	
В.2. Релятивистская газодинамика . . . . .		572
В.2.1. Система уравнений релятивистской газодинамики (572).	В.2.2. Уравнение состояния (579).	
В.2.3. Релятивистские газодинамические сильные разрывы (583).		
В.3. Релятивистская магнитная газодинамика . . . . .		587
В.3.1. Система уравнений релятивистской магнитной газодинамики (587).	В.3.2. Характеристические свойства (592).	
В.3.3. Релятивистские сильные МГД-разрывы (596).		
Список литературы . . . . .		601