

УДК 524.38

Газовые потоки в двойных звездах

А.А. Боярчук, Д.В. Бисикало

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 10 сентября 2005 г.

Аннотация. В статье представлено описание процесса обмена веществом во взаимодействующих двойных звездах. Суммированы основные особенности структуры течения вещества для двойных систем разных типов.

Ключевые слова: двойные звезды

1 Введение

Большинство звезд, доступных детальному исследованию, обнаруживают присутствие гравитационно связанных спутников, что, в свою очередь, позволяет говорить о том, что значительная часть всех звезд является двойными. Точное количество двойных звезд во Вселенной неизвестно, однако, по некоторым оценкам их доля в общем числе звезд является преобладающей и может превышать 80% (Масевич, Тутуков, 1988). Уже только этого факта было бы достаточно для самого тщательного исследования этих звезд, однако, двойные системы обладают еще одним уникальным свойством – их компоненты в ходе эволюции обмениваются веществом. Значение этого эффекта чрезвычайно велико как при рассмотрении эволюционного статуса звезды, так и при интерпретации наблюдательных данных. Уже простейший анализ, основанный на оценке общей энергетики одиночной звезды, показывает, что для объяснения имеющихся наблюдательных данных в коротковолновых диапазонах необходимо привлечение дополнительных источников энергии. Более детальное рассмотрение (Масевич, Тутуков, 1988; Прингл, Уэйд, 1993) свидетельствует, что большинство регистрируемых наблюдательных проявлений связано не с одиночными звездами, а обусловлено процессами в двойных системах (обмен веществом, процессы аккреции, аккреционные диски, etc).

Начиная с пионерских работ (Struve, 1941; Kuiper, 1941; Crawford, 1955), посвященных изучению двойных звезд, в большинстве последующих исследований, основное внимание уделялось рассмотрению влияния массообмена на эволюцию системы (см., напр., обзоры Paczynski, 1971; Plavec, 1973; De Greve, 1986). В этих работах было установлено, что эволюция взаимодействующих двойных систем (ВДС) определяется несколькими основными процессами, а именно: истечением вещества из первичной компоненты, аккрецией вещества на вторичную компоненту, образованием общих оболочек, а также потерей системой вещества и углового момента. Как правило, исследования эволюции двойных систем опираются на усредненные во времени макрохарактеристики процессов массообмена и не рассматривают детали картины течения вещества в системе. В то же время, теоретические исследования, а также обширный ряд имеющихся

наблюдений свидетельствуют о наличии сложной динамической структуры течения вещества в ВДС (см., напр., обзоры Plavec, 1990; White, 1989). Поскольку регистрируемые наблюдательные проявления отражают текущий статус системы, то для их интерпретации необходимо рассмотрение именно структуры течения. Кроме того исследование газодинамики перетекания вещества позволяет уточнить общие характеристики массопереноса, и, следовательно, также необходимо и при рассмотрении эволюции системы.

Для исследования картины течения, а также для более детального анализа физических процессов в ВДС, необходимо привлечение методов математического моделирования. Ниже мы расскажем об основных принципах моделирования процесса обмена веществом в двойных звездах, а также приведем ряд наиболее интересных результатов, полученных авторами в последние годы для двойных систем без магнитного поля.

2 Модели течения вещества в двойных звездах

Понятие математической модели включает в себя: спецификацию основных физических процессов, определяющих поведение системы; выбор соответствующей системы уравнений, наиболее полно описывающей включенные в модель процессы; а также разработку/адаптацию оптимального для данной задачи численного метода решения.

Разработка физической модели системы (постановка задачи) является определяющим звеном при математическом моделировании, поскольку именно на этой стадии, в зависимости от целей исследования, необходимо осуществить выбор включаемых в модель физических процессов. Исходя из общей логики математического моделирования, проведенная спецификация должна быть оптимальной как с точки зрения полноты системы (т.е. в модели должны быть представлены все определяющие процессы, способные влиять на конкретное рассматриваемое явление), так и с точки зрения расходования вычислительных ресурсов. К сожалению, невозможно сформулировать общие принципы оптимизации физической модели, и именно это обстоятельство приводит к столь отличающимся результатам разных авторов, несмотря на принципиальное сходство используемого математического аппарата.

Рассуждая формально, исследование каждой конкретной двойной системы возможно только в рамках математической модели, адаптированной для данной задачи. В то же время, наибольший интерес представляет рассмотрение тех общих процессов, которые определяют процесс массообмена в различных системах, и на основании которых можно сделать выводы об общем характере течения вещества в системе, не прибегая к сложному и дорогостоящему процессу математического моделирования. Характерные особенности течения вещества в двойных системах разных типов будут рассмотрены ниже, а в настоящем параграфе мы представим остальные элементы математической модели.

Для моделирования течения вещества в двойных звездах обычно используют уравнения континуальной газодинамики (уравнения Эйлера). Эти уравнения в традиционной форме описывают трехмерное течение химически и радиационно инертного газа в отсутствие внешних сил. На самом деле, газ в реальных двойных системах не является инертным и, кроме того, находится под воздействием гравитационных, радиационных, и магнитных полей. Наличие подобного рода внешних факторов приводит к усложнению исходных уравнений газодинамики, причем форма дополнительных членов, включаемых в систему уравнений, зависит от вида конкретного воздействия. Общий обзор уравнений радиационной и магнитной газодинамики, а также систему уравнений для реагирующих газов можно найти в учебниках по газодинамике (см., напр., Широков, 1958).

Принципиальным вопросом при численной реализации газодинамических моделей является выбор метода и схемы решения соответствующей системы уравнений. В настоящее время наиболее хорошо зарекомендовал себя конечно-разностный метод. Из большого разнообразия конечно-разностных схем наиболее точными на сегодняшний день являются схемы так называемого "годуновского" типа (Годунов, 1959). Эти схемы получаются аппроксимацией исходной системы

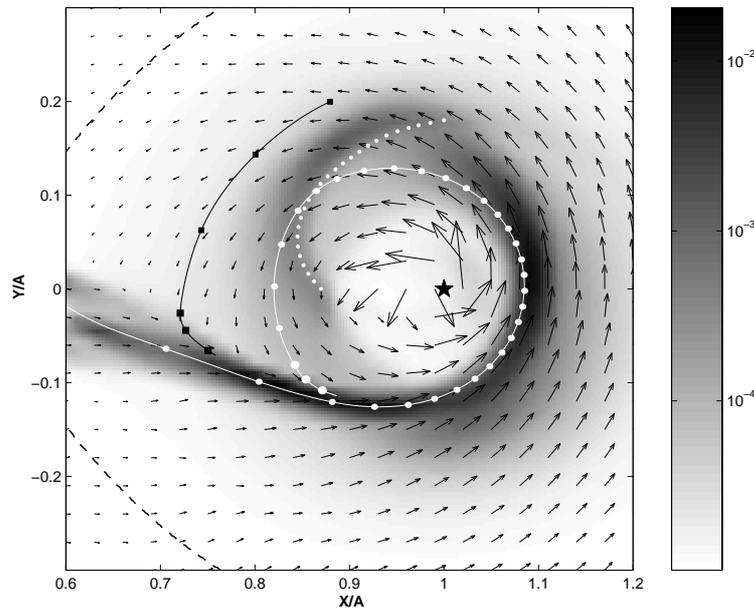


Рис. 1. Распределение плотности и векторов скорости в экваториальной плоскости системы. X и Y координаты представлены в единицах расстояния между компонентами A . Аккректор обозначен звездочкой. Штриховые линии показывают границы полости Роша. Линия тока, ограничивающая аккреционный диск, показана белой линией с кружками. Линия тока, проходящая через ударную волну на краю струи, обозначена черной линией с квадратиками. Значки на линиях тока большего размера соответствуют месту расположения ударной волны. Пунктирной линией обозначен рукав приливной спиральной ударной волны

уравнений газовой динамики в дивергентной форме (соответствующей законам сохранения), что позволяет получать корректные значения на скачках в случае разрывных решений. В настоящее время, несмотря на относительную сложность подобных схем, они наиболее часто используются при численной реализации газодинамических моделей.

3 Обмен веществом в полуразделенных системах

В классической постановке взаимодействующие двойные системы рассматриваются как полуразделенные, и их исследование проводится в предположении, что в двойной системе существует критическая поверхность, при заполнении которой одной из звезд начинается обмен массой в системе. Эта поверхность отождествляется с внутренней критической поверхностью (поверхностью Роша) в ограниченной задаче трех тел. Обмен веществом происходит через окрестность внутренней точки Лагранжа L_1 , где градиент давления не уравновешивается силой тяготения. Газодинамику истечения вещества из окрестностей точки L_1 исследовали неоднократно многие авторы. Впервые анализ данной проблемы, полученный в полуаналитическом приближении, представлен в работах Пачинского и Сенкевича (1972) и Любова и Шу (1975), а ее современное состояние, наряду с перечислением наиболее актуальных задач можно найти, например, в обзорах (Shore at all., 1994; Boyarchuk at all., 2002). К сожалению, более детальное исследование процесса обмена веществом в двойных звездах аналитическими методами затруднено, поскольку по мере распространения струи необходимо учитывать ее взаимодействие с окружающим веществом.

Рассмотрим характерные особенности структуры течения вещества в полуразделенных двойных в рамках трехмерной газодинамической модели. Анализ основных процессов нагрева и охлаждения вещества в аккреционных дисках двойных систем (Бисикало и др., 2003)] показал, что для

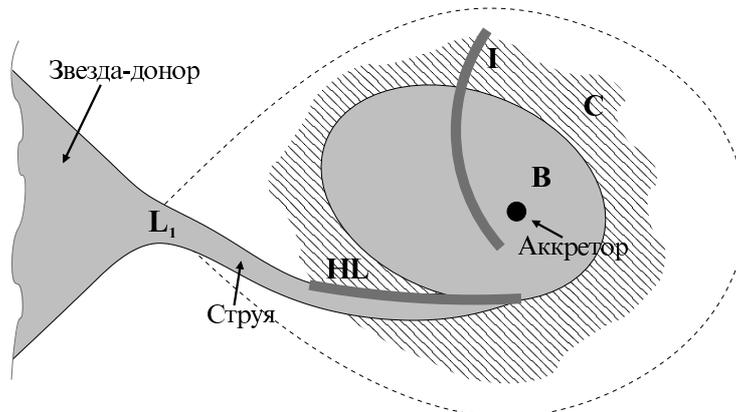


Рис. 2. Схематическое изображение основных особенностей картины течения вещества в полуразделенных двойных системах для случая высокой температуры газа

реалистичных параметров аккреционных дисков в тесных двойных ($\dot{M} \simeq 10^{-12} \div 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ и параметр $\alpha \simeq 10^{-1} \div 10^{-2}$) температура газа во внешних частях диска лежит в диапазоне от 10^4 К до $\sim 10^6$ К.

В рамках адиабатической модели нами было проведено трехмерное численное моделирование структуры течения в тесных двойных для случая, когда температура внешних частей аккреционного диска достигала 100 – 200 тысяч К (Boyarchuk et al., 2002). Представление о морфологии течения в рассматриваемых системах можно получить из рис. 1., где представлено распределение плотности и векторов скорости в экваториальной плоскости системы. На этом рисунке также показаны ограничивающая аккреционный диск линия тока (белая линия с кружками) и линия тока, проходящая через ударную волну на краю струи (черная линия с квадратиками). Пунктирной линией обозначен рукав приливной спиральной ударной волны.

Схематическое изображение основных особенностей картины течения вещества в полуразделенных двойных системах для случая высокой температуры газа приведено на рис. 2. На рисунке показаны часть донора, заполняющего свою полость Роша, положение внутренней точки Лагранжа L_1 , струя вещества, истекающего из L_1 , а также положение аккректора. Пунктирной линией отмечена эквипотенциаль Роша, проходящая через внутреннюю точку Лагранжа. Следуя определениям работы (Boyarchuk et al., 2002), газодинамика течения вещества в полуразделенной двойной системе определяется наличием струи вещества из L_1 , квазиэллиптическим аккреционным диском, околоскопическим гало и межкомпонентной оболочкой. Введенная классификация основных элементов картины течения основывается на их физических свойствах: а) если движение газа не определяется гравитационным полем аккректора, тогда он образует межкомпонентную оболочку, заполняющую пространство между компонентами; б) если газ обращается вокруг аккректора и после смешивается с веществом струи, тогда он не принадлежит диску, а формирует околоскопическое гало (зона “С” на рисунке 2); в) аккреционный диск образуется из вещества струи, которое, попав в гравитационное поле аккректора, не взаимодействует в дальнейшем со струей, а движется к звезде, теряя угловой момент (зона “В” на рисунке 2). Взаимодействие газа околоскопического гало и межкомпонентной оболочки со струей приводит к формированию ударной волны, расположенной вдоль края струи. Эта ударная волна, так называемая “горячая линия”, обозначена на рис. 2 маркером “НЛ”. Приливное воздействие звезды-донора приводит к возникновению спиральной ударной волны, обозначенной на рис. 2 маркером “Т”. В решении с высокой температурой газа присутствует только один рукав спиральной ударной волны, в то время как в области, где должен находится второй рукав, структура течения определяется струей вещества из L_1 . Отметим также, что в рассматриваемом случае спиральная волна заходит глубоко во внутренние части диска.

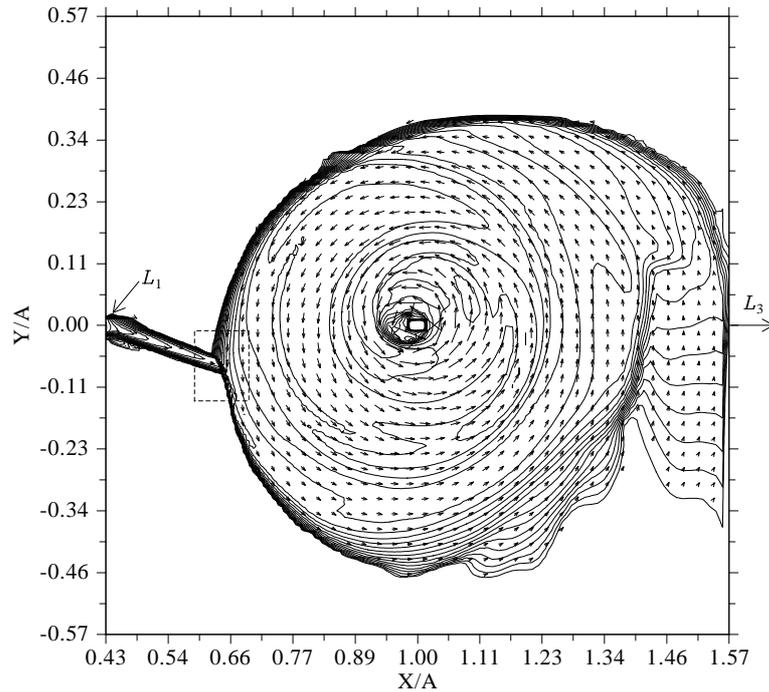


Рис. 3. Изолинии плотности и вектора скорости в экваториальной плоскости системы XU . Пунктирным прямоугольником показана область взаимодействия струи и диска, изображенная на рис. 4. На рисунке также обозначена точка L_1 и направление на точку L_3

Рассмотрим характерные особенности структуры течения вещества для случая холодных аккреционных дисков, полученной в рамках трехмерной неадиабатической газодинамической модели (Бисикало и др., 2003; Бисикало и др., 2004ab; Бисикало и др., 2005). Морфология газовых потоков в двойной системе для случая, когда температура внешних частей аккреционного диска не превышала 13600K, представлена на рис. 3 – 4. На рис. 3 показано распределение плотности и вектора скорости в экваториальной плоскости системы (плоскость XU). На рис. 4а укрупненно показано распределение плотности и вектора скорости в области взаимодействия струи и внешнего края диска (эта область отмечена пунктирным прямоугольником на рис. 3). На рис. 4б представлена так называемая текстура – визуализация поля скоростей в области взаимодействия струи и диска, построенная с помощью алгоритма LIC (Line Integral Convolution Method).

Из анализа данных, представленных на рис. 3 видно, что в этом случае межкомпонентная оболочка формируется, главным образом, в окрестности L_3 и не оказывает существенного влияния на решение. Также видно, что “околодискное гало” поджато к диску и его плотность резко нарастает при приближении к краю диска. Анализ рис. 4 показывает, что для рассматриваемого холодного случая взаимодействие “околодискного гало” и струи имеет все типичные черты косоугольного столкновения двух потоков. Возникающая при этом структура из двух ударных волн и тангенциального разрыва между ними отчетливо видна на рис. 4. Газ гало и газ струи проходят через ударные волны, соответствующие своему потоку, смешиваются и это вещество движется вдоль тангенциального разрыва между двумя ударными волнами. В дальнейшем, из этого вещества и формируется собственно диск, гало и оболочка.

Решение для холодного случая имеет те же качественные особенности, что и решение для случая горячих внешних частей диска: взаимодействие струи и диска является безударным, область повышенного энерговыделения вызвана взаимодействием газа “околодискного гало” и струи и расположена вне диска, образующаяся ударная волна имеет достаточно большую протяженность, что особенно важно при интерпретации наблюдений. Однако, в отличие от решений, где внешние

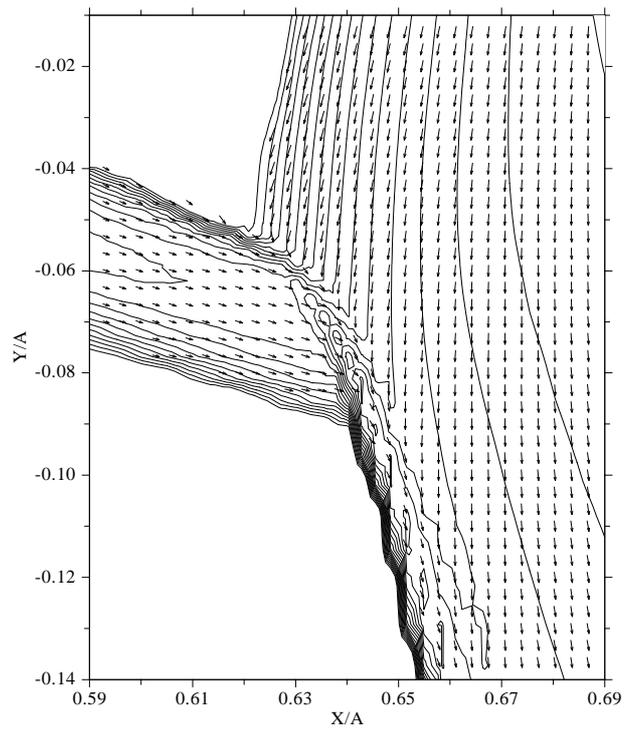


Рис. 4. а.

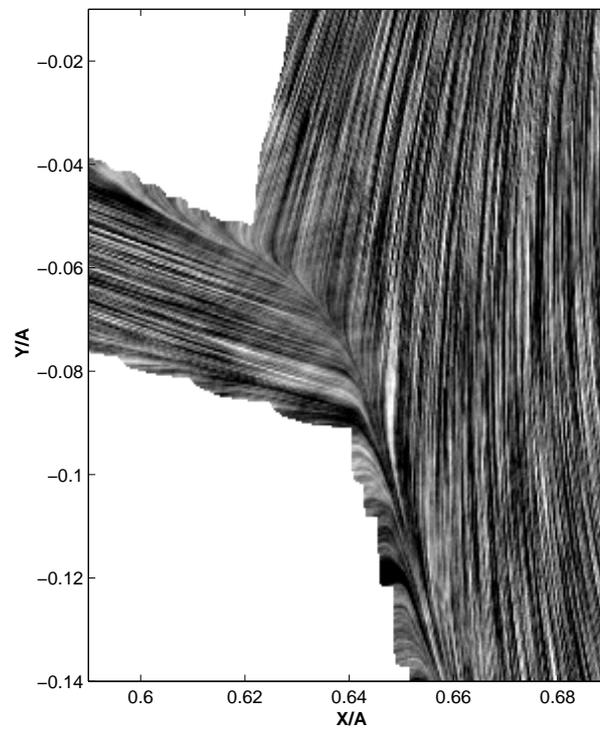


Рис. 4. б. Изолинии плотности и вектора скорости (левая панель) и визуализация поля скоростей (правая панель) в области взаимодействия струи и диска (пунктирный прямоугольник на рис. 3)

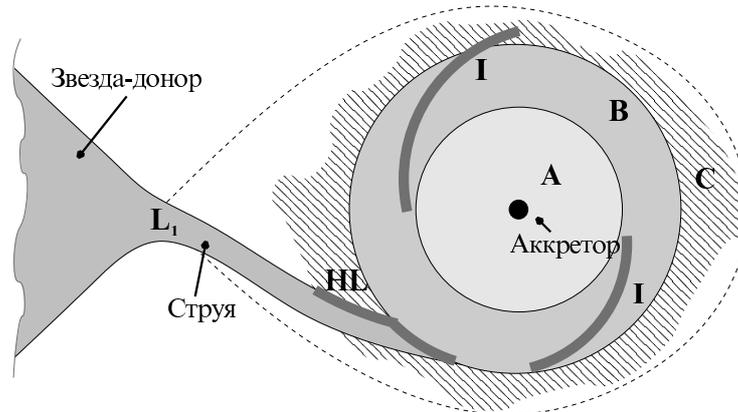


Рис. 5. Схематическое изображение основных особенностей картины течения вещества в полуразделенных двойных системах для случая низкой температуры газа

слои диска имели высокую температуру, в холодном случае область ударного взаимодействия струи и гало имеет более сложную форму, чем просто “горячая линия”. Это вызвано резким увеличением плотности гало при приближении к диску. Удаленные от диска части гало имеют малую плотность и ударная волна, вызванная их взаимодействием со струей, лежит вдоль края струи. По мере увеличения плотности газа гало ударная волна изгибается и, в конце концов, занимает положение вдоль края диска.

Рассмотрим изменение структуры течения при переходе от решений с высокой температурой газа к более холодным. На рис. 5 дано схематическое изображение основных особенностей картины течения вещества в полуразделенных двойных системах для случая, когда неадиабатические процессы, связанные с радиационным охлаждением газа, приводят к более низкой температуре газа. Решение для холодного случая имеет те же качественные особенности, что и решение для случая высоких температур: взаимодействие струи и диска является безударным, область повышенного энерговыделения – ударная волна “HL” – вызвана взаимодействием газа околодискового гало и струи и расположена вне диска, образующаяся ударная волна “HL” имеет достаточно большую протяженность и может быть названа “горячей линией”. В то же время, для холодного случая аккреционный диск (зоны “А” и “В” на рисунке 5) становится существенно более плотным (по сравнению с плотностью вещества струи), его высота уменьшается, а форма меняется от квази-эллиптической до практически круговой. Околодисковое гало (зона “С” на рисунке 5) также существенно уменьшается в размерах. В диске формируется второй рукав приливной спиральной ударной волны, причем оба рукава не подходят к аккретору, а расположены во внешних частях диска.

Анализ полученных результатов выявил, что в самосогласованном решении задачи независимо от температуры газа отсутствует ударное взаимодействие истекающей из внутренней точки Лагранжа L_1 струи вещества с образовавшимся аккреционным диском (“горячее пятно”). Область повышенного энерговыделения (“горячая линия”) расположена вне диска и вызвана взаимодействием газа околодискового гало и межкомпонентной оболочки со струей.

Для того, чтобы убедиться в адекватности представленной модели течения мы синтезировали кривые блеска для различных катаклизмических двойных и сравнили их с наблюдениями (Хрузина и др., 2001; Хрузина и др., 2003; Хрузина и др., 2005). В качестве примера на рис. 6 представлены наблюдаемые и синтезированные для моделей “горячей линии” (панель “а”) и “горячего пятна” (панель “б”) кривые блеска IP Peg в фильтре V в спокойном состоянии. Решение обратной задачи по интерпретации кривой блеска в рамках двух альтернативных моделей показало, что в модели “горячей линии” удается лучше описать наблюдаемые кривые блеска, чем в модели “горячего пятна”.

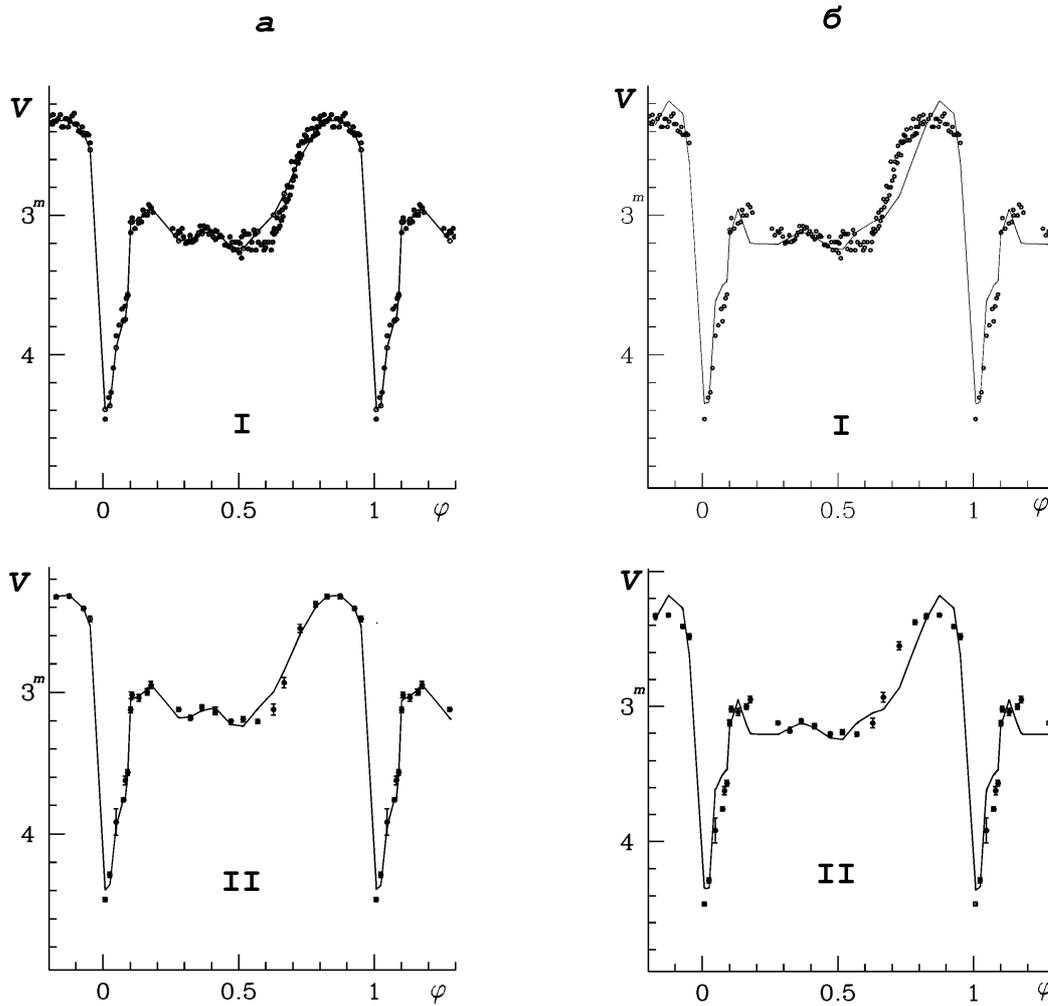


Рис. 6. Наблюдения IP Reg (I) и средняя кривая (II) в фильтре V в спокойном состоянии. Сплошными линиями показаны кривые блеска, синтезированные в модели “горячей линии” (а) и “горячего пятна” (б)

Так, в модели “горячей линии” лучше воспроизводится ширина горбов на кривых блеска, форма затмения и детали внезатменных изменений блеска. Сравнение синтезированных и наблюдаемых кривых блеска для других систем также подтвердило преимущества модели с “горячей линией”. Следует отметить, что, оставаясь в рамках рассматриваемой модели течения с “горячей линией”, можно объяснить все многообразие наблюдаемых кривых блеска.

Качественное подобие полученных решений для различных типов полуразделенных систем позволяет говорить об универсальности рассматриваемой модели течения. Однако, следует отметить, что представленные результаты получены для установившегося режима течения. В нестационарном режиме, когда морфология течения определяется внешними факторами и не является самосогласованной, возможно возникновение и других особенностей течения, в частности, областей ударного взаимодействия диска с потоком газа в системе. Так, например, в случае, если диск сформировался еще до заполнения звездой-донором своей полости Роша, то после начала стадии обмена массой через окрестность L_1 , возможно возникновение “горячего пятна” в месте соприкосновения струи вещества с наружным краем диска. Поскольку после выхода течения на стационарный режим следует ожидать самосогласованного решения без “пятна”, то

принципиальным является определение времени жизни этого образования. В качестве характерного времени жизни “пятна” естественно принять интервал, за который количество вещества, вносимого в систему струей, будет сопоставимо с массой аккреционного диска, поскольку после полной замены вещества диска решение станет самосогласованным. При типичных для полуразделенных систем параметрах массообмена и аккреционного диска следует ожидать, что уже на временах порядка десятков орбитальных периодов установится стационарный режим течения. Данное обстоятельство означает, что большую часть времени картина течения в рассматриваемых полуразделенных системах описывается представленной выше моделью течения с “горячей линией”.

4 Массообмен посредством звездного ветра

Наряду с перетеканием газа через внутреннюю точку Лагранжа, в последнее время все большее внимание уделяется исследованию другого возможного механизма обмена веществом в ВДС – посредством звездного ветра. Необходимость подобных исследований определяется, в частности, тем, что к системам, где истекающая звезда не заполняет свою полость Роша и обмен веществом идет посредством звездного ветра, относятся очень интересные в наблюдаемых проявлениях симбиотические и массивные рентгеновские звезды. Известно (Бисикало и др., 1994; Бисикало и др., 1996а), что в таких двойных системах картина течения вещества наряду с перетеканием массы через окрестность внутренней точки Лагранжа определяется в значительной степени потоком вещества на вторичную компоненту, вызванным орбитальным движением аккрецирующей звезды в газе звездного ветра. Наличие взаимодействующих потоков приводит к усложнению общей картины течения, и, как следствие, к изменению параметров массообмена, определяющих эволюцию системы.

Проведенные авторами исследования (Бисикало и др., 1994; Бисикало и др., 1996ab; Митсумото и др., 2005) показали, что общая картина течения вещества в двойных системах с компонентами, не заполняющими полости Роша, определяется, в первую очередь, принятыми значениями параметров звездного ветра. Из наблюдений известно, что различные классы объектов, принадлежащих к ВДС с компонентами, не заполняющими полость Роша, характеризуются существенно отличающимися режимами истечения вещества. В настоящей работе, основываясь на результатах газодинамических расчетов, мы попытаемся определить общие тенденции изменения картины течения в зависимости от скоростного режима звездного ветра. Эта задача является тем более интересной, что наблюдаемые скорости истечения в различных двойных системах меняются в широком диапазоне (так, например, в рентгеновских двойных скорости газа в 10 – 100 раз больше, чем в симбиотических звездах), и, соответственно, определение общих закономерностей картины течения в зависимости от скорости звездного ветра может иметь практическое значение при анализе наблюдательных данных. Следует отметить, что в качестве реального параметра, определяющего скоростной режим звездного ветра, целесообразно рассматривать отношение скорости ветра к орбитальной скорости аккретора. Введение такого безразмерного параметра W позволит использовать полученные конкретные результаты и при анализе других двойных систем.

Для полноценного анализа зависимости картины течения от скорости звездного ветра мы провели все расчеты, не меняя выбранных параметров двойной системы. При этом мы использовали типичные для симбиотических звезд параметры двойной системы, однако, учитывая, что скорость истекающего газа является определяющим параметром при формировании структуры течения вещества, полученные результаты расчетов могут быть с определенными оговорками перенесены и на другие системы. На рис. 7 а–г представлены результаты, демонстрирующие общие тенденции, вызванные изменением граничных значений скорости истекающего газа. На рисунках изображены поля давлений с нанесенными на них векторами скорости. В расчетах, представленных на рис. 7а значение параметра W примерно равнялось 1.0; на рис. 7б – 3.0; на рис. 7в и 7г – 6.0 и 15.0, соответственно.

Анализ представленных результатов показывает, что при больших скоростях ветра ($V > V_{\text{орб}}$, т.е. $W > 1$) в двойных системах наблюдается коническая ударная волна, обусловленная прямым потоком вещества от звезды-донора. Увеличение граничной скорости ветра приводит к уменьшению

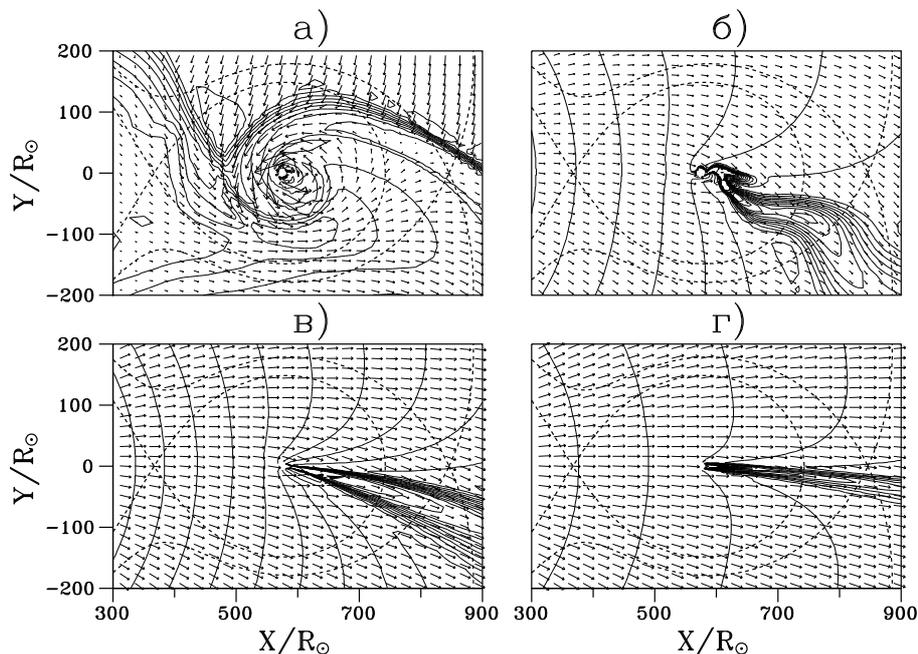


Рис. 7. Поле давлений и вектора скорости для различных значений скорости звездного ветра. Значения безразмерного параметра W : на рис. 7а – 1.0, на рис. 7б – 3.0, на рис. 7в – 6.0, на рис. 7г – 15.0. Полости Роша изображены на рисунке штриховыми линиями

раствора конуса и смещению его оси к линии, соединяющей центры звезд. Уменьшение скорости ветра приводит к заметному усложнению картины течения, и, в частности, к формированию сложной структуры из ударных волн и тангенциальных разрывов. В подобных системах при уменьшении скорости ветра наряду с прямым потоком вещества от звезды-донора существенную роль начинает играть поток, обусловленный орбитальным движением звезды-аккретора в газе звездного ветра. Характерной особенностью рассчитанной структуры при малых скоростях ветра (типичных для симбиотических звезд значениях параметра $W < 1 \div 1.5$) следует, в частности, считать наличие двух отошедших ударных волн, расположенных перед аккретором на пути орбитального движения и между компонентами системы, вместо конической ударной волны. Помимо изменения общей картины течения при различных граничных скоростях ветра в расчетах также было отмечено, что во всех низкоскоростных ($W < 1$) вариантах наблюдалось формирование устойчивого аккреционного диска.

Важным проявлением изменения картины течения в зависимости от скоростного режима звездного ветра, является изменение скорости аккреции вещества. Увеличение скорости ветра приводит к существенному уменьшению скорости аккреции, выраженной в долях от темпа истечения вещества от первичной компоненты.

5 Заключение

Исследование газодинамики массопереноса во взаимодействующих двойных системах представляется чрезвычайно актуальной задачей, поскольку ее решение позволяет определить структуру течения, и, тем самым, оценить эволюционный статус системы, а также рассмотреть присущие ей характерные наблюдательные проявления. К сожалению, решение такой задачи далеко от завершения, поскольку многообразие протекающих в системе физико-химических процессов, а также сложности численного моделирования не позволяют в настоящее время разработать единую

модель, детально описывающую рассматриваемые системы. В связи с этим, исследование процесса массообмена в двойных системах проводится с постепенным усложнением используемых моделей.

В настоящей работе вниманию читателей представлен обзор общепринятых газодинамических моделей для простейших случаев массообмена, когда в рассмотрение принимаются лишь основные (управляющие) процессы, определяющие картину течения. Наряду с общим описанием газодинамических моделей, в работе также суммированы основные особенности течения для различных типов двойных систем без сильного магнитного поля. Представленный в работе анализ результатов позволяет надеяться, что, несмотря на относительную простоту моделей, используемый подход дает возможность выявить на качественном уровне основные особенности течения.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-02-16123, 05-02-17070, 05-02-17874), а также гранта Программы поддержки ведущих научных школ России НШ-162.2003.2, Программ фундаментальных исследований Президиума РАН “Математическое моделирование и интеллектуальные системы” и “Нестационарные явления в астрономии”.

Литература

- Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А., Попов Ю.П., Четкин В.М. // *Астрон. журн.* 1994. Т. 71. С. 560.
- Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А., Четкин В.М. // *Астрон. журн.* 1996. Т. 73. С. 717.
- Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А., Четкин В.М. // *Астрон. журн.* 1996. Т. 73. С. 727.
- Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кайгородов П.В., Кузнецов О.А. // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. С. 879.
- Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кайгородов П.В., Кузнецов О.А., Т. Матсуда // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 494.
- Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кайгородов П.В., Кузнецов О.А., Т. Матсуда // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 648.
- Бисикало Д.В., Кайгородов П.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 788.
- Годунов С.К. // *Матем. Сборник.* 1959. Т. 47. С. 271.
- Масевич А.Г., Тутуков А.В. // *Эволюция звезд: теория и наблюдения.* М.: Наука. 1988.
- Митсумото М., Джанахара Б., Матсуда Т., Ока К., Бисикало Д.В., Кильпио Е.Ю., Боффин Г., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 990.
- Прингл Дж.Е., Уэйд Р.А. (Ред.) // *Взаимодействующие двойные звезды.* М.: Наука. 1993.
- Хрузина Т.С., Черепашук А.М., Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. // *Астрон. журн.* 2001. Т. 78. С. 625.
- Хрузина Т.С., Черепашук А.М., Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. С. 675.
- Хрузина Т.С., Черепашук А.М., Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 99.
- Широков М.Ф. // *Физические основы газодинамики.* М: ГИФМЛ, 1958.
- Boyarchuk A.A., Bisikalo D.V., Kuznetsov O.A., Chechetkin V.M. // *Mass transfer in close binary stars.* Taylor & Frances. London. 2002.
- Crawford J. // *Astrophys. J.* 1955. V. 121. P. 71.
- De Greve J.P. // *Space Sci. Rev.* 1986. V. 43. P. 139.
- Kuiper G.P. // *Astrophys. J.* 1941. V. 93. P. 133.
- Lubow S.H. // *Some issues in the theory of mass transfer* *The Realm of Interacting Binary Stars* /Eds Sahade J., McCluskey J.Jr., Kondo Y. Dordrecht: Kluwer. 1993. P. 25.
- Lubow S.H., Shu F.H. // *Astrophys. J.* 1975. V. 198. P. 383.
- Paczynski B. // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1971. V. 9. P. 183.
- Paczynski B., Sienkiewicz R. // *Acta Astronomica.* 1972. V. 22. P. 73.
- Plavec M. // *Proc. IAU Symp.* 1973. V. 51. P. 216.

- Plavec M. // Active Close Binaries / Ed. C.Ibanoglu. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1990. P. 37.
- Struve O. // Astrophys. J. 1941. V. 93. P. 104.
- Shore S., Livio M., van den Heuvel E.P.J. // Interacting Binaries. Berlin–Budapest: Springer–Verlag, 1994.
- White N.E. // Astron. and Astrophys. Rev. 1989. V. 1. P. 85.