Отзыв официального оппонента
на диссертацию Максимовой Ломары Аслановны

по теме “ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН НА СТРУКТУРУ И ЭВОЛЮЦИЮ ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА”

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1-физика космоса, астрономия

Диссертация Максимовой Ломары Аслановны посвящена теоретическому исследованию тепловых процессов в околозвездных протопланетных дисках на стадии Т-Тельца.

В первой главе диссертации строится модель конвективной неустойчивости как механизма, претендующего на объяснение наблюдаемых радиальных неоднородностей плотности в околозвездных протопланетных дисках и вспышек светимости молодых звезд. Модель основана на пространственно-одномерном нестационарном уравнении Прингла с источником массы для распределения поверхностной плотности вещества и системе уравнений для температуры и лучистой энергии, моделирующей нагрев и охлаждение околозвездного диска в вертикальном направлении. Максимовой Л.А. создана численная реализация модели и проведен ее параметрический анализ. Установлено, что в зависимости от параметров модели (например, интенсивности аккреции вещества из оболочки на диск и фоновой вязкости диска) модель предсказывает регулярный, эпизодический либо интенсивный слабоосциллирующий характер аккреции вещества на протозвезду.

Во второй главе диссертации рассматривается модель тепловых волн диске, вызванных эффектом затенения звездного излучения поверхностными неоднородностями. В этой модели поверхностная плотность диска стационарна и монотонно зависит от радиуса, а вертикальная тепловая структура диска восстанавливается из системы уравнений для температуры и лучистой энергии. Соискательницей воспроизведены режимы генерации тепловых волн, существование которых было ранее предсказано другими авторами методом дисперсионного анализа.

В третьей главе диссертации строится более согласованная модель тепловых волн в околозвездном диске на основе осесимметричной модели движения невязкого газа с учетом излучения звезды и диффузии теплового излучения. В рамках этой модели Максимовой Л.А. показано, что совместный учет двумерных эффектов, связанных с гидродинамикой и переносом теплового излучения, существенно меняет режимы, известные из исследования 1+1 модели того же процесса. В частности, в двумерной модели не удается воспроизводить нарастающие по амплитуде возмущения

температуры диска, при том, что редукция двумерной модели до 1+1 приближения воспроизводит генерацию тепловых волн, полученную ранее другими авторами методом дисперсионного анализа и соискательницей методом численного моделирования.

Актуальность разработки и исследования 1+1 и двумерных моделей динамики и тепловых процессов определяется с одной стороны нарастанием объема наблюдательных данных о светимости молодых звезд и морфологии протопланетных дисков на стадии Т-Тельца, с другой стороны, невозможность моделировать весь комплекс физических процессов в рамках трехмерных моделей. Разработка и исследование одномерных феноменологических моделей генерации тепловых волн в настоящее время проводится также другими научными группами за рубежом.

Изложенные в диссертации Максимовой Л.А. результаты являются новыми. В частности, в рамках разработанной 1+1 модели на базе нестационарного уравнения Прингла впервые показано, что конвективная неустойчивость в аккреционном диске может приводить к регулярному, эпизодическому или интенсивному слабоосциллирующему режиму аккреции вещества на протозвезду. Кроме того, впервые разработана двумерная модель динамики диска с учетом детальных тепловых процессов для изучения вертикальной структуры диска. Также впервые произведено систематическое сопоставление результатов одномерного и двумерного моделирования и выявлены ограничения одномерной модели.

Достоверность результатов подтверждается согласованностью параметров диска и звезды, определенных в ходе численного моделирования, с наблюдательными данными и численными моделями других авторов. Кроме того, представленные в диссертации результаты численного моделирования согласуются с известными ранее аналитическими результатами других авторов.

Текст диссертации написан доступным языком и хорошо проиллюстрирован, выводы и защищаемые положения следуют из представленных численных экспериментов.

По содержанию работы имеются следующие замечания.

Диссертация содержит ссылки на 85 источников, однако в ней отсутствует систематический обзор литературы, в котором представлена проблемная ситуация в области, обосновывающая мотивацию и задачи исследования. Это существенно затрудняет понимание читателем логики работы. Так, например, во второй главе рассматривается 1+1 модель тепловой структуры диска, в которой удается воспроизвести тепловые волны. В третьей главе приводится более согласованная двумерная модель этого же явления, причем показывается, что в режимах, когда 1+1 модель предсказывала появление тепловых волн, в двумерной модели эти волны отсутствуют. Без дополнительных пояснений результаты этих двух глав выглядят так, как будто соискательницей диссертации была предложена упрощенная модель, в

которой тепловые волны оказались “артефактом упрощения”. В этом случае неясно, зачем представлять промежуточные результаты в диссертацию.

Представленные в диссертации модели предполагают, что (1) релаксация температуры частиц к температуре газа происходит мгновенно, (2) установившаяся температура газа совпадает с температурой частиц. При этом в диссертации отсутствует оценка характерного времени тепловой релаксации для частиц разного размера в условиях околозвездного диска. Кроме того, известно, что если излучение поглощается частицами, но не газом, то установившаяся температура газа может существенно отличаться от температуры частиц, то есть излучение может сформировать отрыв температуры частиц от температуры газа. Этот отрыв имеет место, например, если массовая доля частиц в смеси невелика и количество поглощенной частицами энергии недостаточно для нагрева массивного газа. Такой эффект описан, например, в работе В. Н. Снытникова, Е. Е. Песковой, О. П. Стояновской, “Модель двухтемпературной среды газ — твердые наночастицы с лазерным пиролизом метана”, *Матем. моделирование*, **35**:4 (2023), 24–50.

Кроме того, есть замечания **по оформлению работы**, в том числе такие, которые затрудняют понимание ее содержания и дальнейшее использование результатов исследования.

В главе 3 (раздел 3.3.1) описана двумерная гидродинамическая модель диска. Сначала приводятся законы сохранения массы, импульса и энергии для невязкого газа в дивергентном виде (уравнения 3.1, 3.2 и 3.3), а затем уравнения для температуры и лучистой энергии (3.7 и 3.8) в предположении, что в газ поступает энергия в виде излучения звезды. Ясно, что уравнение 3.3 записано некорректно, поскольку должно содержать источниковые члены, описывающее излучение. Полное описание двумерной модели сделает возможным следующий шаг - теоретическое исследование тепловых волн в двумерной постановке, в частности, методом дисперсионного анализа.

Несущественные замечания, не затрагивающие содержания работы, приведены ниже.

1. На стр. 20 присутствует опечатка в размерности вязкости.

2. В тексте используются дублирующие обозначения. Так на стр.22 γ-массовая доля вещества в конвективно-неустойчивой области, а на стр.84 γ-показатель адиабаты.

2. Стр. 91 диссертации. Не ясно, зачем систему (3.15) линейных алгебраических уравнений с пятидиагональной матрицей решать итерационным методом, если существует экономичный прямой метод пятиточечной прогонки.

Несмотря на высказанные замечания диссертация Максимовой Ломары Аслановны представляет собой законченную научную работу, результаты которой являются новыми и достоверными и могут быть использованы в дальнейших исследованиях

физики околозвездных дисков. Полученные соискательницей результаты опубликованы в 4 статьях, рекомендованных ВАК, а также прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях. Текст диссертации и автореферата удовлетворяет требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациями по специальности 1.3.1 - физика космоса и астрономия. Считаю, что Максимова Ломара Аслановна безусловно заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
старший научный сотрудник
Института гидродинамики им.М.А.Лаврентьева СО РАН
(г.Новосибирск, Пр.Академика Лаврентьева, 15
тел. +79139108515
email: o.p.sklyar@gmail.com)
к.ф.-м.н.

Стояновская Ольга Петровна

Личную подпись Стояновской О.П. заверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н.