

## Отзыв

### официального оппонента

на диссертацию Раздобурдина Дмитрия Николаевича  
«Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук  
по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия»

Тема исследований, выбранная диссертантом, является актуальной и значимой.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём диссертации равен 154 страницам. В состав диссертации входят 28 рисунков и библиография из 183 наименований.

Во введении даётся обзор современного состояния области науки по теме диссертации, обосновываются актуальность и цели работы. Здесь же автор приводит обзор механизмов турбулизации сдвиговых течений. Основное внимание уделено так называемому докритическому переходу к турбулентности, при котором поток теряет нелинейную устойчивость в отсутствие неустойчивости линейной. В этом случае за передачу энергии от фонового потока к турбулентным флуктуациям отвечает транзиентный рост малых возмущений.

В первой главе автор подробно описывает применяемые в диссертации математические методы, которые позволяют найти оптимальное возмущение, т. е. возмущение, демонстрирующее максимально возможный рост амплитуды к заданному моменту времени. При этом описанный среди прочего вариационный метод поиска оптимального возмущения был впервые применён в астрофизической литературе именно в работах данного диссертационного цикла.

Во второй главе автор рассчитывает оптимальный рост возмущений, представляющих собой линейную комбинацию глобальных звуковых мод в

геометрически тонком квазикеплеровском газовом торе. Благодаря использованию ВКБ-приближения, радиальную структуру мод автору удалось получить аналитически. Показано, что оптимальный рост возмущений в рассматриваемой постановке может достигать значительных величин, причём величина роста обратно пропорциональна отношению протяженности диска к его толщине.

В третьей главе автор переходит от расчёта оптимального роста возмущений в виде комбинации мод к использованию вариационного метода, что позволило исследовать более общий случай произвольных адиабатических возмущений в полубесконечном потоке. Основное внимание уделяется анализу оптимального роста возмущений с азимутальной длиной волны, сопоставимой с толщиной потока. Автором было показано, что даже среди подобных крупномасштабных возмущений оптимальными по-прежнему являются сдвиговые вихри в форме лидирующих спиралей. Подобные возмущения способны расти в десятки раз за несколько оборотов вещества на внутреннем краю диска.

Также автор сумел сформулировать и аналитически доказать необходимое и достаточное условие возможности транзиентного роста линейных возмущений в двумерном вращательном потоке идеальной жидкости.

В четвёртой главе автор исследует влияние диссипативных эффектов на оптимальный рост возмущений. Диссипация играет ключевую роль в ограничении величины транзиентного роста лидирующих спиралей, которые были исследованы автором в третьей главе. Учёт вязких сил позволил автору вычислить максимально возможный фактор оптимального роста при заданном числе Рейнольдса.

Также в данной главе автор рассмотрел влияние релятивистских эффектов отклонения орбитальной и эпициклической частот от их ньютоновских значений. Автор продемонстрировал, что в релятивистских областях газовых дисков рост крупномасштабных вихрей усиливается обратно пропорционально четвертой степени эпициклической частоты. По этой причине её стремление к нулю на внутреннем краю предельно релятивистского диска приводит к

значительному увеличению оптимального роста крупномасштабных возмущений. Полученным кривым оптимального роста глобальных возмущений автор даёт качественную интерпретацию на языке локального подхода.

В целом диссертация характеризуется оригинальностью применённых автором методов и новизной полученных результатов.

Однако, диссертация не лишена некоторых недостатков.

1. На мой взгляд, для диссертации по астрофизике слишком много внимания уделено математическому введению — общей теории линейных операторов в гильбертовом пространстве. (пункты 1.1 — 1.61). Физическая постановка задачи начинается лишь со стр. 50.

2. Хотя процедура получения двумерного уравнения (58) из общих уравнений (54) — (57) является по-видимому общепринятой, вывод формулы (58) для меня остался не вполне обоснованным.

3. ВКБ решение уравнения (62) проведено достаточно корректно, однако условие квантования мод (69) обычно не требует сшивки и может быть получено более простым способом.

4. Обсуждение численных методов в разделе 4.6, хотя и важно для автора, оно, на мой взгляд, выпадает из общего изложения, его бы следовало поместить в диссертацию в качестве приложения.

Сделанные замечания, однако, не снижают ценности диссертационной работы. Можно с уверенностью заключить, что избранная автором тема вполне актуальна, все научные результаты, выносимые на защиту, хорошо обоснованы и достоверны. Выводы автора значимы для такой области науки, как астрофизика высоких энергий. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и ряде международных конференций, а также были опубликованы в высокорейтинговых периодических научных журналах. Научные результаты диссертации могут быть использованы в ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ИКИ РАН, ГАО РАН, АКЦ ФИАН.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук МГУ, а её автор **Раздобурдин Дмитрий Николаевич** заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук МГУ.

Официальный оппонент,

Д.-ф.м.н, член-корр. РАН



К.П.Зыбин

Подпись К.П. Зыбина заверяю

Ученый секретарь ФИАН



А.В.Колобов