

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертационную работу Раздобурдина Дмитрия Николаевича  
по теме «Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности «01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия».

Диссертационная работа Дмитрия Раздобурдина связана с одной из важнейших проблем теоретической астрофизики — проблемой возникновения в аккреционных и протопланетных дисках эффективной вязкости, многократно превышающей микроскопическую. Для дисков как существенно диссипативных систем - это эквивалентно проблеме самого их существования. Открытая четверть века назад сверхкритическая турбулентность кеплеровского плазменного потока в присутствии магнитного поля не способна объяснить ряд важных наблюдательных фактов, и единственным, по-настоящему универсальным механизмом появления большой эффективной вязкости в таком потоке могла бы стать субкритическая гидродинамическая турбулентность. Тем не менее, вот уже более 40 лет ни теоретически, ни экспериментально, ни в численных симуляциях не удалось показать ее существование, хотя проверка проведена уже до числа Рейнольдса в один миллион. Кеплеровский поток оказался наиболее динамически устойчивым среди всех исследованных типов сдвиговых потоков. Тем не менее, реальное число Рейнольдса в астрофизических условиях может достигать триллиона, а значит, основная загадка теории астрофизических дисков еще ждет своего разрешения.

В описанной ситуации весьма актуальным представляется исследование свойств линейного роста возмущений в кеплеровском потоке, что является необходимым условием существования турбулентности в нем. Поскольку рост линейных мод возмущений либо очень слаб, либо вовсе отсутствует в геометрически тонких дисках, перед нами встает значительно более сложная задача анализа динамики так называемых транзиентных возмущений, демонстрирующих рост амплитуды лишь ограниченное время.

Традиционный метод исследования линейной динамики гидродинамических возмущений на языке мод восходит своими корнями к работам Лорда Рэлея и насчитывает полуторавековую историю. Аппарат немодальной динамики, решающий более общую задачу поиска возмущений, наиболее быстро растущих на конечных промежутках времени и более кратко называемых оптимальными возмущениями, сформировался и был успешно применен в исследовании плоскопараллельных сдвиговых потоков лишь в конце 20 века. Предлагаемая же к защите диссертационная работа является первым у нас в стране циклом исследований динамики оптимальных возмущений в астрофизических дисках, а вариационный метод поиска таких возмущений, заключающийся в итерационном решении системы прямых и сопряженных линеаризованных уравнений Навье-Стокса, был применен в ней к астрофизической задаче впервые в мире. Главным результатом работы Дмитрия, по моему мнению, стало обнаружение значительного транзиентного роста амплитуды глобальных сдвиговых вихрей с азимутальным масштабом, многократно превышающим толщину тонкого диска и даже сравнимым с характерным радиальным масштабом в таком диске. Более того, Дмитрий показал, что в релятивистских областях аккреционных дисков рост подобных глобальных вихрей становится еще сильнее и пропорционален четвертой степени отношения угловой скорости вращения вещества на радиусе локализации вихря к эпициклической частоте на этом же радиусе. Полученные результаты позволяют уверенно предположить существование нелокальной квази-двумерной турбулентности в аккреционных и протопланетных дисках в области больших чисел Рейнольдса, еще не достигнутых в численных экспериментах. Достаточным условием справедливости этого предположения являлось бы открытие положительной нелинейной обратной связи от исследованных Дмитрием сдвиговых вихрей в фазе их максимальной амплитуды, которая пополняла бы резервуар начальных оптимальных вихрей. Последнее является предметом будущих работ.

Нельзя не отметить положительные качества Дмитрия Раздобурдина как исследователя. Еще будучи студентом 3 курса астрономического отделения физического факультета МГУ, он увлеченно и с успехом взялся за непростую теоретическую задачу по расчету оптимальных звуковых возмущений в гиперзвуковом диске, попутно освоив как аналитические методы решения соответствующих



дифференциальных уравнений, так и численные методы сингулярного разложения матриц, представляющих ненормальный динамический оператор решаемой им математической задачи. К защите дипломной работы Дмитрий проявил себя как аккуратный программист и приобрел квалификацию в численном интегрировании начально-краевых задач, разработав и отладив программный код, позволяющий рассчитывать эволюцию произвольного начального возмущения в тонком диске с модельными радиальными профилями поверхностной плотности и полутолщины. Наряду с этим, им была освоена и применена сложная вариационная техника поиска оптимальных возмущений. В настоящий момент он обладает всеми основными приемами и методами анализа, которые должны быть в арсенале астрофизика-теоретика мирового уровня, умеет работать с современной научной литературой, самостоятельно ставить и быстро решать актуальные научные задачи. Мне приятно отметить, что за время нашего сотрудничества из добросовестного исполнителя Дмитрий вырос в сложившегося и творчески активного ученого. Считаю, что Дмитрий безусловно заслуживает ученого звания «кандидат физико-математических наук».

Научный руководитель,  
научный сотрудник  
отдела релятивистской астрофизики  
ГАИШ МГУ, к.ф.-м.н.

В.В. Журавлев

Подпись В.В. Журавлева удостоверяю.  
Директор ГАИШ МГУ, академик РАН

А.М. Черепашук