Авторы благодарят И. В. Артамонову за помощь при проведении лабораторных экспериментов и расчетов на ЭВМ ЕС 10-66.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Агѕепјеv S. A., Gubar A. Y., Shelkovnikov N. K.//Anisotropy of fluid flows in external forces fields. Jurmala, Latvian SSR, 1990. Р. 7. [2] Филлипс О. М.//Соврёменная гидродинамика. Успехи и проблемы. М., 1984. С. 297. [3] Phillips O. M.//J. Fluid Mech. 1960. 9. P. 193. [4] Вепиеу D. J./J. Fluid Mech. 1962. 14. Р. 577. [5] Захаров В. Е.//Журн. прикл. мех. и техн. физики. 1968. № 2. С. 86. [6] Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. М., 1987. [7] Мс Goldriek L.//J. Fluid Mech. 1965. 21. Р. 305. [8] Ваll F. K.// //J. Fluid Mech. 1964. 19. Р. 465. [9] Нестеров С. В./Изв. АН СССР, ФАО. 1970. 6, № 7. С. 774. [10] Бреховских Л. М., Гончаров В. В., Куртепов В. М., Наугольных К. А.//Там же. 1972. 8, № 2. С. 192. [40] Миропольский Ю. З. Динамика внутренних гравитационных воли в океане. Л., 1981. [12] Лонге-Хиггинс М. С., Гилл А. Э.//Нелинейная теория распространения воли. М., 1970. С. 161. [13] Арсеньев С. А., Губарь А. Ю., Шелковников Н. К.//Вести. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1990. 31, № 3. С. 63. [14] Арсеньев С. А., Рыкунов Л. Н., Шелковников Н. К.//ДАН СССР. 1990. 314, № 4. С. 821. [15] Арсеньев С. А.//Водные ресурсы. 1991. № 1. С. 141. [16] Агѕепіеv S. А.//Ссеал Modelling. 1990. N 88. Р. 10. [17] Арсеньев С. А., Шелковников Н. К.//Тез. докл. III Вессюз. конф. «Вихри и турбулентность в океане». Калининград, 1990. С. 53. [18] Восгаг-Кагакіеwicz В., Вопа J. L., Соhen D. L.//Dynamical Problems in Continuum Physics. N. Y.: Springer-Verlag, 1987. Р. 130. [19] Сгаік А. D. Wave Interactions and Fluid Flows, Cambridge Univercity Press., 1985. [20] Шабер д'Йер Г., Ле Прево// //Внутренине волны в океане. Новосибирск (Изд. ВЦ СО АН СССР), 1972. С. 194. [21] Шен И. Р. Пранцины нелинейной оптики. М., 1989. [22] Габов С. А. Введение в теорию нелинейных воли. М., 1988. [23] Арсеньев С. А., Шелковников Н. К./ /Намика вод шельфов. М., 1990. [24] Бенджамен Т. Б.//Нелинейная теория распространения воли. М., 1970. С. 83. [25] Фейр Дж.//Там же. С. 7.

Поступила в редакцию 30.03.90

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1991. Т. 32, № 2

УДК 532:65:532.529.2

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КРИТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛА РЭЛЕЯ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Е. П. Анисимова, И. В. Петренко, А. А. Сперанская

(кафедра физики моря и вод суши)

Представлены результаты экспериментального определения критического значения числа Рэлея, характеризующего возникновение режима турбулентного свободноконвективного движения. Показано, что для условий развитой свободной конвекции в поверхностном слое охлаждающейся с поверхности воды критическое значение числа Рэлея равно 1105, что хорошо согласуется с величиной, полученной теоретически для пограничного слоя с одной жесткой и одной свободной границами.

Экспериментальные данные, приведенные в работах [1, 2], свидетельствуют о том, что в воде в условиях свободной конвекции область между слоем с молекулярным механизмом переноса тепла и зоной развитого конвективного движения настолько тонка, что обнаружить ее инструментально не всегда удается. Исходя из этого факта, в работе [3] для определения критического значения числа Рэлея, характеризующего возникновение режима развитого свободно-конвективного движения в воде, охлаждающейся с поверхности, было использовано соотношение

(1)

 $Nu = 1 = A_{\omega} Ra_{ce}^{1/3}$,

где Nu — число Нуссельта, Ra — число Рэлея, A_{w} — числовой коэффициент. Таким образом, предполагалось, что молекулярный механизм теплопереноса непосредственно переходит в конвективный.

Коэффициент A_w , приводимый различными исследователями, меняется в некотором интервале значений [4]. В этом случае будет меняться и значение Racr, определяемое по формуле (1). Так, при изменении A_w от 0,11 [5, 6] до 0,25 [2] величина Racr, рассчитанная по (1), будет принимать значения от 750 до 64 соответственно. Вместе с тем в работах [7, 8] критическое значение числа Рэлея для случая пограничного слоя с одной жесткой и одной свободной границами принимается равным 1100. Заниженные величины критического значения числа Racr, найденные с использованием зависимости (1), обусловливаются тем, что константа A_w определяется в экспериментах по осредненному во времени потоку тепла.

Представляет интерес провести экспериментальную оценку значения Ra_{cr} для условий свободной конвекции в охлаждающейся с поверхности жидкости.

В формулу для расчета числа Рэлея

$$Ra = \frac{g\alpha_w \Delta t l^3}{k_w v_w} \tag{2}$$

входит величина линейного масштаба l, выбор которого для условий свободно конвективного движения в достаточно глубоком слое охлаждающейся с поверхности воды неоднозначен. В (2) g — ускорение силы тяжести, a_w — коэффициент теплового расширения воды, k_w и v_w — ее молекулярные температуропроводность и кинематическая вязкость, Δt — перепад температуры в слое. Выберем в качестве масштаба l приведенную толщину холодной пленки, которую можно записать так:

$$l = \frac{(t_w - t_s)}{(dt_w/dz)|_{z \to 0}},$$
(3)

здесь t_s — температура водной поверхности, t_w — температура основной массы воды. Тогда число Рэлея примет вид

$$Ra = \frac{g\alpha_w (t_w - t_s)^4}{k_w v_w [(dt_w/dz)]_{z \to 0}]^3}.$$
(4)

Для оценки числа Рэлея с использованием формулы (4) были поставлены специальные эксперименты.

Исследуемая жидкость — водопроводная вода — наливалась в теплоизолированную емкость размерами $24 \times 40 \times 20$ см и нагревалась электронагревателем до состояния, при котором перепад температуры в системе вода — воздух Δt_{wa} был несколько выше того значения, при котором предполагалось проводить измерения. Тепловые потери установки через теплоизоляцию оценивались калориметрическим методом. Вода в емкости после нагрева отстаивалась для освобождения от пузырьков газа, выделившихся при ее нагреве.

В экспериментах исследовалось вертикальное распределение температуры в тонком поверхностном слое воды во времени. Для измерения температуры использовались собранные в гирлянду микротерми-

68

сторы МТ-67, сенсорные элементы которых имели размеры 0,10 мм и располагались на горизонтах 0; 0,5; 1,3; 2,3 и 3,2 мм от поверхности воды. Постоянная времени термисторов составляла 0,01 с.

Питание термисторов было подобрано так, что они реагировали только на колебания температуры и игнорировали динамические флуктуации жидкости. В таком режиме работы разогрев термистора за счет пропускания через него электрического тока не оказывает влияния на исследуемые процессы теплообмена в воде, и нижележащий термистор не вносит возмущения в поле температуры вышележащего. Температура воды с помощью термисторов определялась с точностью 0,01 °С.

Для тарировки все термисторы помещались в центр сосуда, вода в котором перед этим тщательно перемешивалась. Одновременно с записью показаний термисторов в течение 1 мин осуществлялась их привязка к среднему значению температуры воды в установке, измеренному ртутным термометром с ценой деления 0,01 °C. Тарировка термисторов осуществлялась после каждой серии измерений.



Рис. 1. Осциллограмма с записью показаний термисторов в тонком приповерхностном слое охлаждающейся с поверхности воды

Пример осциялограмм, по которым определялись величины $(dt_w/dz)|_{z\to 0}$ и t_s , приведен на рис. 1. Как следует из рис. 1, температура в исследуемом слое жидкости, в том числе и температура водной поверхности, колеблется. Последнее хорошо согласуется с результатами [9] и подтверждается фотографией температурного поля водной поверхности, полученной с помощью тепловизора фирмы АГЕМА (рис. 2). Тепловизор позволяет также получать температурные разрезы вдоль водной поверхности (см. кривую на рис. 2) по любой из 128 строк термоизображения. Амплитуды колебаний температуры, выявленные по данным тепловизора и по данным осциялограмм на горизонте $z\simeq 0$ для одних и тех же режимов, хорошо согласуются.

Для оценки числа Рэлея в фиксированные моменты времени по показаниям первого термистора, расположенного на горизонте $z \simeq 0$, определялась температура t_s . Градиент $(dt_w/dz)_{z\to 0}$ вычислялся по разности показаний первого и второго термисторов, разнесенных по вертикали на 0,5 мм. Величина t_w за время эксперимента не менялась и определялась по ртутному термометру.

69



Рис. 2. Температурное поле водной поверхности в режиме турбулентного свободноконвективного движения. Кривая справа — температурный разрез вдоль строки. отмеченной маркером (прямая линия) на фотографии поля поверхностной температуры воды (слева)

Измерення выполнялись в режиме турбулентной конвекции — число Рэлея установки менялось от $1,4\cdot10^8$ до $8,5\cdot10^8$ — при перепадах температуры Δt_{wa} от 2 до 12°C.

По осциллограммам, относящимся к моментам времени, когда в установке реализовался режим развитой свободной конвекции (см. рис. 1), через равные промежутки времени были определены значения t_s и $(dt_w/dz)|_{z\to0}$ и по ним рассчитано число Рэлея. Такой способ позволяет набрать большую статистику и с хорошей точностью определить среднее значение числа Ra для приповерхностного пограничного слоя воды. Определенное таким образом число Ra соответствует некоторой средней приведенной толщине холодной пленки.

Как известно, в условиях свободной конвекции реализуется автоколебательный режим, который обусловливается сравнительно медленным нарастанием плотностной неустойчивости в пограничном слое с последующей быстрой конвективной разрядкой в виде «теплового пробоя» пограничного слоя и образованием конвективных структур. Процесс разрушения теплового пограничного слоя происходит гораздо быстрее, чем его развитие. Критическое значение числа Рэлея реализуется лишь в момент разрушения пограничного слоя, которому соответствует максимальная толщина холодной пленки. Следовательно, метод расчета числа Рэлея, приведенный выше, может дать значение только меньшее критического.

Критическое же значение числа Рэлея можно получить, определяя приведенную толщину холодной пленки в моменты, предшествующие разрушению пограничного слоя. Эти моменты определялись по записи температуры в пограничном слое и соответствовали минимальным значениям температуры, регистрировавшейся термистором, расположенным на горизонте z=3,2 мм. Расчет числа Рэлея двумя указанными способами дал соответственно значения 789 и 1105. Значение Ra=1105 хорошо согласуется с величиной $Ra_{cr}=1100$, полученной для пограничного слоя с одной жесткой и одной свободной границами [7, 8], которую и следует считать критическим значением числа Ra для условий обсуждающихся в настоящей работе экспериментов.

70

ЛИТЕРАТУРА

[1] Анисимова Е. П., Белов Ю. Н., Никитина Е. А., Сперанская А. А.//Изв. АН СССР, ФАО. 1983. 19, № 9. С. 981. [2] Гинзбург А. И., Зацепни А. Г., Федоров К. Н.//Мезомасштабная изменчивость поля температуры в океане. М., 1977. С. 109. [3] Гинзбург А. И., Федоров К. Н.//Изв. АН СССР, ФАО. 1978. 14, № 4. С. 433. [4] Грачев А. А.//Гам же. 1989. 25, № 2. С. 179. [5] Борт-ковский Р. С.//Тр. ГГО. 1981. Вып. 454. С. 3. [6] Грачев А. А., Ярошевич М. И./Изв. АН СССР, ФАО. 1978. 14, № 4. С. 433. [4] Грачев А. А.//Гам же. 1989. 25, № 2. С. 179. [5] Борт-ковский Р. С.//Тр. ГГО. 1981. Вып. 454. С. 3. [6] Грачев А. А., Ярошевич М. И./Изв. АН СССР, ФАО. 1989. 25, № 8. С. 887. [7] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., 4954. [8] Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость сжимаемой жидкости. М., 1972. [9] Анисимова Е. П., Иванов В. Н., Милехин Л. И., Сперанская А. А.//Изв. АН СССР, ФАО. 1985. 21, № 10. С. 1918.

Поступила в редакцию 26.06.90

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ: 1991. Т. 32, № 2

АСТРОНОМИЯ

УДК 524.726

РОЛЬ РАДИАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ И ИЗГИБОВ ДИСКА В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ДИНАМО

Б. Г. Зинченко, О. В. Пилипенко

(кафедра математики; кафедра физики Земли)

На основе теории возмущений рассмотрено влияние изгибов диска и радиальных течений на динамо в тонком диске. На примере Галактики, а также спиральных галактик М51 и М81 выяснено, что роль обоих факторов невелика. Слабое влияние радиальных потоков объясняется характером их зависимости от радиуса. Роль изгибов диска в основном сводится к эффективному изменению кривой вращения.

Введение

В последнее десятилетие появились сравнительно твердые представления о происхождении крупномасштабных магнитных полей в ближайших спиральных галактиках [1, 2]. Происхождение поля объясняется действием динамо в осесимметричном дифференциально вращающемся турбулентном диске межзвездного газа [3, 4]. Результаты теории динамо хорошо согласуются со многими особенностями наблюдаемых полей. Однако в реальных галактиках имеются отклонения от этой упрощенной модели. Крупномасштабное движение газа в них не сводится к дифференциальному вращению ввиду наличия радиальных скоростей, направленных обычно к центру диска. Также сама форма диска отклоняется от осесимметричной, в частности из-за изгибов, вызванных, возможно, приливными взаимодействиями с соседними галактиками. В настоящей работе исследовалось влияние радиальных течений и изгибов диска, не учтенных ранее в стандартной модели, на генерацию крупномасштабных магнитных полей.

Уравнения динамо

Основой для построения теории галактических полей является механизм турбулентного динамо. Уравнение для крупномасштабного магнитного поля в турбулентном потоке имеет вид

 $\partial \mathbf{B}/\partial t = \operatorname{rot}[\mathbf{VB}] + \operatorname{rot} \alpha \mathbf{B} + \beta \Delta \mathbf{B},$

(1)