

часто используются в связи с построением моделей атмосфер у пульсирующих звезд (см., например, [261, 378]). Теории нелокальной конвекции почти не применяются при проведении эволюционных расчетов, так как существенные математические осложнения не сопровождаются заметным увеличением точности результатов по сравнению с локальной теорией [306]. Во всех случаях остается произвол, связанный с выбором параметров теории типа l в (11.8) или функций типа ψ_0 в (11.12).

§ 12. Численное моделирование конвекции

При изучении таких астрофизических проблем, как аномалии химического состава, определяемые по спектрам звезд, солнечная грануляция, генерация нетеплового потока конвекцией приближение пути перемещения в различных его модификациях оказывается недостаточным и используется численное моделирование конвекции. Решаемые при этом задачи очень сложны и требуют трудоемких двух- и трехмерных нестационарных расчетов [207]. Задачи подобного типа рассматриваются в гидродинамике для моделирования движения газов и жидкостей с потоками тепла, важной областью применения которых является моделирование движений в атмосфере Земли и планет.

Теория внутреннего строения звезд имеет лишь некоторые точки соприкосновения с такими расчетами: с их помощью объясняются отдельные наблюдательные особенности звезд на разных эволюционных стадиях. Как правило, каждая задача по численному моделированию предполагается для применения к какой-либо конкретной астрофизической задаче. Отсутствие универсальности, а также большие вычислительные сложности объясняют то, что численные модели конвекции не применяются и вряд ли будут в ближайшее время использоваться при расчетах звездной эволюции. Приведем качественное описание различных приближений при численном моделировании конвекции.

Основой для такого моделирования является система гидродинамических уравнений Навье-Стокса [150], в которой содержатся эффекты вязкости и теплопроводности. При исследовании ламинарной конвекции свойства переноса определяются излучением или газом. Численное исследование ламинарной конвекции на двумерных моделях горизонтального слоя с твердыми границами ("валиковая конвекция") обнаружило ячеистую структуру [83]. Отметим, что картина трехмерной конвекции является более сложной [312], топологически эквивалентной наматыванию линий тока на тор — "торовая конвекция" (рис. 19).

Как отмечалось в § 10, п. в, конвекция в звездах, как правило, является турбулентной. Численное моделирование турбулентной конвекции проводится в приближении, когда мелкомасштабные конвективные движения рассматриваются усредненно в виде турбулентных коэффициентов вязкости и теплопроводности. Движения максимального масштаба $\sim H_p$ и больше, даже в условиях турбулентной конвекции образуют регулярные структуры, проявляющиеся в наблюдениях солнечной грануляции [312]. Исследование турбулентной конвекции в постановке, аналогичной [83], но с турбулентными коэффициентами переноса проводилось в работах [324, 581].

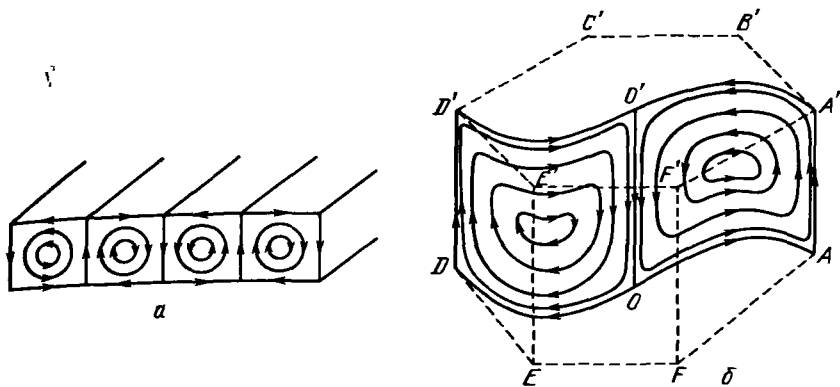


Рис. 19. Конвективные ячейки:
 а) двумерная "валиковая" конвекция,
 б) трехмерная ячеистая "торовая" конвекция

Важное упрощение, значительно облегчившее численное моделирование турбулентной конвекции, сделано Огурой и Чарнеем (1960) и названо неупругим приближением [613]. Оно заключается в том, что P , ρ , T и другие термодинамические величины предполагаются мало отличающимися от равновесных значений и рассматриваются в линейном приближении, в то время как скорость v и динамические характеристики рассматриваются точно. Это приближение позволило отфильтровать генерируемые конвекцией звуковые волны, которые не влияют на ее основные характеристики, но затрудняют вычисления. Трехмерные расчеты солнечной грануляции в рамках неупругого приближения проводились в [338], двумерные расчеты, аналогичные [324], в [405].

Более простое, но все еще требующее больших численных расчетов приближение основано на разложении всех искомым переменных по заданной системе функций в горизонтальном направлении (локальное приближение). В этом приближении получается система обыкновенных уравнений для стационарной конвекции. Расчеты в неупругом модельном приближении в стационарном случае с оставлением одной и двух профилирующих функций проводились в [480].

Упрощения неупругого модельного приближения позволили исследовать различные области параметров, так как требуют существенно меньших затрат машинного времени, чем прямые двух- и трехмерные расчеты [83, 324, 581, 338, 405]. К настоящему времени в области численного моделирования конвекции сделано не так много. Можно надеяться, что дальнейшее развитие теории позволит более тесно связать ее с конвективными движениями в звездах.