

К функциональному М. близки и установки демонстрац. М., не использующие реальные физ. модели, а представляющие собой модели, лишь наглядно показывающие функционирование техн. устройств или природные физ. явления. Типичной установкой демонстрац. М. является планетарий, демонстрирующий модель Солнечной системы, звёздного неба и др. явления.

Кроме прямого физ. М. при исследовании разл. физ. процессов используются разл. аналогии, позволяющие на основе односторонности матем. ур-ний, описывающих разные физ. процессы, заменять изучение исследуемого процесса изучением др. процесса, к-рый проще осуществить в лаб. условиях. Напр., при М. процессов теплообмена используется электротепловая аналогия, в к-рой исследуемое поле темп-р заменяется полем электр. потенциала в контуре, включающем омич. сопротивление R и ёмкость C , а аналогом коэф. температуропроводности является величина $1/RC$.

Существуют также аналогия задач о кручении упругого стержня и о вихревом течении идеальной жидкости, электрогидродинамич. аналогия между задачами гидродинамики и электротехники и др., но эти аналогии сравнительно редко применяются при М.

Приложения М. Моделирование находит многочисл. приложения как при научных исследованиях, так и при решении большого числа практич. задач в разл. областях техники. Им широко пользуются в строит. деле (определение усталостных напряжений, эксплуат. разрушений, частот и форм свободных колебаний, виброзащита и сейсмостойкости разл. конструкций и др.), в гидравлике и гидротехнике (определение конструктивных и эксплуат. характеристик разл. гидротехн. сооружений, условий фильтрации в грунтах, М. течений рек, волн, приливов и отливов и др.), в авиации, ракетной и космич. технике (определение характеристик летат. аппаратов и их двигателей, силового и теплового воздействия среды и др.), в судостроении (определение гидродинамич. характеристик корпуса, рулей и судовых двигателей, ходовых качеств, условий спуска и др.), в приборостроении, в разл. областях машиностроения, включая энергомашиностроение и наземный транспорт, в нефте- и газодобыче, в теплотехнике при конструировании и эксплуатации разл. тепловых аппаратов, в электротехнике при исследованиях всевозможных электр. систем и т. п.

Лит.: Кирпичев М. В., Михеев М. А., Моделирование тепловых устройств, М.—Л., 1936; Седов Л. И., Методы подобия и размерности в механике, 10 изд., М., 1987; Эйгенсон Л. С., Моделирование, М., 1952; Шнейдер П. Д. ж., Инженерные проблемы теплопроводности, пер. с англ., М., 1960; Гухман А. А., Введение в теорию подобия, М., 1963; Веников В. А., Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики, М., 1966.

С. Л. Вишневецкий, С. М. Тарг.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВЁЗД — методы нахождения распределений физ. характеристик звёздного вещества (давления, плотности, темп-ры, массы, хим. состава) от центра до поверхности звезды и изменений этих характеристик со временем. Построение моделей даёт возможность установить связь между осн. параметрами звёзд (массой, хим. составом, возрастом) и главными наблюдаемыми характеристиками — светимостью (интегральным потоком излучения), эффективной температурой и ускорением силы тяжести на поверхности. Проследившая изменения моделируемых параметров звёзд со временем, удаётся описать переменность звёзд и их эволюцию. М. з. основывается на законах гидродинамики, теории переноса излучения, ядерной физике, статистической физике и др. Одним из основных методов исследования является численное моделирование.

Звёзды представляют собой самогравитирующие плазменные тела, состояние к-рых и устойчивость определяются законами гидродинамики сплошных сред. Поскольку звёзды излучают и могут обмениваться веществом с внеш. средой, они не являются термодинамически изолированными системами.

Основы М. з. были заложены в работах Дж. Лейна (J. H. Lane, 1869—70), А. Риттера (A. Ritter, 1878—83) и Р. Эмдена (R. Emden, 1907), развивших теорию адиабатич. политропных моделей звёзд — гидростатически равновесных газовых конфигураций, в к-рых давление p и плотность ρ связаны соотношением $p = K\rho^{(n+1)/n}$, где коэф. K и n (показатель политропы) не зависят от пространств. координаты. При условии задания n можно определить ход физ. характеристик звезды от центра до поверхности, исходя лишь из условия гидростатич. равновесия, без знания конкретного источника энерговыделения, уравнения состояния и непрозрачности звёздного вещества.

К сер. 20-х гг. 20 в., в значит. степени трудами А. Эддингтона (A. S. Eddington), были сформулированы осн. физ. принципы, на к-рые опирается совр. теория строения звёзд, и высказано предположение, что осн. источником энерговыделения в звёздах являются термоядерные реакции, приводящие к превращению элементов. В кон. 30-х гг. К. Вайцеккер (C. F. Weizsäcker) и Х. Бете (H. A. Bethe) показали, что в недрах звёзд должны осуществляться реакции превращения водорода в гелий в протон-протонной цепочке (см. *Водородный цикл*) и в углеродно-азотном цикле, а затем Х. Бете, Г. А. Гамов (G. Gamow) и Э. Теллер (E. Teller) вычислили скорости соответствующих реакций. В то же время, в осн. благодаря Р. Фаулеру (R. H. Fowler) и С. Чандрасекару (S. Chandrasekhar), были построены модели *белых карликов*, состоящих из вырожденного вещества. С 40-х гг., когда ядерный источник энерговыделения был введён в расчёты, по существу начался совр. период М. з.

В наиб. общем случае для описания строения и эволюции звёзд необходимо решать нелинейную краевую задачу с нач. условиями для системы ур-ний в частных производных, в к-рой независимыми переменными являются пространств. координаты и время. Ур-ния звёздной гидродинамики (без учёта магн. поля) включают:

а) ур-ние неразрывности, постулирующее сохранение массы звёздного вещества:

$$\partial\rho/\partial t + \nabla(\rho v) = 0;$$

б) закон сохранения импульса, описывающий изменение импульса каждого элемента вещества:

$$\rho(dv/dt) + \nabla p + \rho v \nabla \Phi = 0;$$

в) ур-ние Пуассона для гравитац. потенциала Φ :

$$\Delta\Phi - 4\pi G\rho = 0;$$

г) закон сохранения энергии, к-рый описывает тепловое равновесие звезды с учётом энерговыделения:

$$\rho(du/dt) + p(\nabla v) + \nabla F - \rho \epsilon = 0;$$

д) ур-ние, выражающее связь потока энергии с градиентом темп-ры (закон Фика):

$$F + k\nabla T = 0.$$

В зонах адиабатич. конвекции оба последних ур-ния заменяются условием изэнтропичности ($dS/dr = 0$). При пост. показателе адиабаты этот случай описывается теорией Лейна — Риттера — Эмдена.

В приведённых ур-ниях: ρ — плотность, v — скорость, u — уд. внутр. энергия, F — поток энергии, T — темп-ра, ϵ — скорость энерговыделения, k — коэф. теплопроводности, S — энтропия, t — время. Записанная система ур-ний дополняется ур-нием состояния вещества, описывающим зависимость давления от плотности, темп-ры и хим. состава звезды, а также выражениями для скорости генерации ядерной энергии и коэф. теплопроводности, к-рый выражается через непрозрачность недр звёзд (поглощение излучения веществом). При исследовании эволюции звёзд добавляются ур-ния для вычисления изменений со временем