

давление, плотность среды, амплитуды колебаний, силы взаимодействия и т. п. В широком смысле всякий физ. эксперимент, проводимый в лаборатории, в т. ч. и эксперимент с натурным объектом или его частью, является моделированием (см. также *Молекулярной динамики метод*).

Основные понятия и условия М. В основе М. лежат подобия теория и размерностей анализ, устанавливающие подобия критерии, равенство к-рых для натур и модели обеспечивает возможность переноса эксперим. результатов, полученных путём физ. М., на натурные условия. При выполнении надлежащих условий М., т. е. при равенстве критериев подобия, значення перем. величин, характеризующих реальное явление (натуру), пропорциональны в сходственных точках пространства и в сходственные моменты времени значениям тех же величин для модели. Наличие такой пропорциональности позволяет производить пересчёт эксперим. результатов, получаемых для модели, на натуру путём умножения каждой из определяемых величин на постоянный для всех величин данной размерности множитель — коэф. подобия.

Поскольку физ. величины связаны определ. соотношениями, вытекающими из законов и ур-ний физики, то, выбрав нек-рые из них за основные, можно коэф. подобия для всех других, производных величин выразить через коэф. подобия величин, принятых за основные. Напр., в механике осн. величинами считают обычно длину l , время t и массу m . Тогда, поскольку скорость $v = l/t$, коэф. подобия скоростей $k_v = v_n/v_m$ (индекс «н» — у величин для натур, «м» — для модели) можно выразить через коэф. подобия длин $k_l = l_n/l_m$ и времён $k_t = t_n/t_m$ в виде $k_v = k_l/k_t$. Аналогично, на основании 2-го закона Ньютона сила F связана с ускорением w соотношением $F = mw$, поэтому $k_F = k_m \cdot k_w$ (где в свою очередь $k_w = k_v/k_t$). Из наличия таких связей вытекает, что для данного физ. явления нек-рые безразмерные комбинации величин, характеризующих это явление, должны иметь для модели и натур одно и то же значение. Эти безразмерные комбинации физ. величин наз. критериями подобия. Равенство критериев подобия для модели и натур является необходимым условием М. Однако добиться этого равенства можно не всегда, т. к. не всегда одновременно удовлетворяются все критерии подобия. При соблюдении необходимых условий М. удаётся результаты небольшого числа опытов, представленные в виде зависимостей между соответствующими критериями подобия, распространять на целый класс подобных физ. процессов или явлений, охватывающих широкий диапазон размерных физ. параметров. Построение таких критериальных зависимостей часто и является основной целью М.

В осн. к М. прибегают при исследовании разл. механических (включая гидроаэромеханику и механику деформируемого твёрдого тела), тепловых и электродинамич. явлений. При этом число и вид критериев подобия для каждого моделируемого явления зависит от его природы и особенностей. Так, для задач динамики точки (или системы материальных точек), где все ур-ния вытекают из 2-го закона Ньютона, критерием подобия является число Ньютона $Ne = Ft^2/ml$ и условие М. состоит в том, что

$$Ne_n = Ne_m, \text{ т. е. } \frac{F_n t_n^2}{m_n l_n} = \frac{F_m t_m^2}{m_m l_m}. \quad (1)$$

Для колебаний груза под действием силы упругости $F = cl$ и равенство (1) приводит к условию $t_n^2 c_n / m_n = t_m^2 c_m / m_m$, что, напр., позволяет по периоду колебаний модели определить период колебаний натур; при этом явление не зависит от линейного масштаба (от амплитуды колебания). Для движения в поле тяготения, где $F = \chi m/l^2$, условием подобия является $\chi_n t_n^2 / l_n^3 = \chi_m t_m^2 / l_m^3$ (явление не зависит от масс). При

движении в одном и том же поле тяготения, напр. Солнца, $\chi_n = \chi_m$ и полученное соотношение даёт 3-й закон Кеплера для периода обращения. Отсюда, считая одну из планет «моделью», можно, напр., найти период обращения любой др. планеты, зная её расстояние от Солнца.

Применение методов М. требует определ. уровня развития соответствующего раздела физики — установления критериев подобия и основных количеств. закономерностей, характеризующих рассматриваемое явление. Это позволяет сформулировать дополнит. условия однозначности измерений, необходимые для реализации М. Кроме того, необходимым условием М. является возможность получения достоверной информации о процессах, происходящих на модели, т. е. соответствующее развитие материальной базы М. — создание эксперим. установок, методики и техники эксперимента, способов измерения и обработки эксперим. данных (см., напр., *Аэродинамический эксперимент*). Напр., при М. трения твёрдых тел необходимо учитывать как механич. сторону процесса (шероховатость, геометрию единичных выступов, их взаимное расположение), так и его молекулярную сторону (физ.-хим. процессы, структурные и фазовые изменения, влияние нагрева на свойства материалов). В этом случае для построения соответствующих критериев используют более 20 параметров.

М. гидроаэромеханических явлений. Для непрерывной среды при изучении её движения число критериев подобия также велико, что часто значительно усложняет проблему М. В гидроаэромеханике осн. критериями подобия являются: *Рейнольдса число* Re , *Маха число* M , *Фруда число* Fr , *Эйлера число* Eu , а для нестационарных (зависящих от времени) течений ещё и *Струхаля число* Sh .

Создаваемые для гидроаэродинамич. М. эксперим. установки и сами модели должны обеспечивать равенство соответствующих критериев подобия у модели и натур. Обычно это удаётся сделать в случаях, когда для течения в силу его особенностей сохраняется лишь один критерий подобия. Так, при М. стационарного течения несжимаемой вязкой жидкости (газа) определяющим будет параметр Re и необходимо выполнить одно условие:

$$Re_m = Re_n, \text{ т. е. } \frac{\rho_n v_n l_n}{\mu_n} = \frac{\rho_m v_m l_m}{\mu_m}, \quad (2)$$

где ρ — плотность, μ — динамич. коэф. вязкости среды. При уменьшенной модели ($l_m < l_n$) это можно сделать, или увеличивая скорость ($v_m > v_n$), или используя для моделирования другую жидкость, у к-рой, напр., $\rho_m > \rho_n$, а $\mu_m \leq \mu_n$. При аэродинамич. исследованиях увеличивать v_m в этом случае нельзя (нарушится условие несжимаемости), но можно увеличить ρ_m , используя *аэродинамические трубы* закрытого типа, в к-рых циркулирует сжатый воздух.

Когда при М. необходимо обеспечить равенство неск. критериев, возникают значит. трудности, часто непреодолимые, если только не делать модель тождественной натуре, что фактически означает переход от М. к натурным испытаниям. Поэтому на практике нередко прибегают к приближённому М., при к-ром часть процессов, играющих второстепенную роль, или совсем не моделируются, или моделируются приближённно. Такое М. не позволяет найти прямым пересчётом значения тех характеристик, к-рые не отвечают условиям подобия, и их определение требует соответствующих дополнит. исследований. Напр., при М. установившихся течений вязких сжимаемых газов необходимо обеспечить равенство критериев Re и M и безразмерного числа $\gamma = c_p/c_v$ (где c_p и c_v — уд. теплоёмкости газа при пост. давлении и пост. объёме соответственно), что в общем случае сделать невозможно. Поэтому как правило, обеспечивают для модели и натур лишь равенство числа M , а влияние на определяемые параметры различий