

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ИЗУЧЕНИЕ	7
1.1. Моделирование как метод познания окружающего мира.....	7
1.2. Система. Виды систем. Моделирование	7
1.3. Виды моделирования систем.....	8
1.3.1. Проблема выбора модели для моделирования	8
1.3.2. Физическое моделирование	9
1.3.3. Аналоговое моделирование.....	14
1.3.4. Имитационное моделирование.....	17
1.3.5. Дискретно-событийные имитационные модели	18
1.3.6. Другие подходы к синтезу имитационных моделей.....	21
1.4. Способы исследования систем.....	24
Вопросы для самоконтроля.....	27
2. ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ КАК ОСНОВА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	28
2.1. Метод обобщенных переменных.....	28
2.1.1. Виды подобия	28
2.1.2. Инварианты и критерии подобия	29
2.1.3. Автомодельность систем	31
2.1.4. Обобщенное критериальное уравнение	32
2.2. Теорема Букингема	33
Вопросы для самоконтроля.....	40
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ.....	41
3.1. Основы процесса математического моделирования	41
3.2. Виды математических моделей	43
3.3. Создание математической модели	46
3.3.1. Постановка задачи.....	46
3.3.2. Анализ теоретических основ	47
3.3.3. Построение математической модели.....	48
3.3.4. Алгоритмизация математической модели	49
3.3.5. Параметрическая идентификация модели	51
3.3.6. Проверка адекватности математической модели.....	51
3.3.7. Моделирование изучаемой системы.....	53
3.3.8. Анализ полученной информации	55
Вопросы для самоконтроля.....	55
4. МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ.....	56
4.1. Основные понятия и определения статистического моделирования.....	56
4.2. Полный факторный эксперимент.....	60
4.2.1. Построение плана эксперимента.....	60
4.2.2. Планирование и реализация полного факторного эксперимента.....	70
4.2.3. Анализ результатов полного факторного эксперимента.....	75
Вопросы для самоконтроля.....	81
5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ В СООРУЖЕНИЯХ. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ.....	82
5.1. Основные понятия и определения структуры потоков	82

5.1.1. Экспериментальное определение показателей структуры потоков в сооружениях	82
5.1.2. Моделирование структуры течений в напорных водоводах	84
5.1.3. Моделирование равномерных течений в открытых каналах	85
5.1.4. Специальные вопросы моделирования	85
5.2. Модели структуры потоков в сооружениях	92
5.2.1. Общее представление о моделях структуры потока	92
5.2.2. Модель идеального вытеснения.....	93
5.2.3. Модель идеального смешения	95
5.2.4. Неидеальные модели потоков.....	97
5.2.5. Комбинированные модели потоков	101
Вопросы для самоконтроля.....	102
6. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ	103
6.1. Определение показателя использования объема сооружения	103
6.2. Определение эффективности проточного сооружения	104
6.3. Построение модели. Подобие центробежных насосов. Коэффициент быстроходности	107
Вопросы для самоконтроля.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
Библиографический список	112

ВВЕДЕНИЕ

Самое большое желание человека во все времена — узнать будущее: что будет, если разольется река у его дома, если наступит засуха, что будет с ним самим, и множество других вопросов, связывающих какие-либо условия с результатом их осуществления. В основе такого естественного интереса лежит природой данное чувство самосохранения, желание предусмотреть опасности и другие нежелательные последствия, заранее к ним подготовиться.

С древних времен человечество пыталось решать эту проблему самыми разными, порой непонятными для современных людей способами. Еще больший интерес к результатам своих действий возник и расширялся одновременно с развитием целенаправленного труда, производства и строительства, что послужило началом развития естественных наук, главной задачей которых было предсказание на основе обобщения эмпирического опыта. Но эмпирический опыт тоже не давал надежного предсказания за пределами области накопления данных. Так сложились предпосылки возникновения точных наук, которые позволили многие явления описать формальными законами.

Современная наука, оснащенная специальными техническими устройствами, имеющая огромный арсенал методов изучения, решает все те же задачи: почему это так, и что будет, если...? Правильные ответы на эти вопросы могут быть получены, только если учтены все, в том числе неизвестные, составляющие предмета изучения. Поэтому развитие фундаментальных наук пошло по пути специализации, позволяющей углубить, но при этом ограничить область исследований.

По мере развития, усложнения и расширения сферы деятельности людей многократно выростала потребность в прогнозе результатов при вовлечении огромного числа факторов из разных затрагиваемых при этом областей. Так, понятие «предмет изучения» дополнилось определением «система».

1. СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ИЗУЧЕНИЕ

1.1. Моделирование как метод познания окружающего мира

Понятие «система» может включать объекты как обладающие физическими признаками, так и не обладающие ими. Например, социальные, правовые, поведенческие и другие системы. Системы могут охватывать любые области природы, техники, творчества и науки. Однако обязательным условием всех систем является их предел. Систем без границ не существует, так как при этом исчезает смысл систематизации. Вместе с тем множество ограниченных систем составляют единство мироздания.

Система — это совокупность свойств и взаимодействий материальных субъектов и определенных явлений в текущей области. Характеризуется система факторами, описываемыми переменными величинами.

Различают следующие виды систем, представленные в альтернативном порядке.

Дискретная система — переменные меняются прерывисто. Такая система отражает «внешнее» воздействие и не зависит от продолжительности. Примером может служить работа механизма «на первый отказ».

Непрерывная система — переменные величины имеют постоянные изменения и имеют зависимость от времени. Процессы очистки воды — непрерывные системы.

Регулярная система (правильная) — это сумма свойств и взаимодействий.

Спорадическая система (неправильная) — это сумма случайных свойств и определенных взаимодействий. На самом деле, всякая случайность является таковой до той поры, пока не найдены ее закономерности. Поэтому спорадическая система, как правило, отражает начальное состояние ее изучения.

Реальная система — сумма всех физических факторов.

Абстрактная система — функциональная сумма факторов.

Моделирование — это отражение исследования объектов на их моделях: расчет, построение, изучение смоделированных существующих объектов (естественнонаучных систем, инженерных конструкций, физических, химических, биологических, социальных) и конструируемых сооружений (для определения, уточнения их характеристик, рационализации способов их построения и т.п.).

Общая классификация типов моделирования нелегка, так как понятие *модель* крайне многозначно. Построение модели имеет различные подходы. Характер модели имеет разные средства воплощения, характеризующиеся свойствами и направлением исследования. Этот метод применяется в различных сферах техники, физических и химических наук. Поэтому любой подход к классификации методов моделирования может быть неполным. Терминология в моделировании основывается на языковых, научных и инженерных традициях, определяется модулями конкретного общепринятого значения. Примером является понятие «кибернетического» моделирования.

1.2. Система. Виды систем. Моделирование

Развитие научно-технического прогресса имеет исторические основы. Познание окружающего мира основывалось на моделировании соответствующих процессов и строительных объектов.

Ученые Брунеллески, Микеланджело, Леонардо да Винчи, Галилей, Ньютон пользовались методом моделирования уже вполне осмысленно.

В IX–XX вв. случился прорыв в описании процессов моделирования. К лидирующим научным работам тех времен можно отнести работы Кельвина, Максвелла, Кекуле, Бутлерова, Менделеева.

Позже появились электронно-вычислительные машины, что послужило толчком к созданию универсальных методов моделирования в абстрактных областях знаний и применительно к материальным объектам.

Моделирование относится к гносеологической категории познания окружающего мира.

Вполне допустимо сказать, что *моделирование* — это вариант отражения действительности со специфическими критериями. Чем конкретнее критерий, тем ближе модель к реальности.

Применительно к системам водоснабжения и водоотведения моделирование является способом изучения движения различных жидкостей по каналам и руслам разнообразных форм, которые являются инженерными сооружениями. Применение масштабного моделирования в системах водоснабжения и водоотведения отражает реальные объекты.

Разные условия при создании моделей способны воспроизводить их состояния во времени.

Основная цель моделирования — сокращение времени и затрат на получение достоверной информации об изучаемом объекте. Применительно к системам водоснабжения, водоотведения и водной экологии практические задачи, решаемые методами моделирования, следующие:

- экспертная оценка существующих систем водоснабжения и водоотведения;
- прогноз работы систем в новых (изменяющихся) условиях;
- управление работой систем и технологическими процессами;
- инженерно-технологическое конструирование новых сооружений;
- научное (познавательное) изучение инженерных систем и процессов;
- поиск оптимальных технико-экономических решений.

1.3. Виды моделирования систем

1.3.1. Проблема выбора модели для моделирования

Предметным называют тип моделирования, когда исследование ведется на модели по геометрическим, физическим, динамическим и функциональным характеристикам.

Таким образом, можно изучать происходящее в натуре: гидротехнические сооружения и механизмы. Такой тип моделирования называют *физическим*.

Другой тип моделирования — *знаковый*. Составляются определенные схемы, графики, чертежи, системы формул, что дает возможность построения модели.

К знаковому моделированию относят математическое, логико-математическое моделирование. При этом масштабно используются законы математики.

Изменение параметров математических систем позволяет приблизить решение требуемой задачи. Химические реакции, гидравлические законы реально смоделировать и с помощью ЭВМ ускорить расчет.

Проверка на математической модели решения требуемой задачи является непременным условием успешного завершения инженерного вопроса.

Знаковое моделирование позволяет с помощью мысленной кодировки осуществить запись тех или иных процессов, которые могут быть решены при помощи ЭВМ.

Решение подобных задач происходит с понятием *черный ящик*. В таком случае задаются параметры входа и выхода. Это является абстрактной моделью и применяется в сложных явлениях, таких как: турбулентность, пульсация, прерывистый поток, многокомпонентные водные системы.

Перенос результатов, полученных теоретическим путем, на натуру основан на отображении модели реальных процессов. Такой процесс получил название *подобия, гомоморфизма*. Для успешного моделирования применяют уже сложившиеся теории исследуемых явлений и гипотез.

Перенос результатов с моделей на натуру связан с применением теории подобия. Для сложных систем и процессов осуществляют создание моделей, а затем проверку больших чисел и построение повторной модели.

Моделирование неразрывно связано и идет в одну ногу с естественнонаучными дисциплинами и методами (постановка эксперимента, сам эксперимент, получение результатов и последующая математическая обработка полученных данных). Ускорить эти этапы можно с помощью электронно-вычислительных машин и специальных оригинальных программ.

Модельный эксперимент позволяет изучать теоретически прямой эксперимент, который крайне затруднен для изучения в нормальных условиях.

Математические модели часто заменяют некоторые реальные эксперименты. Например, турбулентное движение воды в канале, флотация, растворение кислорода в гетерогенных системах.

Таким образом, можно различать *материальное* (предметное) и *идеальное* моделирование, которое трактуется как *экспериментальное* и *теоретическое*. Такое противопоставление, конечно, довольно условно, поскольку не объединяет полностью все предполагаемые процессы.

Частным случаем физического моделирования является *аналоговое*. Оно представляет собой использование при построении моделей аналогий. Например, движение жидкостей по трубопроводу заменяется правилом Кирхгофа. Данная задача также решается с помощью ЭВМ.

При создании моделей всегда применяют методы абстракции и идеализации. Это необходимо для того, чтобы приблизиться к оптимальному решению задач, когда последние нельзя описать математическими системами.

Идеализация процесса с возможным математическим описанием предполагает получение критериев, которые являются проверкой предполагаемого процесса.

Моделирование данного натурального оригинала на каком-то этапе, тем не менее, может не дать полного знания о процессе или явлении. Поэтому расчет или моделирование разбивают на отдельные участки, сравнивают их по критериям, производят оценку вероятности данного события, и затем вырабатывается общая модель процесса с определенной вероятностью приближения к реальности.

Точное совпадение расчетов и эксперимента является подтверждением верности выбранной модели и метода математического расчета. При этом снимаются теоретические противоречия, возникшие при математическом построении модели.

Кроме естественнонаучных принципов построения моделей, существуют также модели, которые могут описывать мыслительный процесс у человека, экономические системы и пр. Критерием оценки таких моделей служит эксперимент, который может относительно воспроизвести предполагаемое событие. Например, эволюционно-генетическая модель, которая при определенных критериях может описывать различные физические процессы: осаждение твердых частиц в водной среде или, например, рост пузырьков растворенного кислорода при очистке сточных вод в аэротенках.

Моделирование может описывать реальные явления окружающего мира, инженерные, архитектурные решения деятельности человека, а также практический критерий проверки истинности знаний. При этом необходимо осуществить единство всех составляющих через функциональные системы.

1.3.2. Физическое моделирование

Физическое моделирование — вид моделирования, который состоит в замене изучения некоторого объекта или явления экспериментальным исследованием его модели, имеющей ту же физическую природу.

Это научный эксперимент, необходимый для получения некоей закономерности процесса или явления, для проверки правильности выбранных модельных границ. Такое действие является проверочной базой для решения поставленной задачи. Во время эксперимента воспроизводятся те явления, от которых зависит конечный результат. Например, эффект осветления при очистке воды, удаление биогенных элементов при явлении сорбции.

К физическому моделированию прибегают в случае затрудненных натуральных испытаний, а также с целью выявления экономического эффекта.

Теория подобия положена в основу физического моделирования. Различают геометрическое подобие, а также в данном случае применяют теорему Букингема для описания физического явления с помощью систем уравнений с π -критериями.

Так как физические величины соединены некими соотношениями, получаемыми из законов и уравнений физики, то, приняв некоторые из них как основные, можно выразить коэффициенты подобия для всех других производных величин через коэффициенты подобия величин, принятых за основные.

В механике основными величинами является длина l , время t и масса m . Поэтому, поскольку скорость

$$v = \frac{l}{t},$$

коэффициент подобия скоростей $k_v = v_H/v_M$ (индекс «Н» у величин для природы, «М» — для модели) можно выразить через коэффициент подобия длин $k_l = l_H/l_M$ и времен $k_t = t_H/t_M$ в виде $k_v = k_l/k_t$. Аналогично, так как на основании второго закона Ньютона сила F связана с ускорением w соотношением $F = mw$, то $k_F = k_m \cdot k_w$, где, в свою очередь, $k_w = k_v/k_t$, и т.д.

Отсюда следует, что для данного физического явления безразмерные комбинации величин, характеризующих это явление, должны иметь одно и то же значение для модели и природы. Такие безразмерные комбинации физических величин называют *критериями подобия*.

Равенство критериев подобия для модели и природы — необходимое условие физического моделирования. Но добиться подобного равенства возможно не всегда, поскольку не часто удается одновременно удовлетворить всем критериям подобия.

Обычно к физическому моделированию прибегают во время исследования различных механических, тепловых и электродинамических явлений. Как правило, вариант выбора, число и вид критериев подобия для данного моделируемого явления зависят от природы явления и его особенностей. Например, для решения задач динамики точки (или системы материальных точек), где уравнения согласуются со вторым законом Ньютона. В этом случае критерий подобия Ньютона будет равен

$$Ne = \frac{Ft^2}{ml},$$

по условию моделирования

$$Ne_H = Ne_M, \text{ т.е. } \frac{F_H t_H^2}{m_H l_H} = \frac{F_M t_M^2}{m_M l_M}.$$

Для действий силы упругости $F = cl$; получаем равенство

$$\frac{t_H^2 c_H}{m_H} = \frac{t_M^2 c_M}{m_M},$$

по периоду колебаний модели можно определить период колебаний природы; явление не зависит от линейного масштаба (от амплитуды колебаний). В поле тяготения, где

$$F = \frac{km}{l^2},$$

условием подобия является равенство

$$\frac{k_H t_H^2}{l_H^3} = \frac{k_M t_M^2}{l_M^3}$$

(явление не зависит от масс).

Кеплер получил третий закон для периода обращения в поле тяготения Солнца: $k_M = k_H$. Принимая за модель планету, можно найти период обращения другой планеты, зная ее расстояние от Солнца.

При изучении движения в непрерывной среде число критериев возрастает, что значительно усложняет процесс физического моделирования. В гидромеханике и аэродинамике основными критериями подобия являются число Рейнольдса (Re), число Маха (M), число Фруда (Fr), число Эйлера (Eu), для нестационарных, зависящих от времени течений — число Струхала (St). При физическом моделировании теплофизических процессов в движущихся жидкостях и газах с физическими превращениями компонентов газовых потоков необходимо учитывать еще ряд дополнительных критериев подобия.

При гидродинамическом моделировании установки для экспериментов и модели обеспечивают равенство критериев подобия у модели и объекта. Часто это удается осуществить в случаях сохранения одного критерия при течении жидкости. Во время физического моделирования стационарного течения несжимаемой жидкости или газа определяющим станет критерий Рейнольдса. Поэтому выполняется условие, равное Re_H , т.е.

$$\frac{\rho_M v_M l_M}{\mu_M} = \frac{\rho_H v_H l_H}{\mu_H},$$

где ρ — плотность; μ — динамический коэффициент вязкости среды.

При модели $l_M < l_H$ увеличиваем скорость: $v_M > v_H$ или используем для моделирования иную жидкость, у которой $\rho_M > \rho_H$, а $\mu_M \leq \mu_H$.

Во время аэродинамических исследований увеличивать v_M нельзя, так как нарушится основное условие несжимаемости, однако можно увеличить ρ_M , применяя аэродинамические трубы закрытого типа, так как в них циркулирует сжатый воздух.

При физическом моделировании следует обеспечить равенство нескольких критериев, поэтому могут возникнуть определенные трудности. В этом случае создается натурная модель. Данная модель нужна для максимального приближения модели к объекту. Такое моделирование является приближенным и не позволяет осуществить прямой пересчет значений характеристик. Для этого необходимы дополнительные исследования.

Так, при физическом моделировании для установившихся течений вязких сжимаемых газов нужно обеспечить равенство критериев Re и M. При этом необходимо обеспечить равенство безразмерного числа $\chi = c_p/c_v$ (c_p и c_v — удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно), что в общем случае сделать невозможно. В таком случае следует обеспечивать для модели и природы только равенство числа M, тогда как влияние на определяемые параметры различий в числах Re и M исследуют либо отдельно, либо теоретически, или же с помощью других экспериментов.

Для деформируемых тел особенности физических моделирований также зависят от свойств этих тел и типа рассматриваемых задач. Поэтому при проведении моделирования

равновесия однородных упругих систем (конструкций), механические свойства которых определяются модулем упругости E (модулем Юнга) и безразмерным коэффициентом Пуассона (ν), должны выполняться три условия подобия:

$$\nu_H = \nu_M; \frac{\rho_H g_H l_H}{E_H} = \frac{\rho_M g_M l_M}{E_M}; \frac{F_H}{E_H l_H^2} = \frac{F_M}{E_M l_M^2},$$

где g_H — ускорение силы тяжести ($\gamma = \rho g$ — удельный вес материала). В естественных условиях $g_M = g_H = g$. Получить полное подобие при $l_M \neq l_H$ можно, лишь подобрав для модели специальный материал, у которого ρ_M , E_M и ν_M будут удовлетворять первым двум компонентам из условий, что практически обычно неосуществимо.

Как правило, модель изготавливается из подобного материала, что и объект. Тогда $\rho_M = \rho_H$, $E_M = E_H$ и второе условие дает $g_M l_M = g_H l_H$. Когда весовые нагрузки существенны, для выполнения этого условия прибегают к так называемому *моделированию по центробежному типу*. Помещают модель в центробежную машину, где искусственно создается приближенно однородное силовое поле, позволяющее получить $g_M > g_H$ и сделать $l_M < l_H$. Если же основными являются другие нагрузки, а весом конструкции и, следовательно, учетом ее удельного веса $\gamma = \rho g$ можно пренебречь, то приближенное физическое моделирование осуществляют при $g_M = g_H = g$, удовлетворяя лишь последнему из соотношений, которое дает

$$\frac{F_H}{l_H^2} = \frac{F_M}{l_M^2}.$$

Поэтому нагрузки на модель должны быть пропорциональны квадрату ее линейных размеров. Тогда модель будет подобна натуре. Если, например, модель разрушается при нагрузке $F_{кр}$, то натура разрушается при нагрузке

$$\frac{F_{кр} l_H^2}{l_M^2}.$$

Неучет в этом случае весовых нагрузок дает следующее. Поскольку эти нагрузки имеют значения γl^3 , а последнее из условий требует пропорциональности нагрузок l^2 , то при $l_M < l_H$ весовая нагрузка на модель будет меньше требуемой этим условием, т.е. физическое моделирование не будет полным, и модель как недогруженная будет прочнее природы. Это обстоятельство тоже можно учесть или теоретическим расчетом, или дополнительными экспериментами.

Одним из видов физических моделирований, применяемых к твердым деформируемым телам, является *поляризационно-оптический метод исследования напряжений*, основанный на свойстве ряда изотропных прозрачных материалов становиться под действием нагрузок (т.е. при деформации) анизотропными, что позволяет исследовать распределение напряжений в различных деталях с помощью их моделей из прозрачных материалов.

При физических моделированиях явлений в других непрерывных средах соответственно изменяются вид и число критериев подобия. Так, для пластичных и вязкопластичных сред в число этих критериев наряду с параметрами Фруда, Струхалея и модифицированным параметром Рейнольдса входят параметры Лагранжа, Стокса, Сен-Венана и т.д.

При изучении процессов теплообмена тоже широко используют физическое моделирование. Для случая переноса тепла *конвекцией* определяющими критериями подобия являются:

– число Нуссельта: $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda};$

– число Прандтля: $Pr = \frac{\nu}{a}$;

– число Грасгофа: $Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta T}{\nu^2}$,

а также число Рейнольдса, где α — коэффициент теплоотдачи; a — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности среды (жидкости, газа); ν — коэффициент кинематической вязкости; β — коэффициент объемного расширения; ΔT — разность температур поверхности тела и среды.

Обычно целью физического моделирования является определение коэффициента теплоотдачи, входящего в критерий Nu , для чего опытами на моделях устанавливают зависимость Nu от других критериев. При этом в случае вынужденной конвекции (например теплообмен при движении жидкости в трубе) становится несущественным критерий Gr , а в случае свободной конвекции (теплообмен между телом и покоящейся средой) — критерий Re . Однако к значительным упрощениям процесса физического моделирования это не приводит, особенно из-за критерия Pr , являющегося физической константой среды, что при выполнении условия $Pr_M = Pr_H$ практически исключает возможность использовать на модели среду, отличную от натурной. Дополнительные трудности вносит и то, что физические характеристики среды зависят от ее температуры. Поэтому в большинстве практически важных случаев выполнить все условия подобия не удастся; приходится прибегать к приближенному моделированию. При этом отказываются от условия равенства критериев, мало влияющих на процесс, а другим условиям (например подобие физических свойств сред, участвующих в теплообмене) удовлетворяют лишь в среднем. На практике часто используют также так называемый метод *локального* теплового моделирования, идея которого заключается в том, что условия подобия процессов для модели и природы выполняются только в той области модели, где исследуется процесс теплообмена. Например, при исследовании теплоотдачи в системе однотипных тел (шаров, труб) в теплообмене на модели может участвовать лишь одно тело, на котором выполняют измерения, а остальные служат для обеспечения геометрического подобия модели и природы.

В случаях переноса тепла *теплопроводностью* (кондукцией) критериями подобия являются:

– число Фурье: $Fo = \frac{at_0}{l^2}$;

– число Био: $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$,

где t_0 — характерный промежуток времени (например период). Для апериодических процессов (нагревание, охлаждение) t_0 обычно отсутствует и параметр Fo выпадает, а отношение at_0/l^2 определяет безразмерное время. При физическом моделировании таких процессов теплообмена удается в широких пределах изменять не только размеры модели, но и темп протекания процесса.

Однако чаще для исследования процессов переноса тепла теплопроводностью применяют аналоговое моделирование.

Электродинамическое моделирование применяется для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в электрических системах. Электродинамическая модель представляет собой копию (в определенном масштабе) натурной электрической системы с сохранением физической природы ее основных элементов. Такими элементами модели являются синхронные генераторы, трансформаторы, линии передач, первичные двигатели (турбины) и нагрузка (потребители электрической энергии), но их число обычно значительно меньше, чем у натурной системы. Поэтому и здесь моделирование является приближенным, причем на модели по возможности полно представляется лишь исследуемая часть системы.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru