

Тема лекции №4

**Принципы  
имитационного  
моделирования  
транспортных  
процессов.**

**Цель лекции** – изучить основные принципы имитационного моделирования транспортных процессов

## План лекции.

1. Имитационное моделирование и условия его применения.
2. Понятие модельного времени.
3. Способы имитации.
4. Этапы имитационного моделирования.

# 1. Имитационное моделирование и условия его применения.

**Имитационное моделирование** - это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе.

Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте).

**Имитационная модель** - логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.

**Условие использования.**

Существует класс объектов, для которых по различным причинам, не разработаны аналитические модели либо не разработаны аналитические методы решения полученной модели. В таких случаях математическая модель заменяется имитатором или имитационной моделью.

# Достоинства имитационного моделирования

1. Высокая адекватность между физической сущностью описываемого процесса и его моделью.
2. Возможность описать сложную систему на достаточно высоком уровне детализации.
3. Значительно больший охват исследования, чем аналитическое моделирование.
4. Отсутствие ограничений на зависимости между параметрами модели.
5. Возможность оценки функционирования системы не только в стационарных состояниях, но и в переходных процессах (режимах).
6. Получение большого числа данных об исследуемом объекте (закон распределения случайных величин, числовые значения абсолютные и относительные, и многое другое).
7. Наиболее рациональное отношение «результат – затраты» по отношению к аналитическому и физическому моделированию.

# Недостатки имитационного моделирования

1. Относительно большая сложность создания модели.
2. Необходимость высокой квалификации исследователя для написания модели.
3. Необходимость проведения верификации и валидации данных моделирования.

Верификация (от лат. *verus* «истинный» и *facere* «делать») это подтверждение соответствия конечного продукта predetermined эталонным требованиям.

Валидация (англ. *Validation*) - подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, точно и в полном объёме predetermined, а цель достигнута.

4. Индивидуальность реализации. Для широкого применения моделью можно воспользоваться лишь при детальном описании ее построения.
5. Не существует надежных методов оценки адекватности.

# Три подхода имитационного моделирования



# Виды имитационного моделирования

1. **Агентное моделирование** — метод [ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ](#), исследующий поведение децентрализованных [агентов](#) и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом.

*Цель агентных моделей* — получить представление об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении её отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе.

*Агент* — некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться.

# Виды имитационного моделирования

2. **Дискретно-событийное моделирование** — подход к моделированию, предлагающий абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие, как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие.

**Дискретно-событийное моделирование** наиболее развито и имеет огромную сферу приложений — от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем.

Этот вид моделирования наиболее подходит для моделирования транспортных процессов.

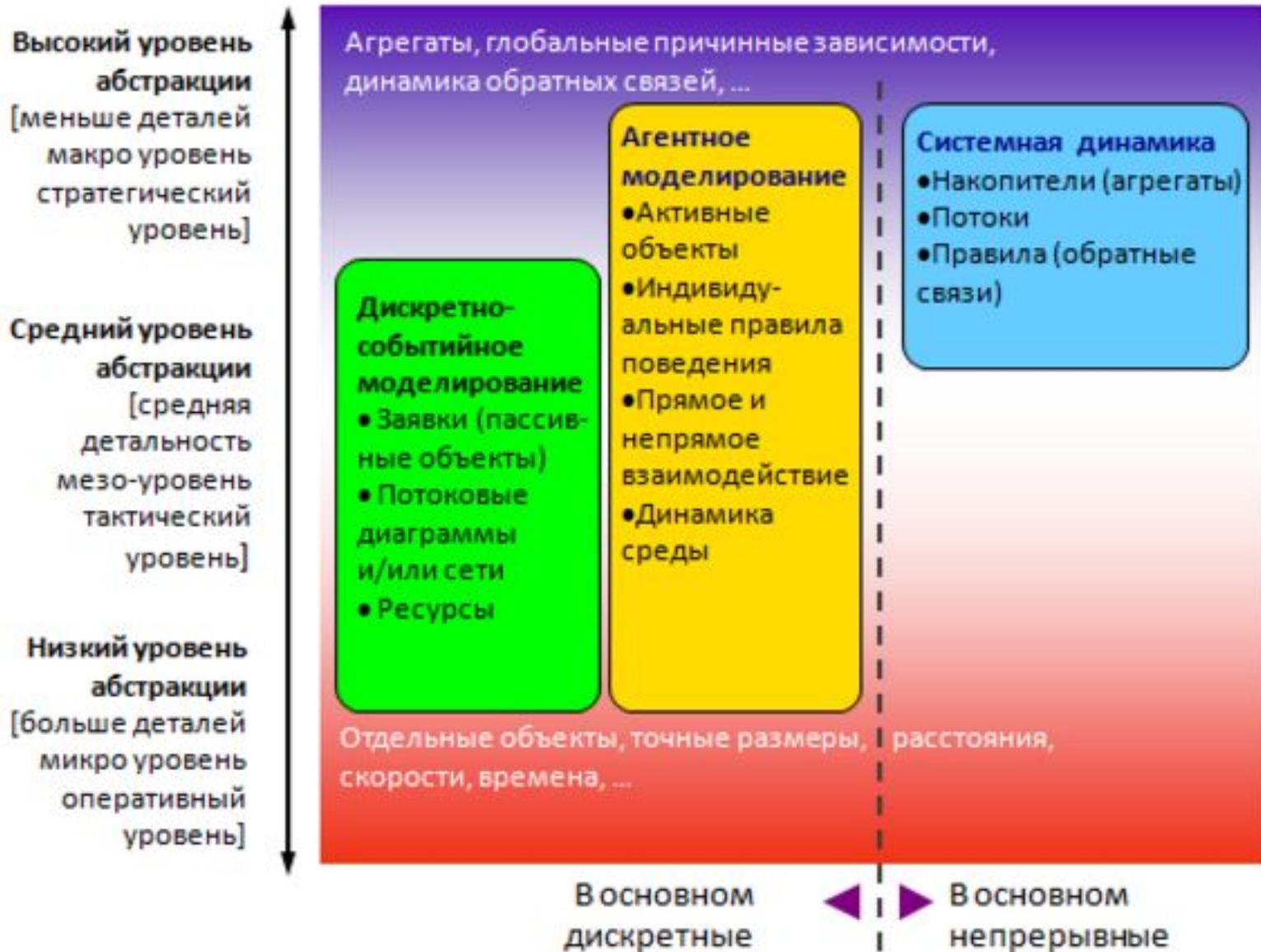
# Виды имитационного моделирования

3. **Системная динамика** — парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере.

Данный вид моделирования более всех других парадигм помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями.

С помощью системной динамики строят модели бизнес-процессов, развития города, модели производства, динамики популяции, экологии

# Подходы имитационного моделирования на шкале абстракции



## 2. Понятие модельного времени.

Особенности функционирования компьютерных программ, которые приходится учитывать при разработке имитационных моделей (ИМ):

1. Сложная система  $\mathbf{S}$ , как правило, состоит из многих элементов, которые функционируют одновременно. При этом параллельное выполнение нескольких программ, имитирующих поведение отдельных элементов, невозможно.
2. ИМ должны оперировать с конечным множеством данных и, следовательно, имитировать поведение системы  $\mathbf{S}$  не во все моменты времени, а лишь в некоторые, составляющие конечное множество

$$\tau \subset [0, T], |\tau| < \infty$$

где  $|\tau|$  - означает мощность множества  $\tau$

Системное модельное время или **модельное время** (МВ) – специальная переменная  $t$ , используемая для обеспечения имитации параллельных или одновременных событий системы  $S$  на конечном множестве моментов времени  $\tau$

Способы формирования конечного множества моментов времени (принципы изменения МВ):

1. «Принцип  $\Delta t$ » заключается в изменении МВ с фиксированным шагом  $\Delta t$ .
2. «Принцип  $\Delta x$ » заключается в изменении МВ при скачкообразном изменении вектора состояния  $x$  системы  $S$  на некоторую величину  $\Delta x$  ( $\Delta x \neq 0$ ).

## Особенности принципов.

Пусть система  $S$  состоит из  $N$  элементов:  $A^{(1)}, \dots, A^{(N)}$ , поведение которых предполагается моделировать:

$$S = \{A^{(1)}, \dots, A^{(N)}\}.$$

Для каждого элемента  $A^{(i)} \in S$  ( $i = 1, \dots, N$ )

Определим локальное модельное время (ЛМВ)  $t^{(i)} \in [0, T]$

Поведение элемента  $A^{(i)}$  в течение интервала моделирования определяется некоторой последовательностью действий

$$g_1^{(i)}, g_2^{(i)}, \dots, g_M^{(i)}, g_j^{(i)} \in G, \quad j = 1, \dots, M_i$$

где  $G$  – множество всевозможных действий для элементов  $S$ .

На множестве  $G$  будем выделять подмножество действий

$$D:$$
$$D \subset G$$

для выполнения которых в ИМ требуется некоторое ненулевое модельное время.

Будем обозначать такие действия

$$d_1^{(i)}, \dots, d_{m_i}^{(i)}, \quad (d_j^{(i)} \in D \subset G, j = \overline{1, m_i}, m_i \leq M_i, i = \overline{1, N})$$

а интервалы МВ, затрачиваемые на выполнение этих действий, соответственно:  $\tau_1^{(i)}, \dots, \tau_{m_i}^{(i)}$ .

Последовательность  $\{\tau_j^{(i)}\}$  ( $j = \overline{1, m_i}$ )

является последовательностью случайных величин с заданными законами распределения  $L\{\tau_j^{(i)}\}$ ,  $i = \overline{1, N}$

Момент ЛМВ наступления события  $A_j^{(i)}$  äёü  $A_j \in S$

$$t_j^{(i)} = t^* + \tau_j^{(i)}, j = 1, 2, \dots$$

где  $\tau_j^{(i)}$  имитируется в соответствии с законом распределения  $L\{\tau_j^{(i)}\}$ ,  $t^*$  - текущее значение МВ.

Состояние системы  $\mathbf{S}$  в момент времени определяется вектором состояния

$$x(t) \in X \subset R^n.$$

Состояния системы в моменты  $t_j^{(i)} \in \tau$  наступления *особых событий* будем называть **особыми состояниями**, а состояние  $x(0)$  — *начальным* состоянием системы.

Случаи выбора «принципа  $\Delta t$ »

- 1) если  $\Delta t$  — мало, то выполняется много лишних вычислений состояний системы в моменты, когда вектор  $\mathbf{z}(t)$  не изменяется (за счет этого возрастает машинное время имитации);
- 2) даже при сравнительно малом значении  $\Delta t$  моменты наступления событий в системе (а, следовательно, и моменты изменения состояния системы) не совпадают с моментами наступления событий в ИМ, поэтому фазовая траектория, построенная с помощью ИМ, на множестве  $t \in [0, T]$  не совпадает с фазовой траекторией системы  $\mathbf{S}$ .

На практике предпочтение отдается принципу  $\Delta x$ .

# Иллюстрация принципов « $\Delta t$ » и « $\Delta x$ »

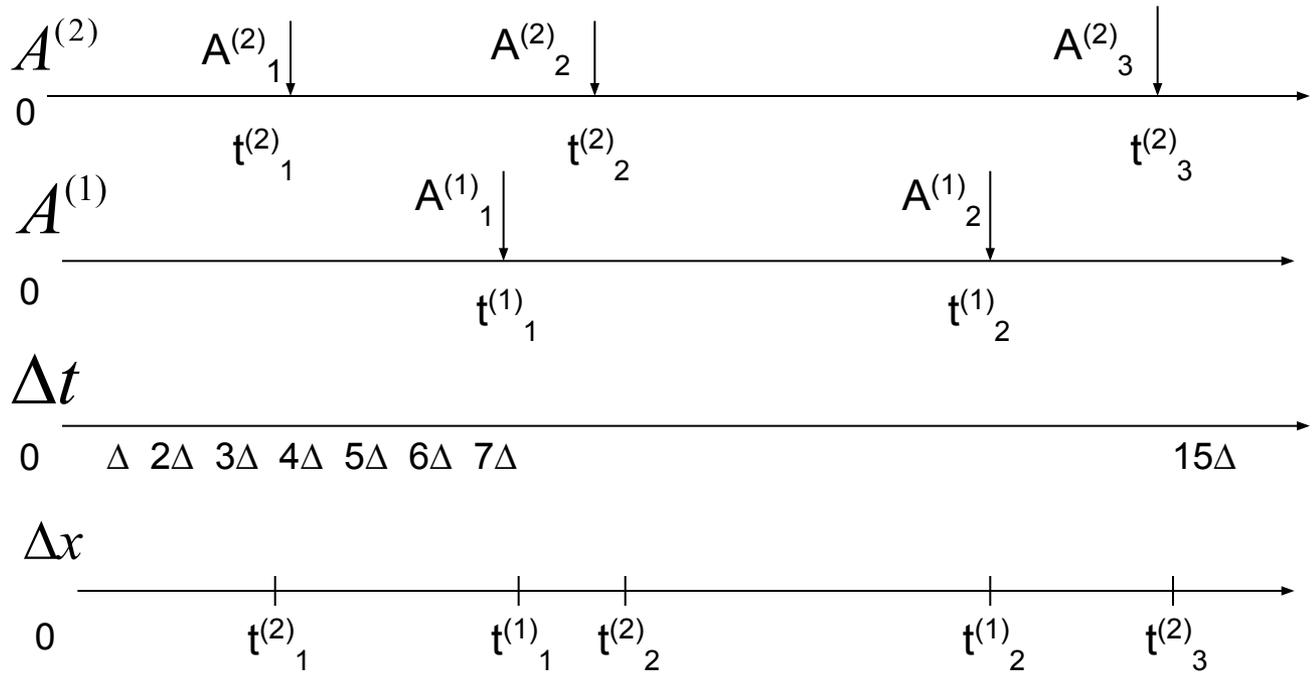


Рисунок 2.1 – Временная диаграмма

# Рекомендация к применению

В большинстве практически важных случаев события наступают ~~через~~<sup>(i)</sup> случайные интервалы времени. Поэтому **способ задания шага до следующего события экономичнее** (в смысле затрат машинного времени) и **точнее** (в смысле точности аппроксимации) фазовой траектории способа фиксированного изменения МВ.

По примеру, фазовая траектория системы S, построенная с помощью ИМ, по принципу  $\Delta x$ :

$$x(0), x(t_1^{(2)}), x(t_1^{(1)}), x(t_2^{(2)}), x(t_2^{(1)}), x(t_3^{(2)}).$$

# 3. Способы имитации.

Под способом имитации системы  $S$  понимают способ формирования фазовой траектории системы. Последний определяется способом изменения вектора состояния  $x(t), t \in S$  системы  $S$ .

Возможны три способа изменения  $x(t)$ :

- 1) в моменты наступления *события*  $\{A_j^{(i)}\}$ ;
- 2) в результате выполнения *действий*  $\{d_j^{(i)}\}$  на выполнение которых требуются затраты модельного времени  $\{\tau_j^{(i)}\}$ ;
- 3) в результате выполнения хронологической последовательности событий и действий, называемой *процессом*.

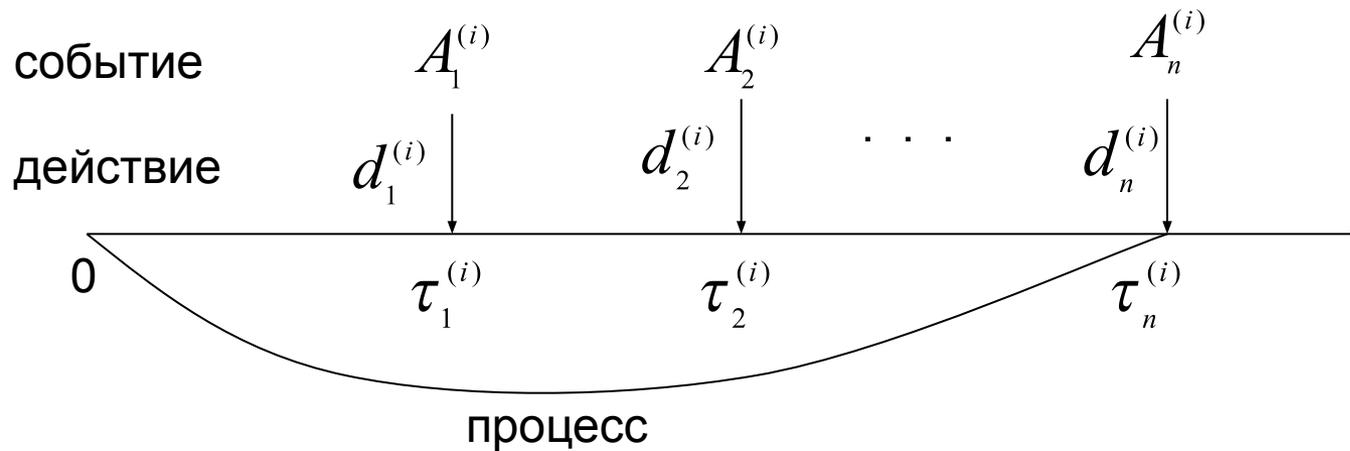


Рисунок 3.1 – Взаимосвязь между понятиями «событие», «действие», «процесс»

В зависимости от того, какой из трех способов формирования фазовой траектории используется, различают способы имитации:

- событийный;
- основанный на просмотре активностей;
- процессный;
- транзактный;
- агрегатный.

## Событийный способ:

- 1) множество особых событий можно разбить на небольшое число  $L$  типов событий

$$\{A^{(1)}, \dots, A^{(L)}\} \subset \{A_j^{(i)}\}, (j = \overline{1, m_i}, i = \overline{1, N}), L \ll \sum_{i=1}^N m_i;$$

- 2) для каждого типа событий определена последовательность действий, приводящая к изменению состояния системы  $S$ ;
- 3) определены условия перехода от одного события к другому для всех типов событий;
- 4) интервалы времени между последовательными наступлениями событий – случайные величины с известными законами распределения вероятностей.

## Способ, основанный на просмотре активностей:

- 1) все действия для элемента  $A^{(i)}$  системы  $S$  различны и приводят к наступлению различных событий;
- 2) каждое действие  $d_j^{(i)}$  характеризуется набором условий его выполнения;
- 3) времена выполнений действий  $\{t_j^{(i)}\}$  являются случайными величинами с известными законами распределения вероятностей.

**Процессный способ** сочетает особенности событийного и способа, основанного на просмотре активностей.

Применяется, когда поведение элементов  $A^{(i)}$  системы  $S$  может быть описано фиксированными для некоторого класса систем последовательностями событий и действий, так называемыми *процессами*.

**Транзактный способ** имитации сформирован в результате развития процессного способа для моделирования систем массового обслуживания.

**Агрегатный способ** основывается на использовании агрегативных моделей.

## 4. Этапы имитационного моделирования.

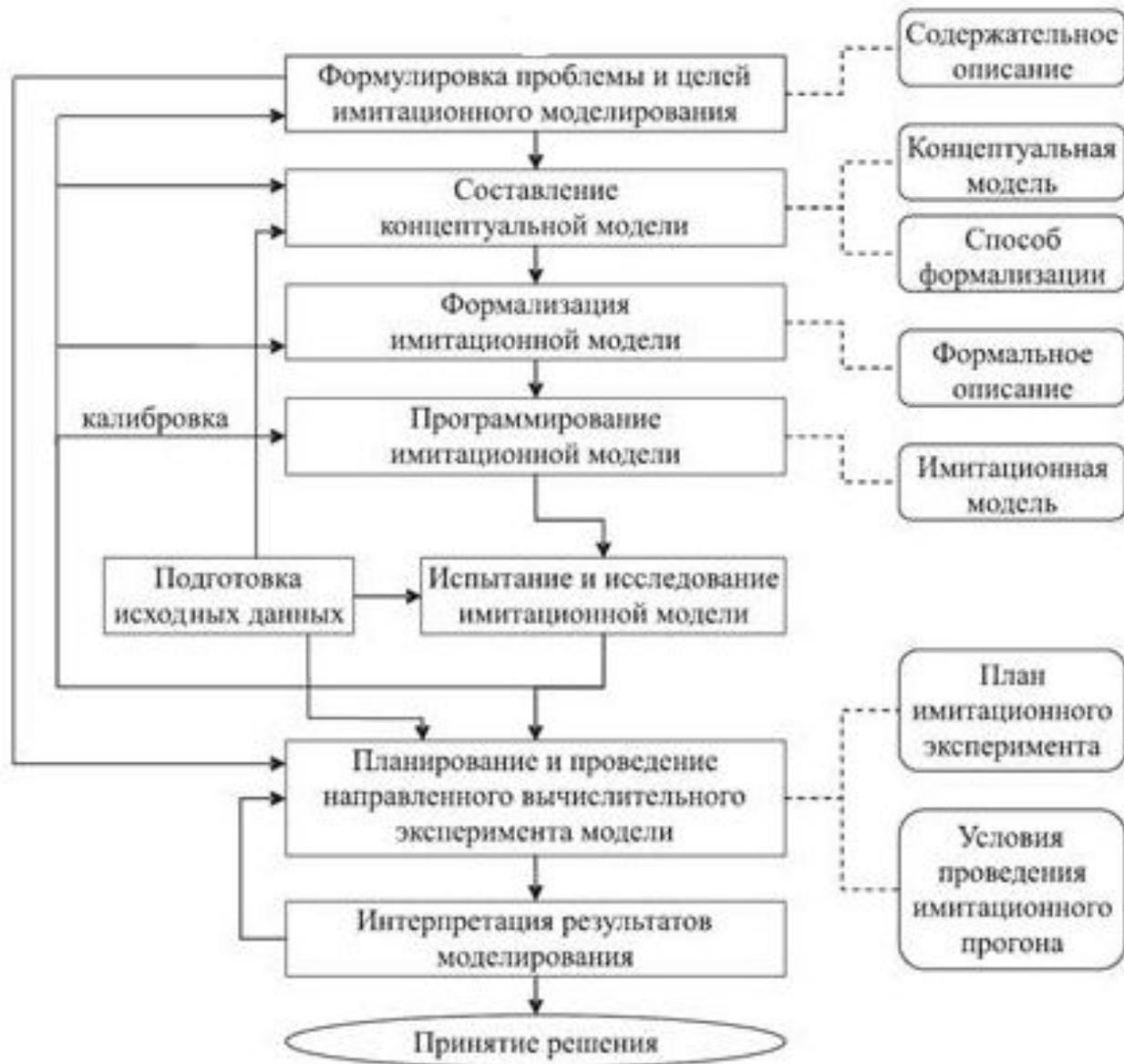


Рисунок 4.1 - Этапы имитационного моделирования

## Особенности этапов ИМ.

1. *Формулировка проблемы и определение целей имитационного исследования.* Документированным результатом на этом этапе является составленное содержательное описание объекта моделирования.
2. *Разработка концептуального описания.* Результатом деятельности системного аналитика является концептуальная модель (или вербальное описание) и выбор способа формализации для заданного объекта моделирования.
3. *Формализация имитационной модели.* Составляется формальное описание объекта моделирования.
4. *Программирование имитационной модели (разработка программы-имитатора).* На этапе осуществляется выбор средств автоматизации моделирования, алгоритмизация, программирование и отладка имитационной модели.

5. *Испытание и исследование модели, проверка модели.* Проводится верификация модели, оценка адекватности, исследование свойств имитационной модели и другие процедуры комплексного тестирования разработанной модели.
6. *Планирование и проведение имитационного эксперимента.* На данном технологическом этапе осуществляется стратегическое и тактическое планирование имитационного эксперимента. Результатом является составленный и реализованный план эксперимента, заданные условия имитационного прогона для выбранного плана.
7. *Анализ результатов моделирования.* Проводится интерпретация результатов моделирования и их использование – собственно принятие решений.