

Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Методы системной динамики

Дисциплина для магистрантов
специальности «Математика и компьютерные науки»
профилизации «Компьютерная математика системный анализ»

доц. Лаврова О.А.

механико-математический факультет, БГУ, Минск

2022

Системная динамика

Системная динамика (system dynamics) – это один из подходов имитационного моделирования

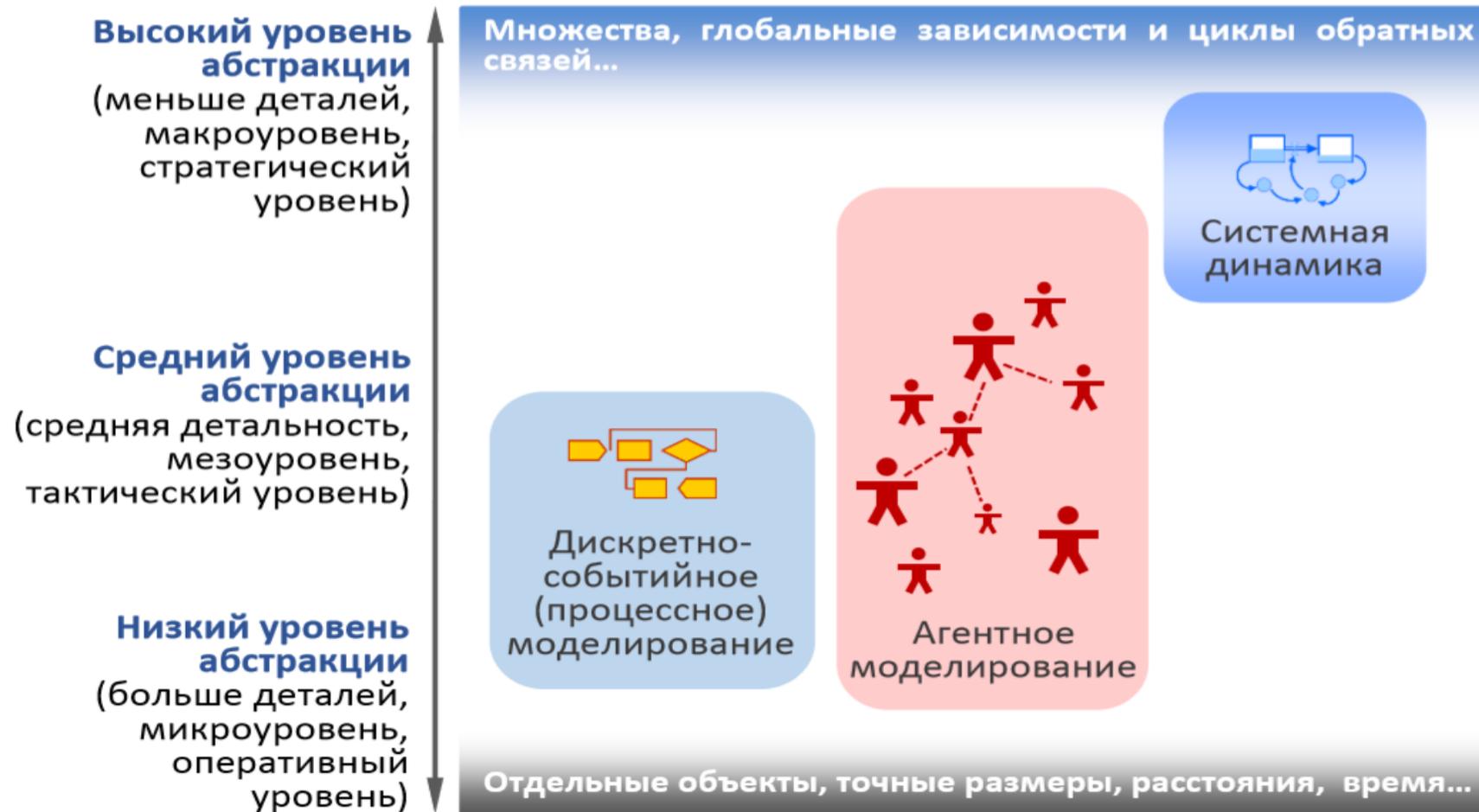
История

Системная динамика предложена и разработана **в конце 1950-х годов** американским профессором Джейм Форрестером (1918-2016) (Jay W. Forrester) из Массачусетского технологического института (MIT) на базе комплекса идей из теории управления, теории информации и кибернетики, а также теории управления организациями.

В **1958 г.** разработаны специальные языки моделирования SIMPLE (Simulation of Industrial Management with Lots of Equations) и DYNAMO (DYNAmic MOdels).

В **1961 г.** опубликована первая книга Д. Форрестера по системной динамике «Industrial Dynamics»

Подходы имитационного моделирования



The AnyLogic Company, 2016

Высокий уровень абстракции объектов

Системно-динамические модели предполагают высокий **стратегический** уровень абстракции исследуемых объектов

Моделируются проблемы управления в организации, управления проектами, управления цепочками поставок, рыночного равновесия, социально-экономического развития городов, экологические процессы

В моделях оперируют количествами объектов и агрегированными показателями. Физическое перемещение не анализируется.

Моделируются потоки вместо индивидуальных свойств объектов моделирования

Системно-динамические модели – это инструмент для поддержки принятия решений при **стратегическом анализе** и долгосрочном планировании

Графические нотации

Системная динамика предлагает две графические нотации:

- **причинно-следственная диаграмма** (causal loop diagram)
- **потоковая диаграмма** (stock and flow diagram)

Причинно-следственная диаграмма – метод качественного анализа сложных систем

Потоковая диаграмма – метод количественного анализа сложных систем на основе имитационного моделирования

Системная динамика: главный постулат

- Главный постулат системной динамики «**Структура системы определяет поведение**», а не внешние воздействия на систему.
- Важное следствие: глубинные причины большинства проблем, в которые попадает управляемая сложная система, коренятся не в «неблагоприятных» внешних условиях, а в специфике **структуры** системы.

Хомяков, Системный анализ, 2008

Нужно приучиться смотреть на основные **структуры**, а не на события

Senge, The Fifth Discipline, 1990, Сенге, Пятая дисциплина, 1999

При построении моделей основное внимание уделяется выявлению **структуры** системы.

Причинно-следственная диаграмма: мотивация

- Мы страдаем от фундаментального несовпадения между природой реальности в сложных системах и привычным для нас способом мыслить об этой реальности. И первым шагом к устранению этого несовпадения должно быть осознание того, что **причины и следствия разъединены в пространстве и времени.**
- Для системного мышления является аксиомой то, что **всякое влияние есть одновременно и причина, и результат.**
- Мы представляем мир линейным, но **реальность циклична.** В этом одно из главных ограничений нашей способности мыслить системно.
- Развивая системное мышление, мы отбрасываем предположение, что всегда есть кто-то, на ком лежит ответственность. Из концепции обратной связи вытекает, что **каждый несет часть ответственности за проблемы, создаваемые системой.**

Senge, The Fifth Discipline, 1990 , Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Системный принцип круговой причинности

является основой причинно-следственных диаграмм.

Any effect becomes a causative factor for future effects, influencing them in a manner particularly subtle, variable, flexible, and of an endless number of possibilities

von Forester, etc. 1953

Причинно-следственная диаграмма: определение

Причинно-следственная диаграмма – метод качественного анализа сложных систем.

Построенная модель системы позволяет выявить появление проблемы, развитие проблемы, наметить варианты решения проблемы.

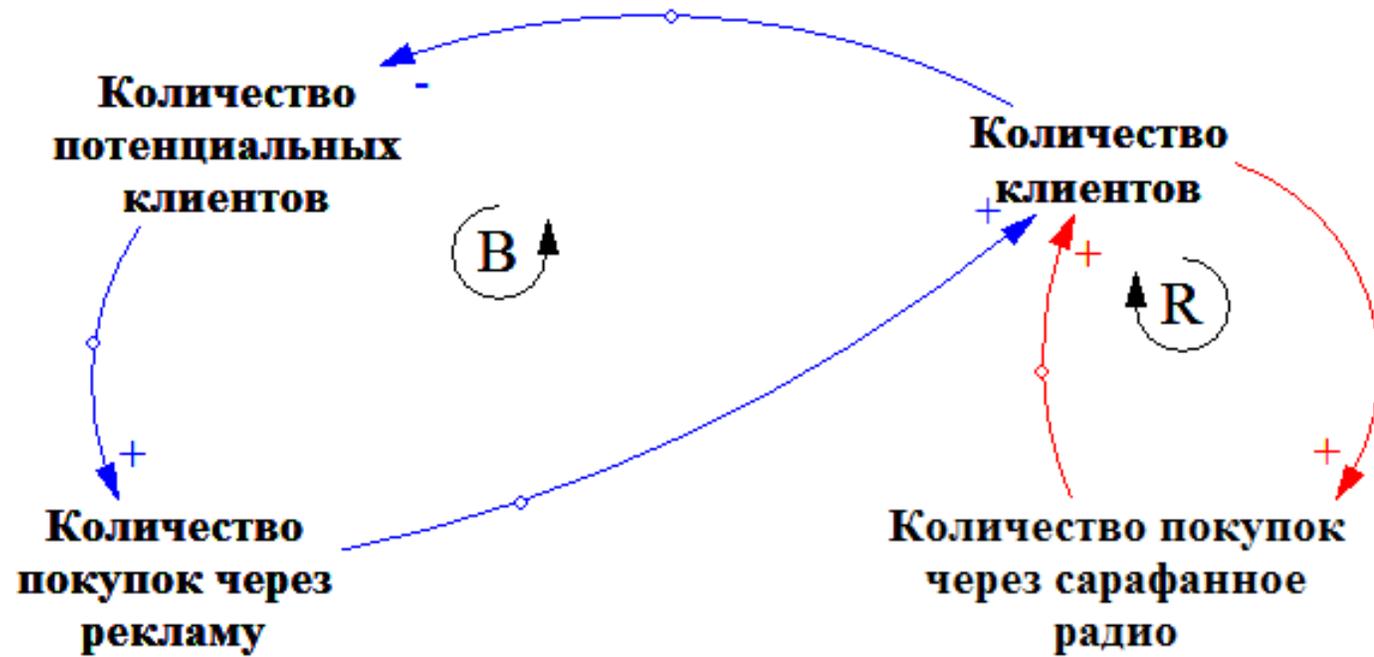
Методология разработки причинно-следственной диаграммы I

- Причинно-следственные диаграммы состоят из ключевых **переменных**, определяющих поведение системы, и **связей** между ними. Переменные обозначаются текстовыми идентификаторами, связи между переменными обозначаются стрелками от причины к следствию. Связи между переменными имеют полярность (положительная или отрицательная)
- The identification of influential parameters, especially in large (complex) SD models, however, a challenge.

Schoenenberger, in Simulation Modelling Practice and Theory, 2021

- **Цикл (петля) обратной связи** представляет собой цепочку связей, исходящую из переменной и возвращающуюся к ней же

Пример для модели Басса



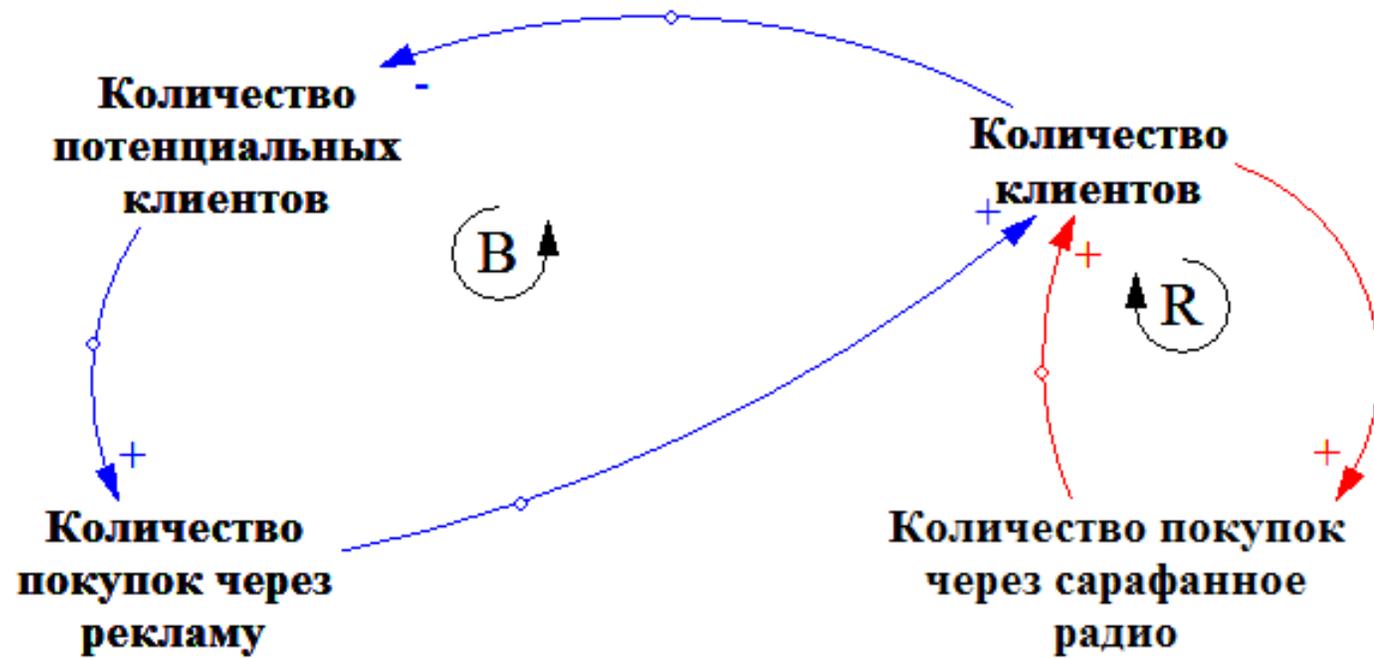
Методология разработки причинно-следственной диаграммы II

На языке системного мышления все системы описываются с помощью трех элементов системного мышления: **усиливающая обратная связь** (четное число отрицательных связей в цикле), **уравновешивающая обратная связь** (нечетное число отрицательных связей в цикле) и **задержки**

Senge, The Fifth Discipline, 1990 , Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Причинно-следственная диаграмма – это графическая нотация системной динамики, представляющая причинно-следственные связи системы и глобальные влияния одних параметров на другие во времени с помощью **циклов обратной связи**

Пример для модели Басса

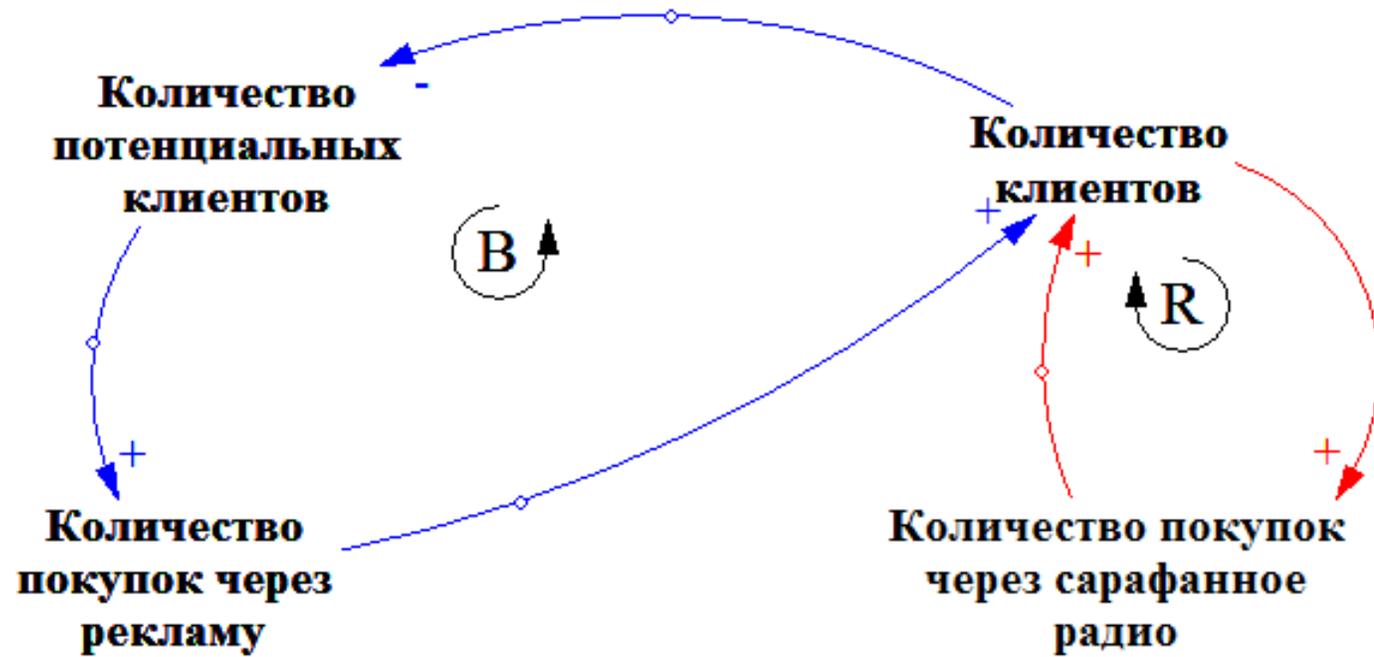


Методология разработки причинно-следственной диаграммы III

Если в системе имеется **усиливающая (reinforcing) обратная связь** между некоторыми элементами, то система обязательно будет вести себя по типу экспоненциального роста. *При этом совершенно все равно, какими будут внешние воздействия, инициирующие данную обратную связь. Систему в этой ситуации достаточно лишь незначительно подтолкнуть.*

Хомяков, Системный анализ, 2008

Пример для модели Басса



Методология разработки причинно-следственной диаграммы IV

Если отклик контура обратной связи на переменное изменение выступает против первоначального возмущения, то контур является отрицательным или целенаправленным.

Сидоренко, Системная динамика, 1998

Уравновешивающую или стабилизирующую (balancing) обратную связь мы находим везде, где наличествует поведение, ориентированное на достижение цели.

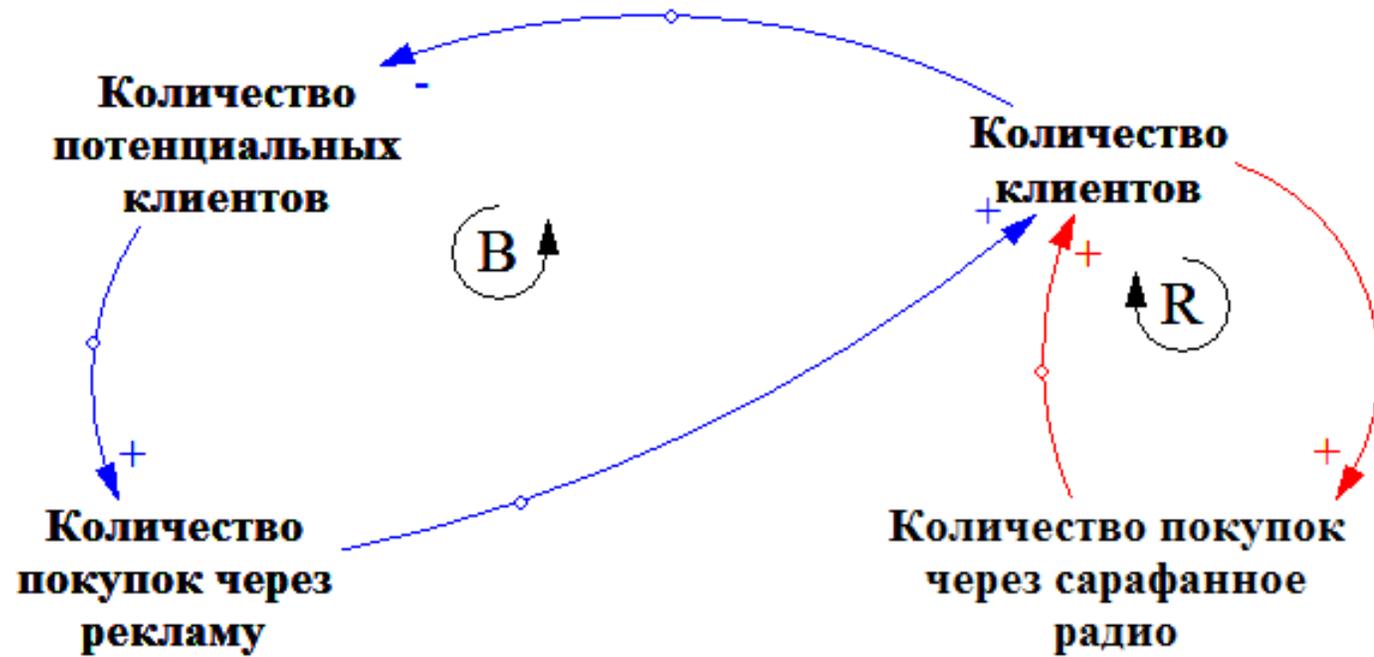
Senge, The Fifth Discipline, 1990, Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Системный принцип обратной связи:

All purposeful behavior may be considered to require negative feed-back. If a goal is to be attained, some signals from the goal are necessary at some time to direct the behavior.

N. Wiener, Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine, 1948

Пример для модели Басса



Методология разработки причинно-следственной диаграммы V

Многие процессы обратной связи работают с **задержками**, так что последствия действий проявляются только постепенно.

Senge, The Fifth Discipline, 1990 , Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Запаздывания в циклах обратной связи оказывают решающее влияние на поведение системы. Часто они приводят к возникновению колебаний. ... Продолжительность запаздывания – **очень мощный рычаг воздействия** на систему... далеко не всегда величину запаздывания можно легко изменить.

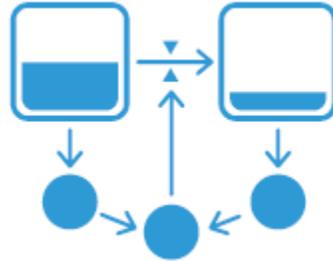
Д. Медоуз, Алфубка системного мышления, 2008

Причинно-следственная диаграмма: недостатки

Причинно-следственная диаграмма не имеет семантики,
достаточной для имитации

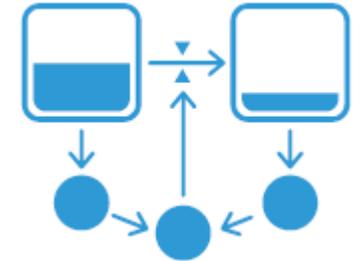
Потоковая диаграмма

Потоковая диаграмма (stock and flow diagram) – метод количественного анализа сложных систем на основе имитационного моделирования



Основные компоненты потоковой диаграммы

- **Накопитель**, запас, уровневая переменная, **stock**. Характеризует накопленные значения переменной системы в текущий момент времени. Изменяется во времени только в результате работы входящих и выходящих потоков. Выражается в единицах размерности модели (численность людей, литры, банковская наличность, товары, знания...)
- **Поток**, потоковая переменная, **flow**. Регулирует скорость изменения накопителей. Увеличивает или уменьшает значение переменной накопителя. Изменяется на основе некоторой функции. Выражается в единицах размерности модели за единицу времени
- **Переменные**
- **Связь**



Потоковая диаграмма моделирует процессы в виде потоков между накопителями

Все компоненты потоковой диаграммы имеют числовые значения

Реализация имитационной модели в виде системы ОДУ

- С формальной точки зрения потоковая диаграмма реализуется в виде математической модели (система ОДУ первого порядка или дифференциально-интегральных уравнений)

$$\frac{d(\text{stock})}{dt} = \text{inflow}(t) - \text{outflow}(t) \text{ или}$$

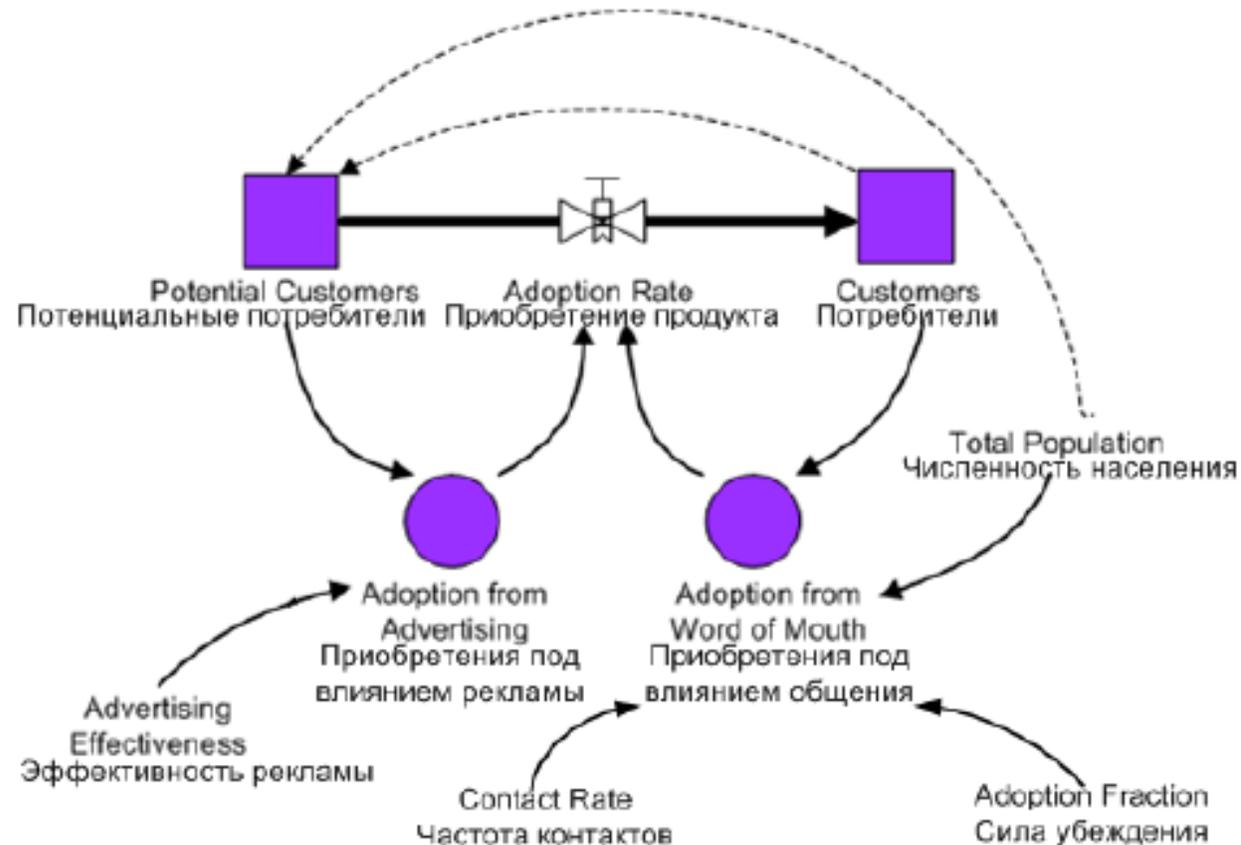
$$\text{stock}(t) = \text{stock}(t_0) + \int_{t_0}^t \text{inflow}(\tau) - \text{outflow}(\tau) d\tau$$

Потоковая диаграмма – это графическая модель системы ОДУ

- Системно-динамическая модель в виде потоковой диаграммы может быть реализована инструментами для схемотехнического моделирования динамических систем (например, MATLAB Simulink) на основе блочного подхода. Однако такие инструменты не удобны для аналитиков, так как они не поддерживают системного образа мышления

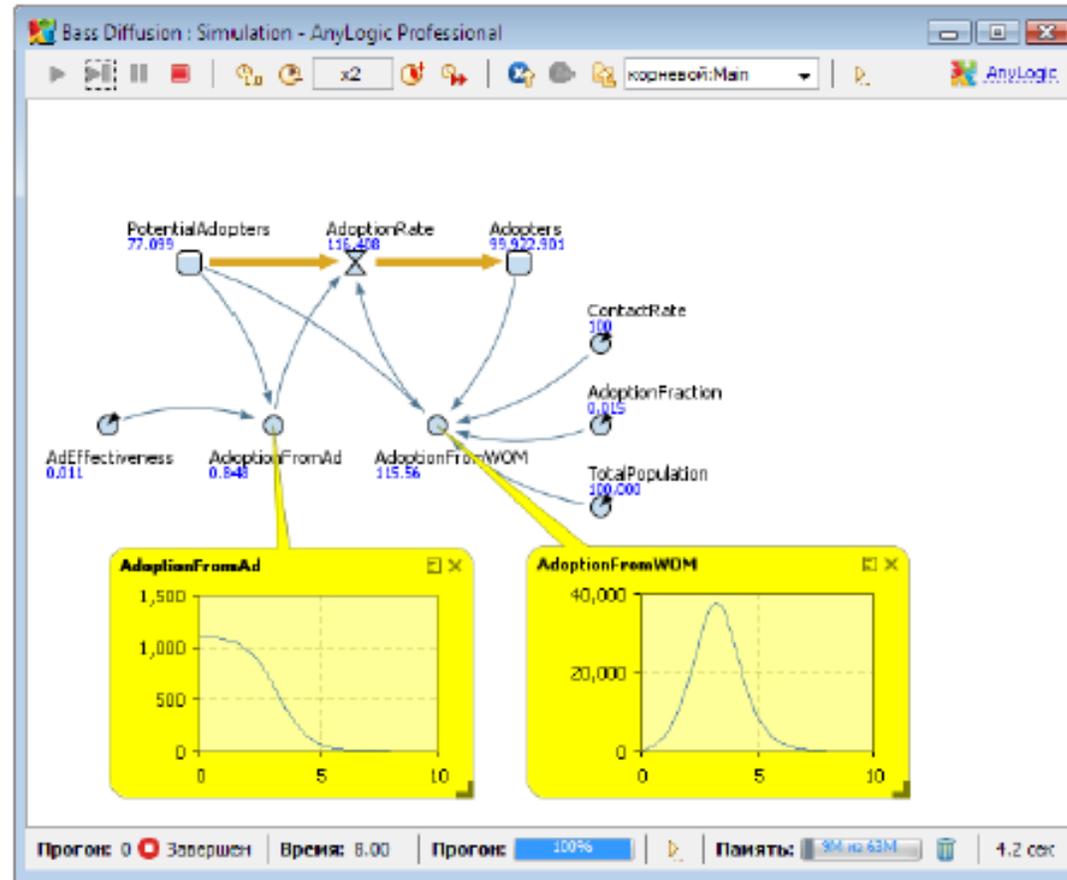
Борщев, AnyLogic

Потоковая диаграмма для модели Басса I



Киселева, Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic, 2009

Потоковая диаграмма для модели Басса II



Киселева, Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic, 2009

Потоковая диаграмма для модели Басса III

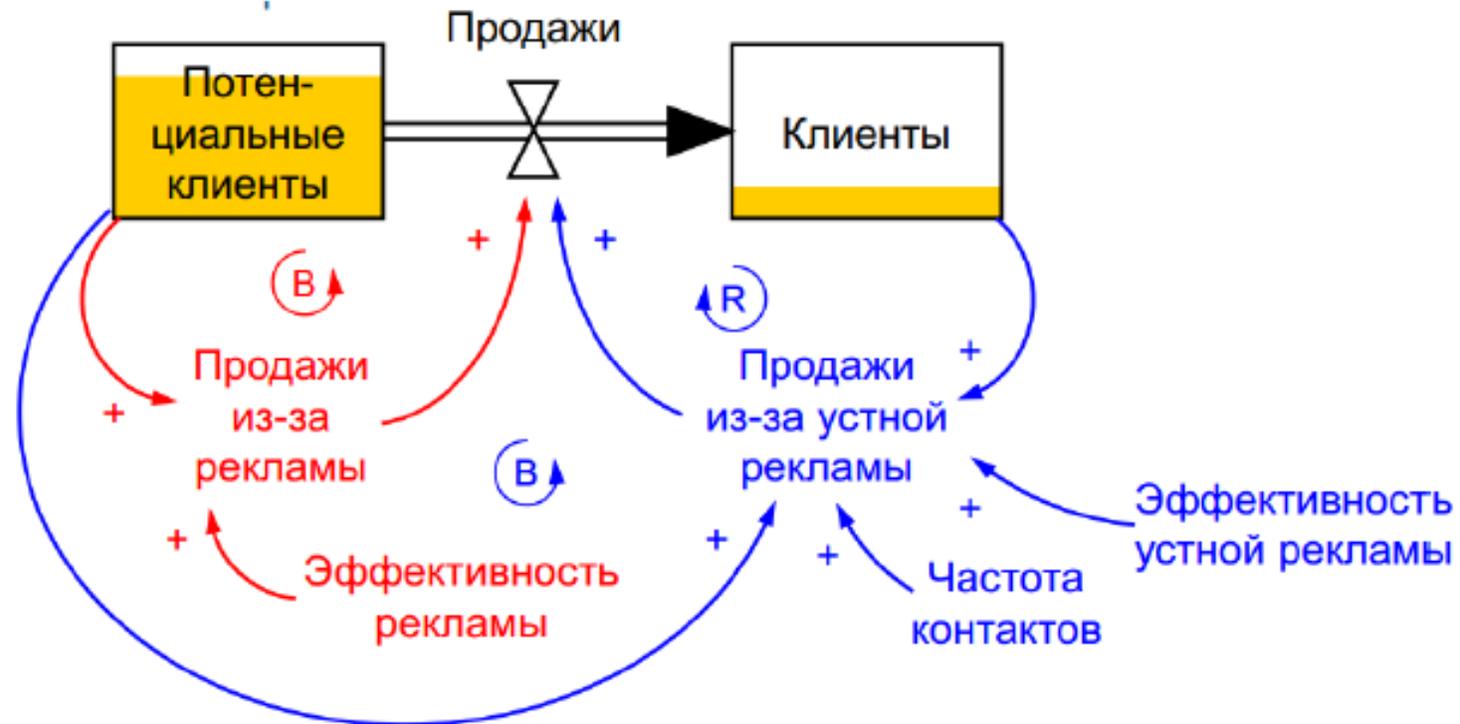


Рис. 3.3. Модель системной динамики

Маликов, Практикум по ИМ сложных систем в среде AnyLogic 6, 2013

Потоковая диаграмма для модели Басса IV

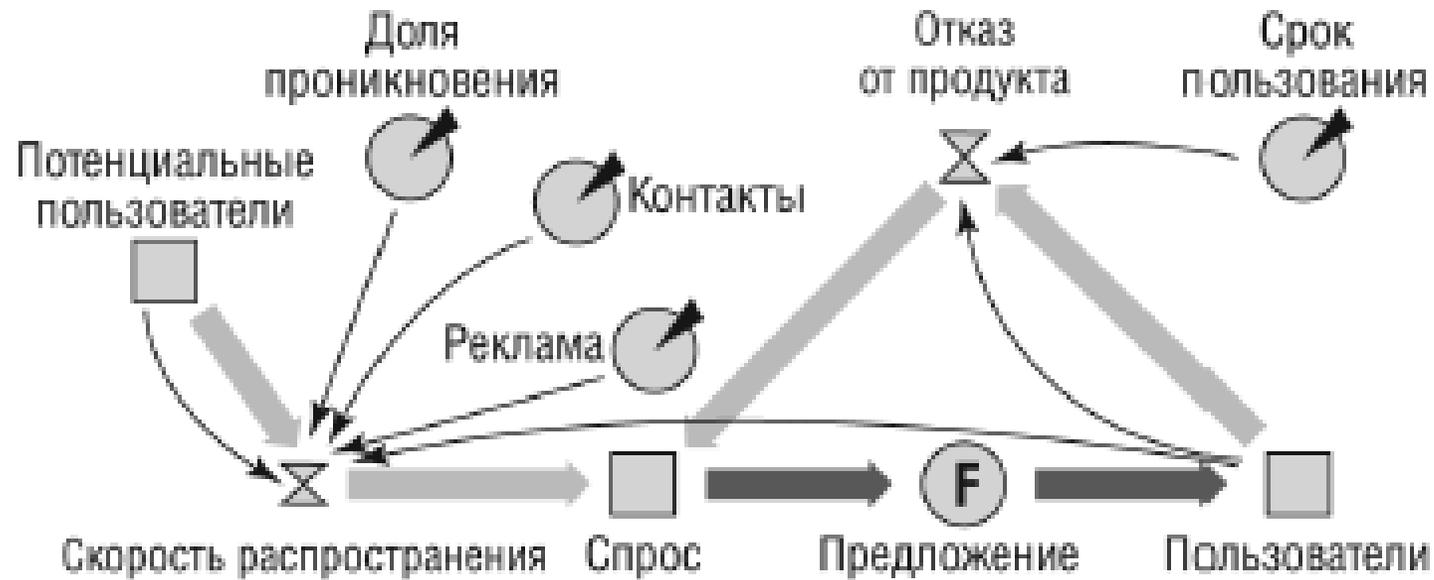


Рис. 2. Пример системно-динамической диаграммы
«Проникновение продукта на рынке»

Сидоренко, Красносельский, Бизнес-информатика, 2009

Модель Басса: содержательная постановка

Модель Басса (Bass diffusion model, 1969) -- модель распространения нового продукта, услуги или инновации; модель потребительского рынка.

Ограничения: Все люди ведут себя одинаково и могут быть либо потенциальными клиентами ($P(t)$ их количество), либо клиентами нового продукта ($A(t)$ их количество)

Допущение: рост количества клиентов нового продукта объясняется эффектом рекламы и эффектом коммуникаций между потенциальными клиентами и клиентами

Поведение: Изначально продукт никому не известен и для того, чтобы потенциальные клиенты начали его приобретать, продукт рекламируется. В итоге определенная доля людей приобретает продукт под воздействием рекламы. Также потенциальные клиенты приобретают продукт в результате общения с клиентами продукта (косвенная реклама).

Модель Басса: математическая модель

В качестве неизвестной величины рассматривается количество клиентов некоторого продукта или услуги $A(t)$

Потенциальные клиенты P становятся клиентами A со скоростью (темп продаж), которая зависит от рекламы $AdoptionFromAd$ и косвенной рекламы $AdoptionFromWOM$

$$\frac{dA}{dt} = AdoptionFromAd + AdoptionFromWOM$$

Полагается, что скорость, соответствующая рекламе, пропорциональна числу потенциальных клиентов

$$AdoptionFromAd = P * AdEffectiveness$$

Скорость, соответствующая косвенной рекламе, при условии, что все контактируют со всеми

$$AdoptionFromWOM = A * ContactRate * \frac{P}{P + A} * AdoptionFraction$$

где $ContactRate$ – количество контактов человека в единице времени, $N = P + A$ – общее количество людей на рынке

$$\frac{dA}{dt} = k_1(N - A) + k_2(N - A)A$$

где $k_1 = const > 0$, $k_2 = const > 0$.