

Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Системная динамика

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

Лаврова О.А.

механико-математический факультет, БГУ, Минск

2021

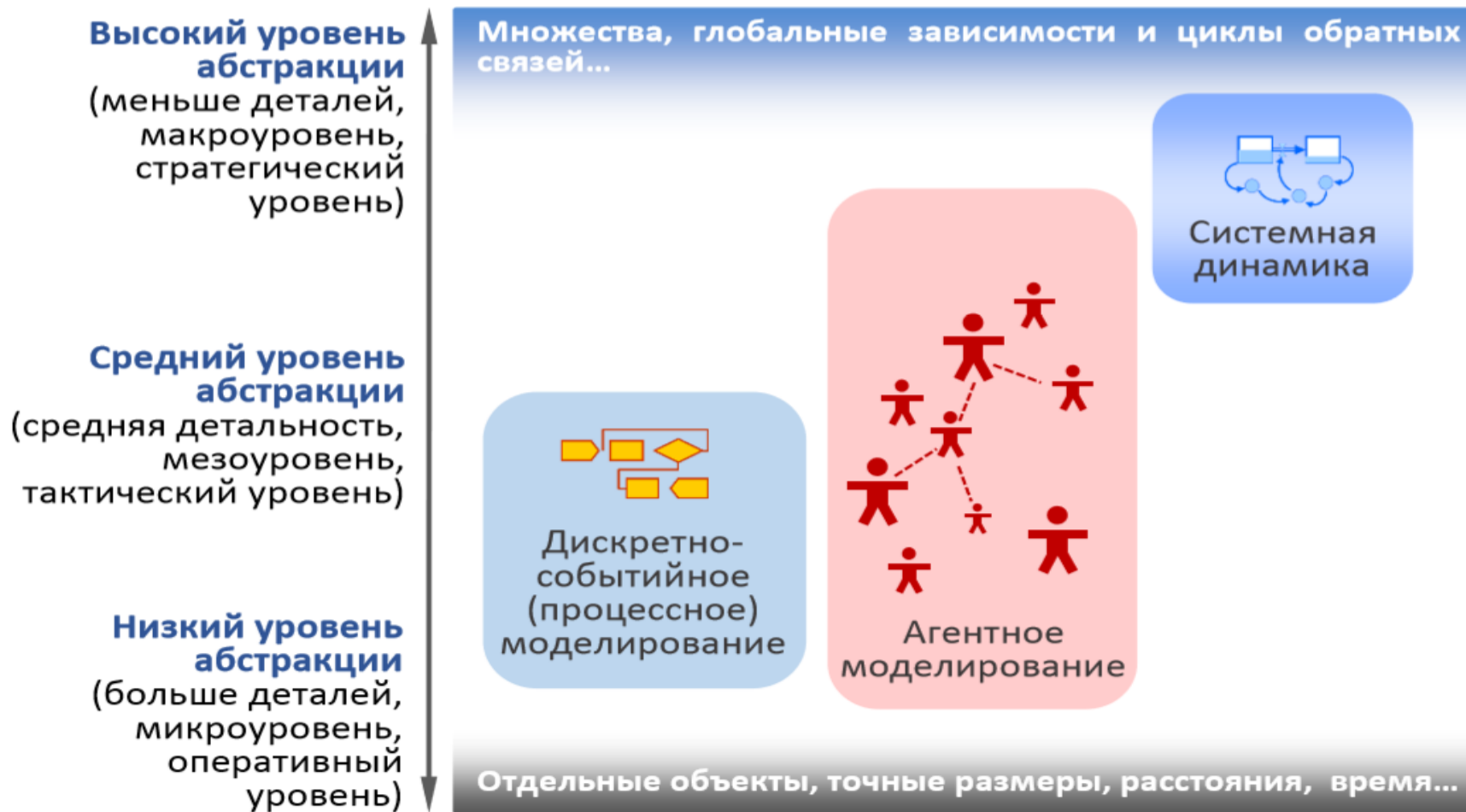
Системная динамика, System dynamics

Подход имитационного моделирования предложен и разработан 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. разработан специальный язык программирования DYNAMO (DYNAmic MOdels).

Системно-динамические модели предполагают **высокий уровень абстракции (стратегический)** исследуемых объектов. Системная динамика является эффективным методом исследования **организационных систем**: анализ рынка, управление проектами, управление цепочками поставок

Мощный инструмент для поддержки принятия решений при стратегическом анализе и долгосрочном планировании

Парадигмы имитационного моделирования II



В моделях оперируют количествами объектов и агрегированными показателями. Моделируются проблемы управления с организации, рыночного равновесия, социально-экономического развития городов, экологические процессы

Физическое перемещение не анализируется. Потоки вместо индивидуальных свойств объектов моделирования

The AnyLogic Company, 2016

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. Индивидуальные объекты не рассматриваются, а лишь их количества и агрегированные показатели.

Диаграммы

Системная динамика предлагает две графические нотации:

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

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.**
- Мы представляем мир линейным, но **реальность циклична.** В этом одно из главных ограничений нашей способности мыслить системно.
- Для системного мышления является аксиомой то, что **всякое влияние есть одновременно и причина, и результат.**
- 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 I

- Причинно-следственная диаграмма – метод качественного анализа сложных систем. Построенная модель системы позволяет выявить появление проблемы, развитие проблемы, наметить варианты решения.
- Причинно-следственная диаграмма (causal loop diagram) – это графическая нотация системной динамики, представляющая причинно-следственные связи системы и глобальные влияния одних параметров на другие во времени с помощью циклов обратной связи

Причинно-следственная диаграмма II

- 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

Причинно-следственная диаграмма III

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

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

Причинно-следственная диаграмма IV

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

Причинно-следственная диаграмма V

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

Причинно-следственная диаграмма VI

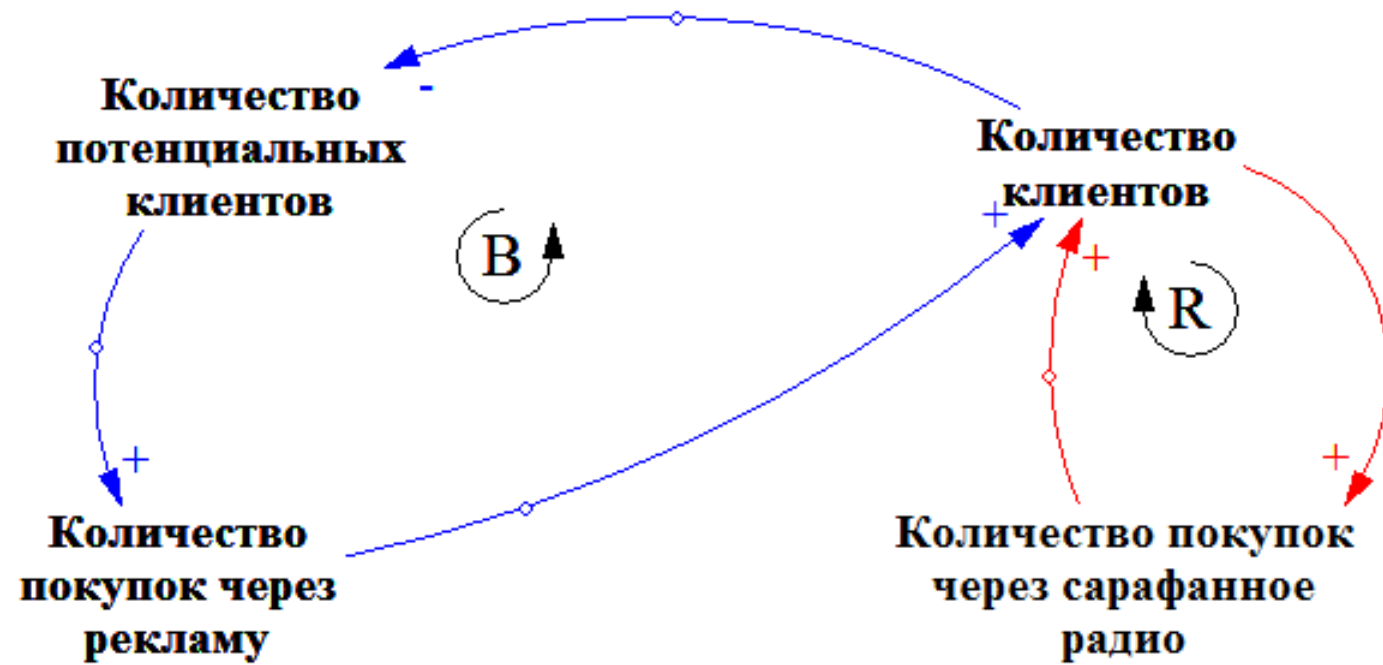
Многие процессы обратной связи работают с **задержками**, так что последствия действий проявляются только постепенно.

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, Албука системного мышления, 2008

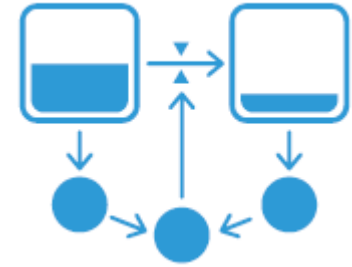
Пример. Модель Басса



Причинно-следственная диаграмма VI

Причинно-следственная диаграмма не имеет семантики,
достаточной для имитации

Потоковая диаграмма I



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

Основные компоненты потоковой диаграммы:

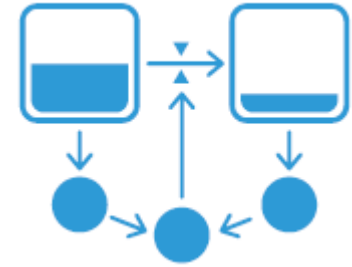
- **Накопитель**, запас, уровневая переменная, **stock**. Характеризует накопленные значения переменной системы в текущий момент времени. Изменяется во времени только в результате работы входящих и выходящих потоков. Выражается в единицах размерности модели (численность людей, литры, банковская наличность, 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

AnyLogic

Потоковая диаграмма II



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

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

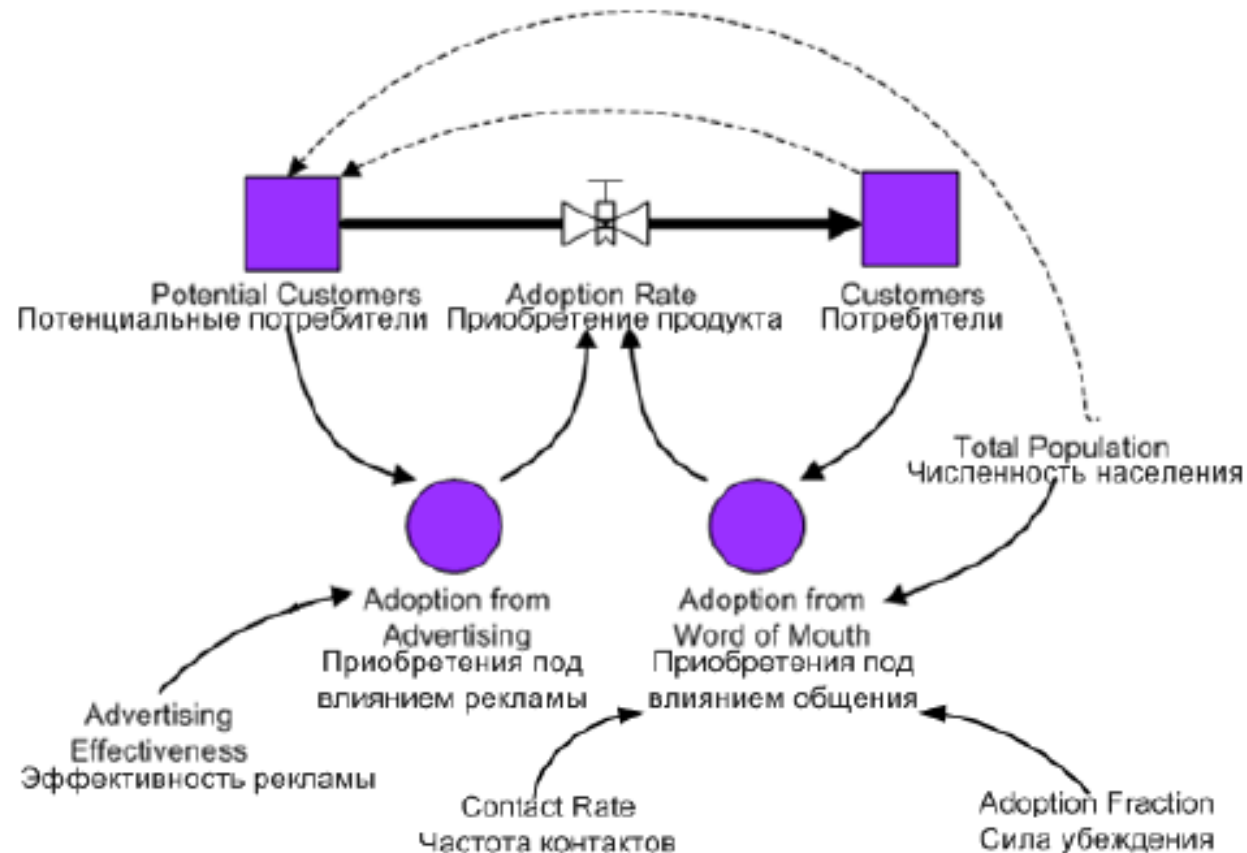
$$\text{stock}(t) = \text{stock}(t_0) + \int_{t_0}^t \text{inflow}(\tau) - \text{outflow}(\tau) d\tau$$

Потоковая диаграмма – графическая модель системы ОДУ

- Системно-динамическая модель в виде потоковой диаграммы может быть реализована инструментами для схмотехнического 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

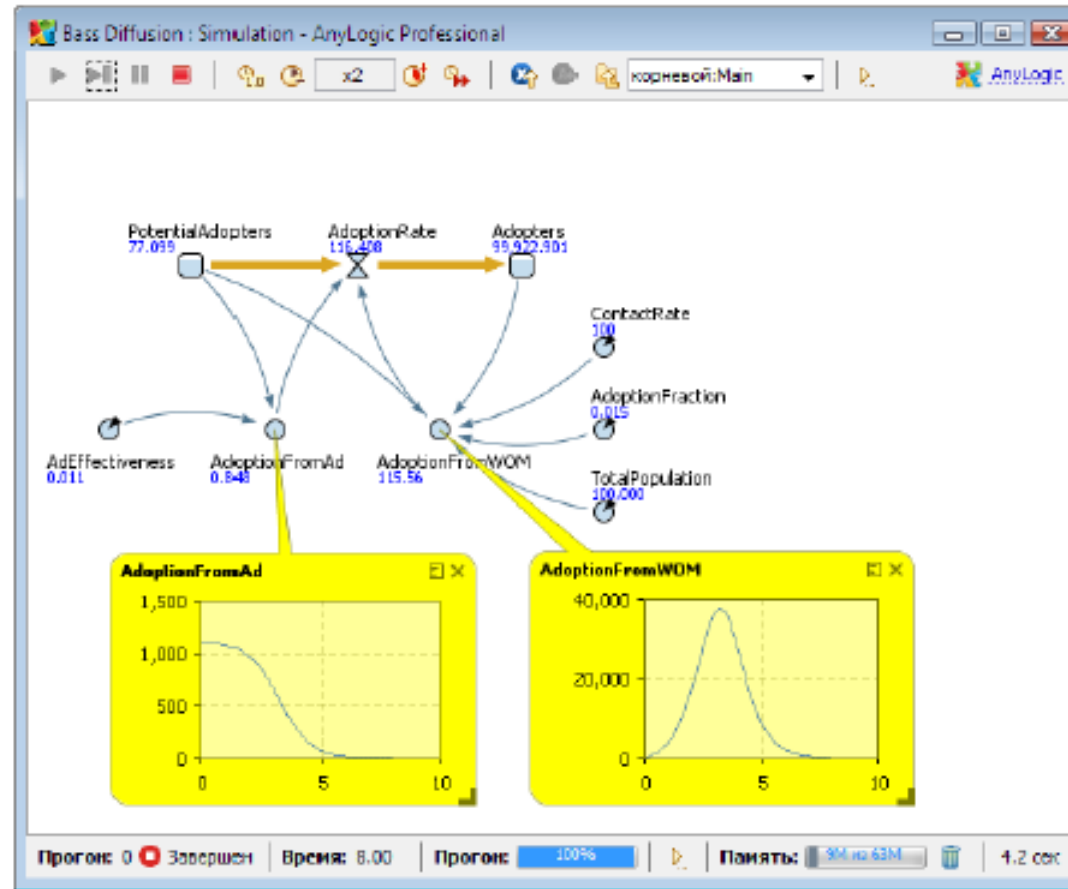
Борщев, AnyLogic

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

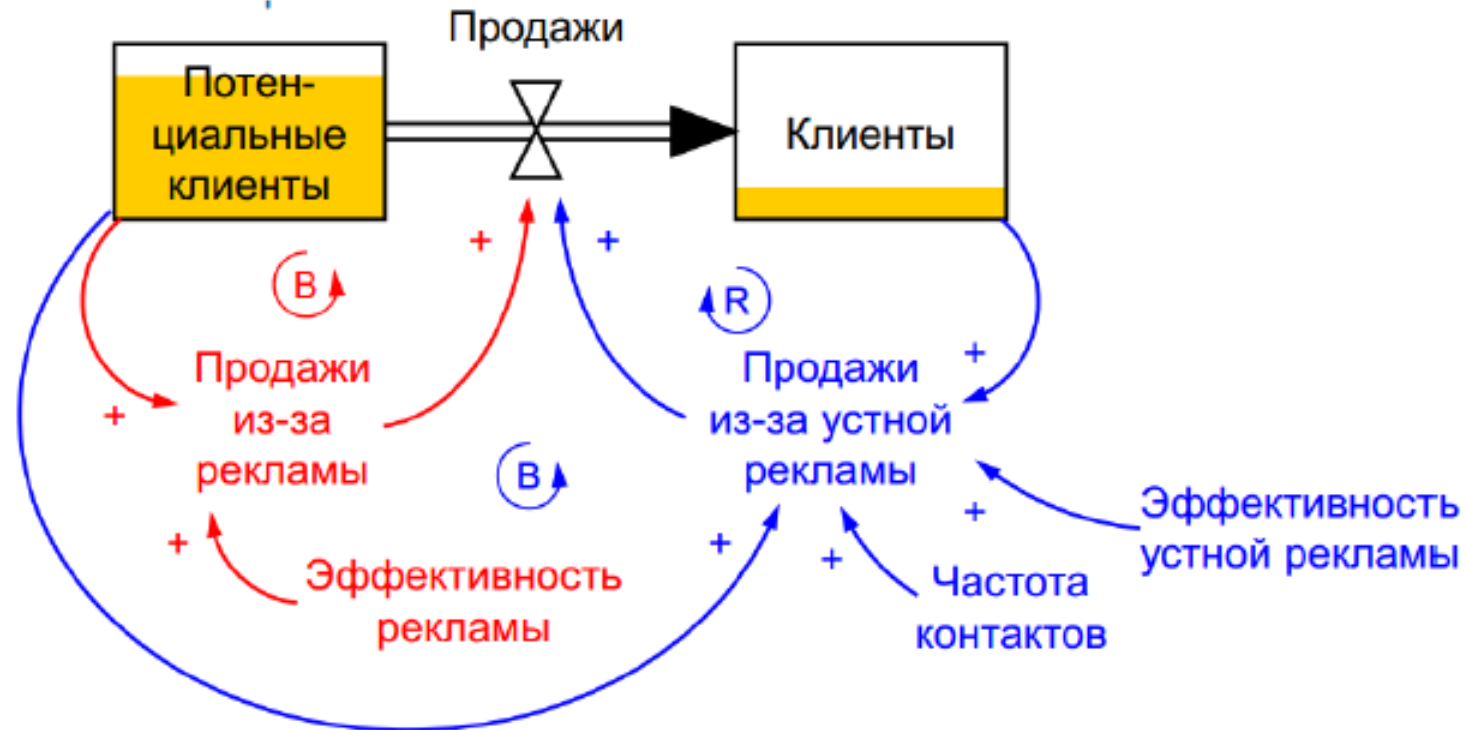


Рис. 3.3. Модель системной динамики

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

Потоковая диаграмма для модели Басса IV

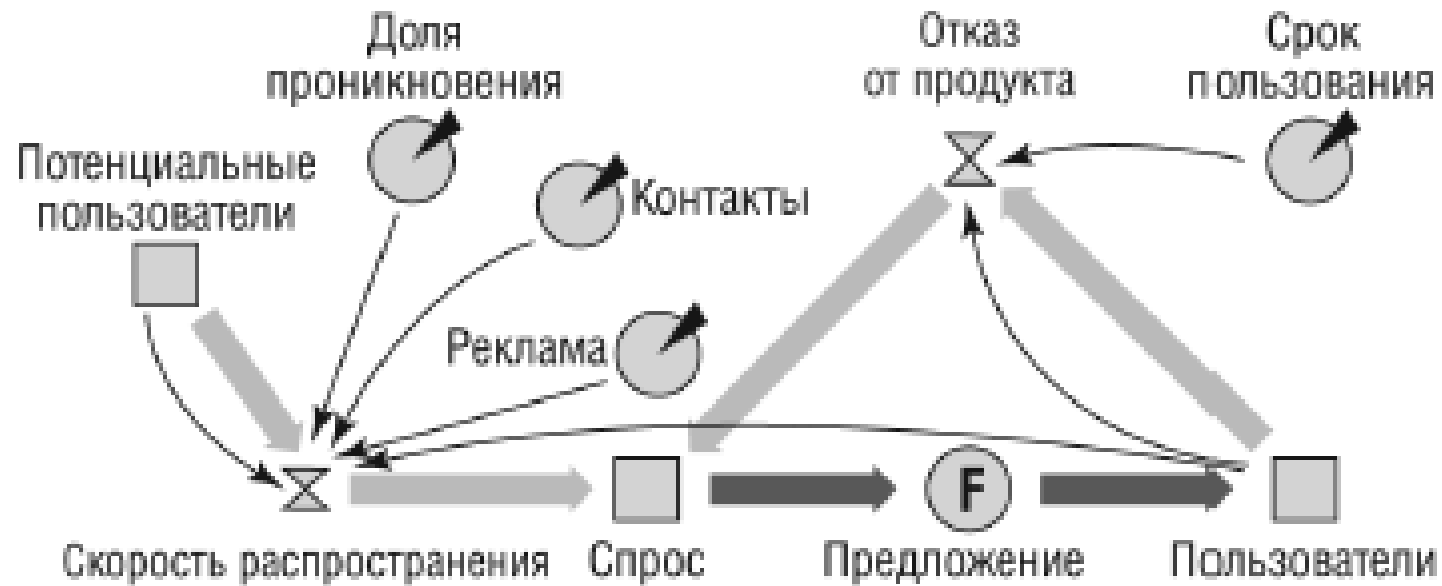


Рис. 2. Пример системно-динамической диаграммы
«Проникновение продукта на рынке»

Сидоренко, Красносельский, Бизнес-информатика, 2009

Модель Басса – реализация в AnyLogic

- Подробная инструкция по реализации системно-динамической модели в AnyLogic см.
 - Справка AnyLogic/Учебные пособия/Диффузия по Бассу (Системная динамика)
 - Презентация «Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic», слайды 211—241, AnyLogic
 - В.Н. Михайлов. Имитационное моделирование: учебно-методическое пособие. 2015. Лабораторная работа 2. Моделирование динамических систем, стр. 48—100.
 - М.В. Киселева. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие. 2009. Лабораторная работа № 2, стр. 39—61.
- Дополнительно реализованы усовершенствования модели
 - Моделирование повторных покупок (продаж)
 - Моделирование цикличности спроса
 - Моделирование стратегии рекламной кампании
 - Оптимизация рекламной стратегии

ЛБ 1. Системно-динамическая модель Басса

1. Необходимо осуществить базовую реализацию системно-динамической модели Басса
2. Необходимо осуществить расширенную реализацию модели Басса
 - Моделирование повторных покупок (*Бритикова А., Миругин А.*)
 - Моделирование цикличности спроса (*Пашкевич А., Фоминова Ю., Хохолко И.*)
 - Моделирование стратегии рекламной кампании (*Малейко А.*)
 - Оптимизация рекламной стратегии (*Масанин Р.*)