

Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Методы системной динамики (продолжение)

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

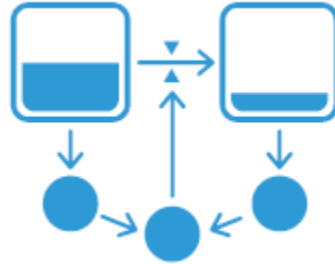
доц. Лаврова О.А.

механико-математический факультет, БГУ, Минск

2025

Потоковая диаграмма

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



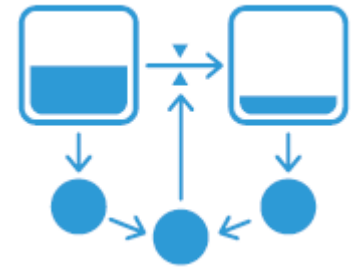
Основные компоненты потоковой диаграммы

1. **Накопитель** (запас, уровневая переменная, *stock*) характеризует накопленные значения переменной системы в текущий момент времени. Накопитель выражается в единицах размерности модели (численность людей, литры, банковская наличность, товары, знания...). Накопитель изменяется во времени только в результате работы входящих и выходящих потоков.
2. **Поток** (потоковая переменная, *flow*) определяет скорость изменения накопителей на основе некоторой заданной функции (детерминированное описание). Поток выражается в единицах размерности модели за единицу времени. Входящий поток (*inflow*) увеличивает значение накопителя. Выходящий поток (*outflow*) уменьшает значение накопителя.

3. Переменная

4. Связь

Накопители, потоки и переменные имеют числовые значения



Потоковая диаграмма моделирует процессы в виде потоков между накопителями

Реализация модели в виде системы ОДУ

С формальной точки зрения потоковая диаграмма реализуется в виде математической модели: системы ОДУ первого порядка или дифференциально-интегральных уравнений для каждого накопителя

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

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

Время в потоковых диаграммах изменяется непрерывно на заданном интервале $[t_0, t_{end}]$.

Потоковая диаграмма – это графическое представление 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

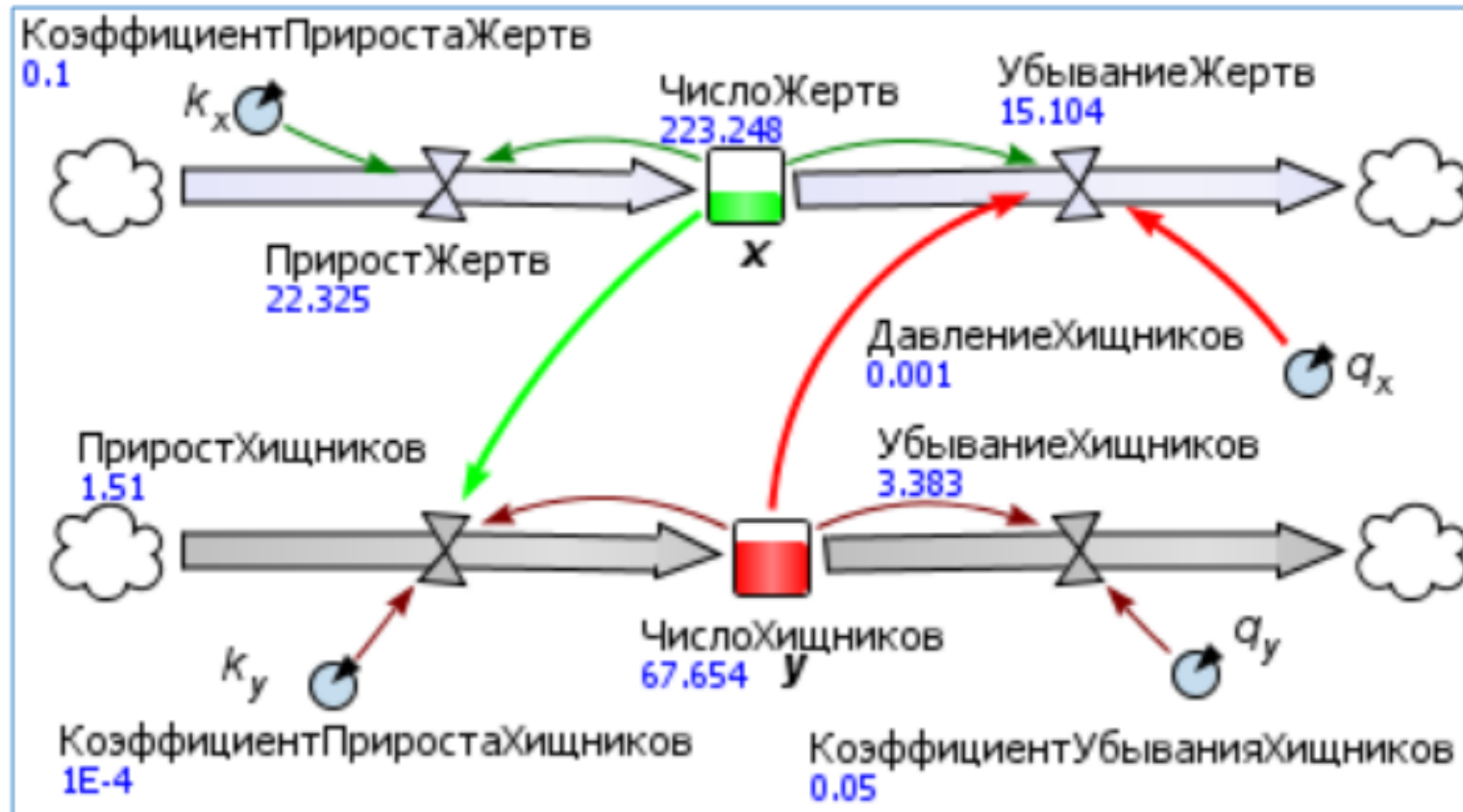
Пример потоковой диаграммы I



Накопитель **накапливает** различие между входящим и выходящим потоком, приводя к неравновесному поведению

$$stock(t) = stock(t_0) + \int_{t_0}^t (\lambda - \mu) d\tau$$

Пример потоковой диаграммы II



Осипов Г.С. Исследование простейших моделей математической экологии в среде имитационного моделирования AnyLogic, Бюллетень науки и практики, 2017

ЛБ1: Содержательная постановка задачи

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

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

Предположения: скорость изменения количества клиентов нового продукта определяется рекламой и межличностными коммуникациями (косвенной рекламой).

Поведение: Изначально новый продукт никому не известен и для того, чтобы люди начали его приобретать, он рекламируется. В результате определенная доля людей на рынке приобретает продукт под воздействием рекламы. Также люди приобретают продукт в результате общения с теми, кто этот продукт уже приобрел.

ЛБ1: Математическая модель

В качестве неизвестной величины рассматривается количество клиентов нового продукта на рынке $A(t)$

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

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

Полагается, что скорость, соответствующая рекламе, пропорциональна числу потенциальных клиентов с коэффициентом пропорциональности $AdEffectiveness = const > 0$

$$AdoptionFromAd = P * AdEffectiveness$$

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

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

где $ContactRate = const > 0$ – количество контактов человека в единице времени,

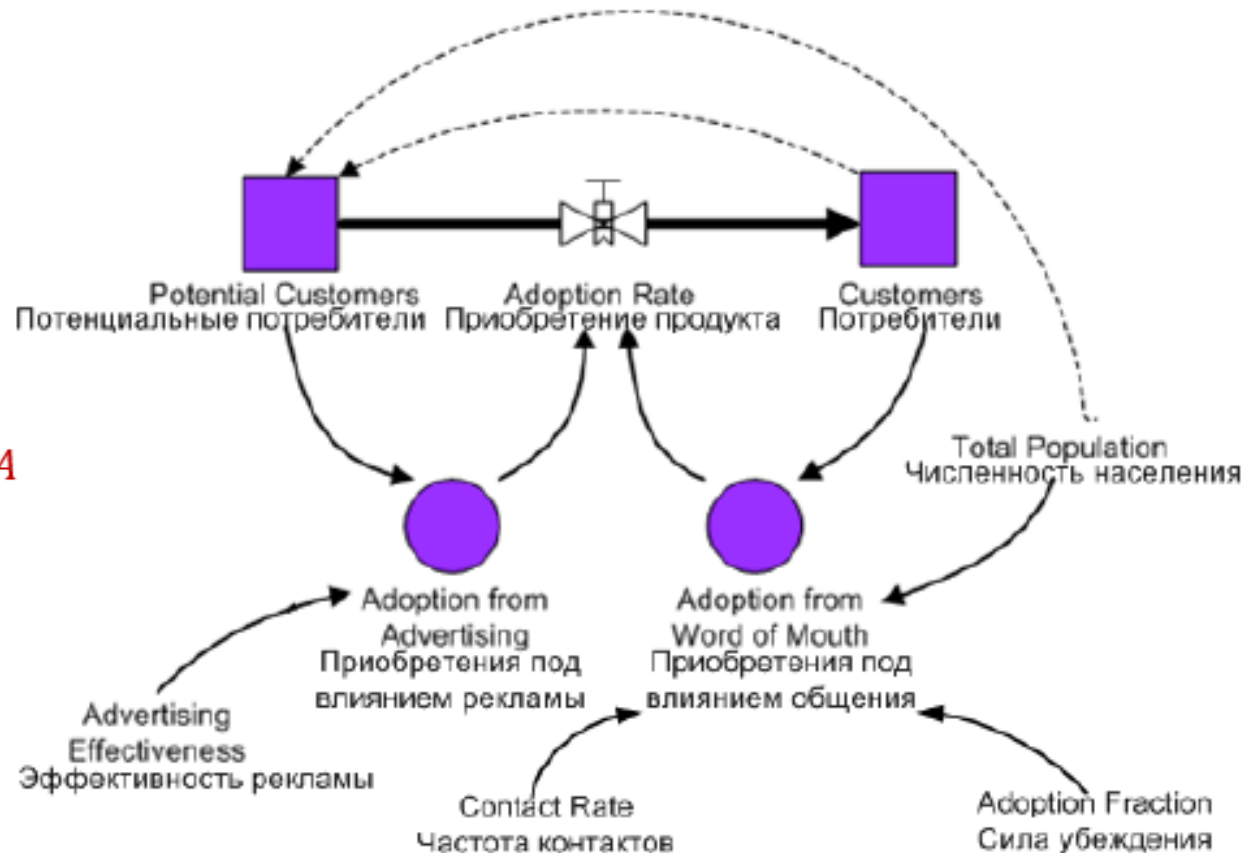
$N = P + A = const > 0$ – общее количество людей на рынке

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

где $k_1 = AdEffectiveness = const > 0$, $k_2 = \frac{ContactRate * AdoptionFraction}{N} = const > 0$.

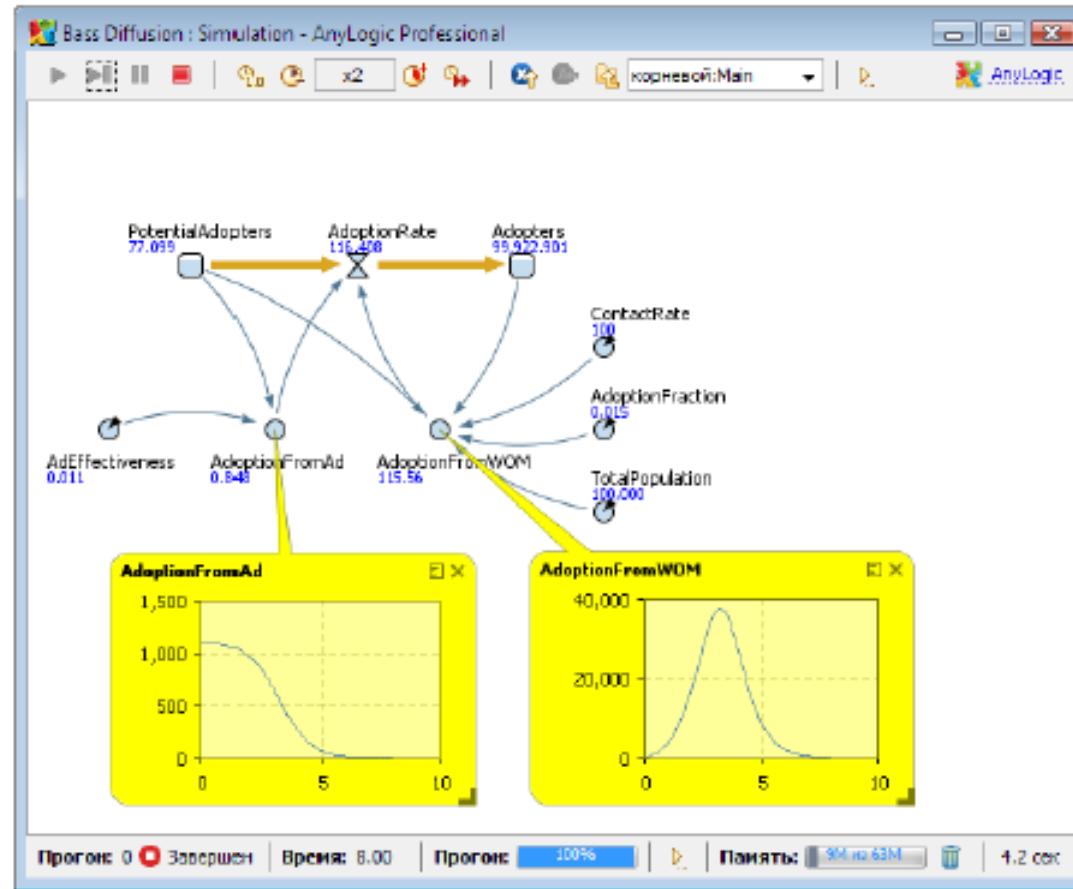
Потоковая диаграмма для модели Басса I

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



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

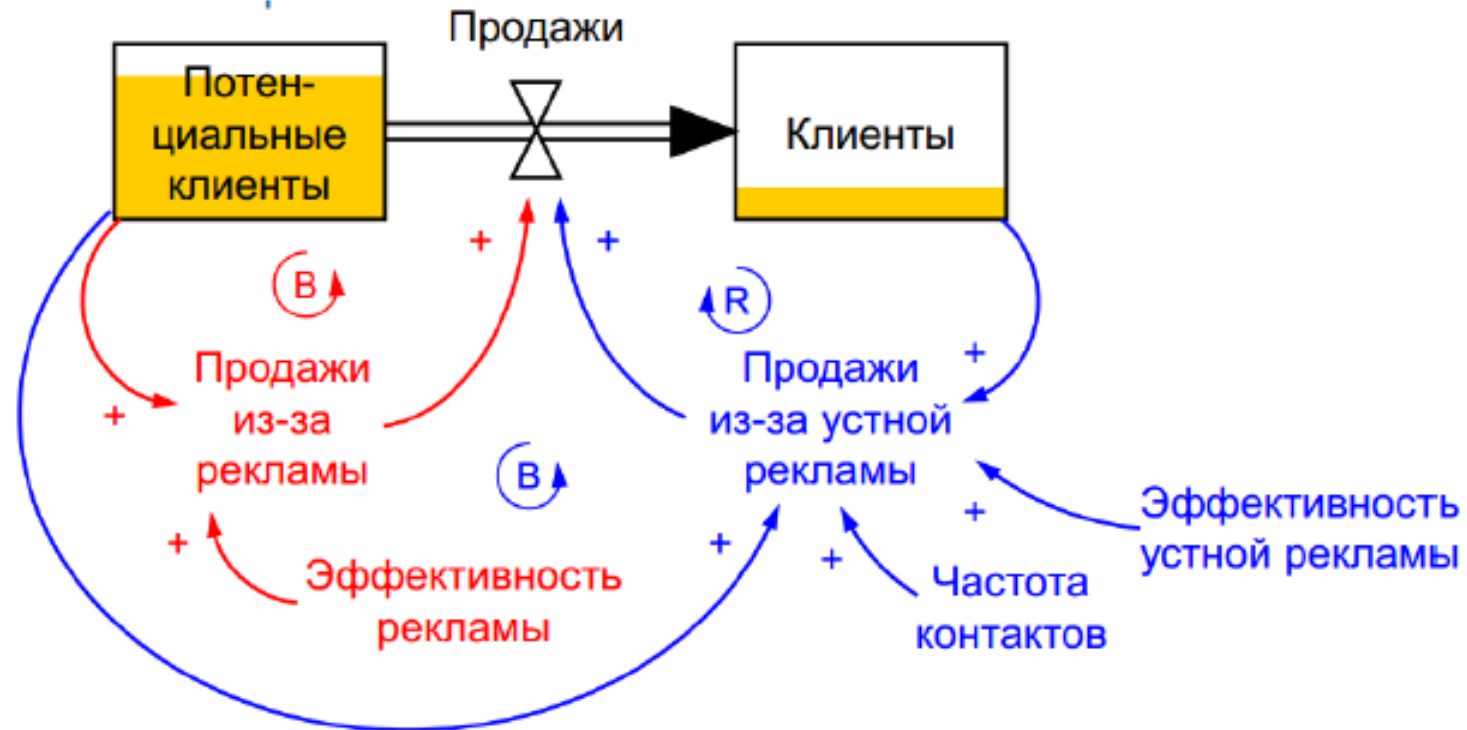


Рис. 3.3. Модель системной динамики

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

Потоковая диаграмма для модели Басса IV

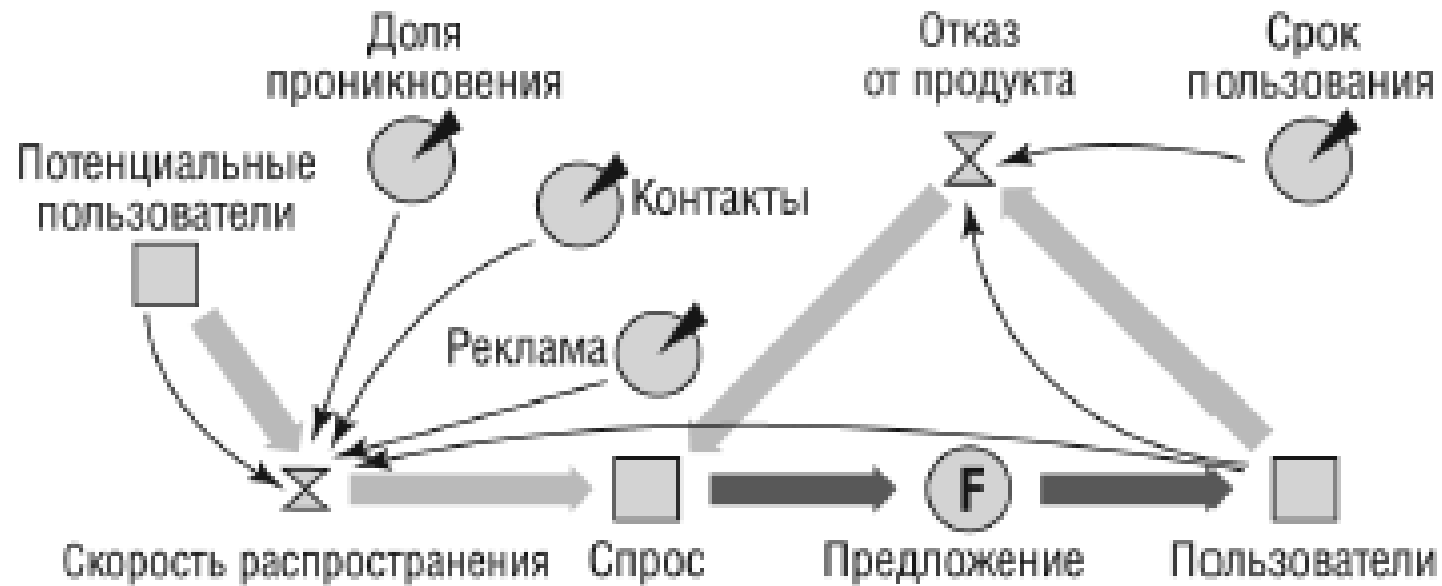


Рис. 2. Пример системно-динамической диаграммы
«Проникновение продукта на рынке»

Сидоренко, Красносельский, Бизнес-информатика, 2009