

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра дифференциальных уравнений и системного анализа**

**АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНОЙ  
СТЕПЕНИ ФОРМАЛИЗАЦИИ**

Курсовая работа

Пашкевич Анжелины Дмитриевны

студента 2 курса, специальность 1-31 03 09 Компьютерная математика

и системный анализ

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук,

доцент О. А. Лаврова

Минск, 2014

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	3
<b>ГЛАВА 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ</b>	5
<b>1.1 Введение в агентное моделирование</b>	5
<b>1.2 Классификации социоэкономических систем по возможности их математического описания и анализа.</b>	6
1.2.1 Системы описываются с помощью математических моделей и полностью анализируются аналитически и/или численно	6
1.2.2 Системы описываются с помощью математических моделей, но частично анализируются аналитически и/или численно	7
1.2.3 Системы, которые не описываются с помощью математических моделей	9
<b>ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИННОВАЦИЙ</b>	10
<b>2.1 Математическая модель распространения инноваций</b>	10
<b>2.2 Реализация агентной модели Басса</b>	11
<b>2.3 Результаты моделирования</b>	15
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	18
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	19

## **ВВЕДЕНИЕ**

Системный анализ — это методология решения крупных проблем, основанная на концепции систем. Системный анализ может также рассматриваться как методология построения организаций, что реализует методологию решения проблем [8].

Главный рабочий инструмент системного анализа — модель. Под моделированием понимается имитирование поведения какой-либо существующей системы, т.е. упрощенное схематическое или математическое воспроизведение принципов ее организации и функционирования. Построенная модель становится средством, обеспечивающим разработку качественных решений на основных этапах управления системой.

В данной курсовой работе рассказывается о таком направлении как агентное моделирование. В литературе по системному анализу можно найти множество различных определений агентного моделирования. С точки зрения практического применения агентное моделирование можно определить как метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как это поведение определяет поведение всей системы в целом. При разработке агентной модели, вводятся параметры агентов (люди, компании, активы, проекты, транспортные средства, города, животные и т.д.), определяется их поведение, они помещаются в некую окружающую среду, устанавливаются возможные связи, после чего запускается моделирование. Индивидуальное поведение каждого агента образует глобальное поведение моделируемой системы.

Курсовая работа носит исследовательский характер. Целью работы является применение агентного подхода для исследования социально-экономических процессов, которые описываются с помощью математических моделей. Агентное моделирование — относительно новый метод моделирования. Поначалу оно являлось преимущественно предметом теоретических дискуссий в академических кругах, а начиная с 2000-х годов разработчики имитационных моделей стали использовать его на практике.

Основными задачами являются не только разобраться с методом моделирования и глубже изучить системы, которые сложно описать

традиционными методами моделирования, но и предложить альтернативный взгляд на поведение некоторых систем.

# ГЛАВА 1

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1.1 Введение в агентное моделирование

Агентное моделирование – метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом. Под агентом в агентном моделировании понимается элемент модели, который может иметь поведение, память (историю), контакты и т.д. и может моделировать людей, компании, проекты, автомобили, города, животных, корабли, товары и т.д. Агентное моделирование зародилось в 1990-х гг. В стенах Университета Карнеги-Меллон.

Сегодня это, пожалуй, наиболее передовой метод имитационного моделирования, который используется учеными и исследователями в области экономики и управления, позволяющий смоделировать обстановку практически неограниченной сложности. Агентное моделирование позволяет сделать историческую науку экспериментальной и вводить в нее сослагательное наклонение, которое порой может дать богатую пищу для размышлений современному поколению[3].

Агентное моделирование является инструментом, при помощи которого возможно успешное моделирование сложных адаптивных систем. Оно позволяет моделировать неагрегированные элементы системы и базируется на идее моделирования процессов «снизу вверх»: в основе модели лежит набор основных элементов, из взаимодействия которых рождается обобщенное поведение системы.

Возможности агентного моделирования:

- Оптимизация сети поставщиков и планирование перевозок;
- Планирование развития производства;
- Прогнозирование спроса на продукцию и объемы продаж;
- Оптимизация численности персонала;
- Прогнозирование развития социально-экономических систем (городов, регионов);
- Моделирование миграционных процессов;
- Имитация и оптимизация пешеходного движения;
- Моделирование транспортных систем;

- Прогнозирование экологического состояния окружающей среды и т.д.

## **1.2 Классификации социоэкономических систем по возможности их математического описания и анализа.**

На данный момент представлены много причин для использования вычислений на основе агентов в социальных науках. Утверждается, что существует три различных применения методов моделирования агентов. Одно из таких применений — самое простое — концептуально близкое к традиционному моделированию в исследованиях операций. Это использование возникает, когда формулируются уравнения, которые полностью описывают социальный процесс, и эти уравнения явно разрешимы либо аналитически, либо численно. Второе, более обычное использование моделей вычислительных агентов возникает, когда математические модели могут быть записаны, но не могут быть полностью решены. В этом случае модель на основе агентов может пролить свет на структуру решения, проиллюстрировать динамические свойства модели, служить для проверки зависимости результатов от параметров и допущений. А также существуют важные классы задач, в которых процессы не описываются с помощью математических моделей. В таких обстоятельствах систематически использование вычислительных модели, основанных на агентах, может быть единственным способом систематически исследовать такие процессы и представлять собой третье использование таких моделей[1].

1.2.1 Системы описываются с помощью математических моделей и полностью анализируются аналитически и/или численно

Здесь описывается простое, возможно, даже тривиальное, применение вычислений на основе моделирования.

Допустим, что изучаются некоторые социальные процессы и что можно записать одно или несколько математических отношений, которые полностью бы описывали процесс. Кроме того, представим, что в результате модель может быть решена явно либо символически, либо численно. Какова роль для вычислений на основе агентов происходит в случае, когда модель социального процесса может быть решена явно? Здесь, казалось бы, нет никакой роли для вычисления агентов, поскольку решение полностью определено. Однако поскольку вывод моделей

агентов, как правило, визуальный, такие модели могут быть очень эффективными при отображении формальных результатов из математических моделей. Такое использование агентов особенно важно для демонстрации технических результатов для лиц, определяющих политику, и лиц, принимающих решения в области бизнеса.

Как пример в курсовой работе будет рассматриваться классическая модель распространения инноваций Басса. Модель описывает процесс распространения продукта. Изначально продукт никому не известен, и для того, чтобы люди начали его приобретать, он рекламируется. В итоге определенная доля людей приобретает продукт под воздействием рекламы. Также люди приобретают продукт в результате общения с теми, кто этот продукт уже приобрел [4, с. 101].

Далее можно усложнить модель: учитывать повторные продажи продукта, время доставки продукта, отказ от покупки товара в течение времени доставки, время влияния рекламы.

1.2.2 Системы описываются с помощью математических моделей, но частично анализируются аналитически и/или численно

Здесь теория дает математические отношения, возможно, даже уравнения, но они не могут быть прямо разрешимы или, возможно, нет подходящей концепции решения. Или может быть, что равновесная конфигурация может быть выяснена. Существует множество способов, в которых формальные модели не поддаются полному анализу. Действительно, по-видимому, только в ограничительных обстоятельствах у человека всегда есть модель, которая полностью разрешима, а все важные значения для нее можно получить исключительно из аналитических приложений.

В таких обстоятельствах принято прибегать к числовым экземплярам символической модели, чтобы получить дополнительное понимание. Кроме того, как правило, можно построить вычислительные модели на основе агентов, чтобы получить представление о функционировании модели. Теперь, если вычислительная модель на основе агентов является всего лишь экземпляром математической модели, мы вернемся к агентам как симуляция, описанным в предыдущем разделе. Однако в процессе формализации теории в математику часто бывает одно или несколько предположений для упрощения; вводятся представительные агенты или предполагается, что единый ценовой вектор будет получен во всей

экономике, или предпочтения считаются фиксированными, или структура выплат является точно симметричной или предполагается, что общеизвестные знания существуют и т. д. Крайне желательно вводить такие предположения, поскольку они нереалистичны и их влияние на результаты неизвестно априори, но это целесообразно [1].

В курсовой работе качестве примера будет рассматриваться модель жизненного цикла организации.

Каждому агенту модели характерно изменение усилия в производстве с течением времени. Аналитически показано, что существуют уровни равновесия Нэша в любой группе для количества усилий и оно динамически неустойчиво при достаточно большом размере группы. В многоагентной перспективе успешными фирмами являются те, которые могут привлекать и удерживать эффективных работников, причем картина сильно отличается от традиционной, где усилия направлены на максимизацию развития фирм.

Устойчивых равновесных конфигураций фирм в этой модели не существует. Скорее, агенты постоянно приспосабливаются к социальным обстоятельствам, в которых они оказываются и периодически перескакивают с одной фирмы на другую, или создают новую фирму. Успешными являются те фирмы, которые могут предоставлять условия для агентов, которым важен доход.

Модель дает достаточно полную картину эволюции простых фирм, имеющих небольшую внутреннюю организацию. В модели существует четко определенный жизненный цикл фирмы, который имеет определенное качественное сходство с реальными жизненными циклами фирмы. Фирмы, как правило, основаны агентами, которые предпочитают доход на досуге, а затем, с течением времени, действуют агенты с относительно большим преимуществом досуга. Количество свободных гонщиков со временем растет в типичной фирме, что приводит к размыванию долей агента, выходу наиболее продуктивных агентов в фирме и краху общей продукции фирмы. Время жизни фирмы экспоненциально распределено.

Доходные агенты обычно работают в крупных фирмах [6].

### 1.2.3 Системы, которые не описываются с помощью математических моделей

Когда модель социального процесса совершенно неразрешима, либо явно, либо доказуемо, то, казалось бы, мало надежды на прогресс с чисто символическими манипуляциями.

Например, хорошо известно, что не существует замкнутых форм решений некоторых относительно простых дифференциальных уравнений в терминах элементарных функций. Когда проблема неразрешима таким образом, она не имеет ничего общего с ее сложностью. Но есть также случаи, когда численное решение представляется практически неразрешимым не в смысле невозможности, а оно просто бесполезно. Это происходит, когда управляющие уравнения нелинейны. Когда такие обстоятельства возникают в вычислительной физике, модели частиц иногда могут быть полезными[1].

Примером таких систем является система связанных автоматов. Система состоит из нескольких автоматов, каждый из которых определяется конечным числом состояний. При определенных свойствах глобального правила управления нельзя предсказать состояние системы в момент времени  $T$  за полиномиальное время. Единственное решение – построение компьютерной агентной модели для имитации поведения системы [8].

## ГЛАВА 2

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИННОВАЦИЙ

### 2.1 Математическая модель распространения инноваций

Математическая модель представлена задачей Коши для дифференциального уравнения первого порядка:

$$N'(t) = \left( p + \frac{q}{m} N(t) \right) (m - N(t)). \quad (1)$$

Где

- $N(t)$  – число людей, совершивших покупку;
- $N'(t)$  – число покупок в каждый момент времени;
- $m$  – Потенциальные клиенты;
- $p$  – Эффективность рекламы;
- $q$  – Внутреннее влияние.

Решение вышеуказанной задачи Коши имеет следующий вид:

1. Разделим обе части уравнения на

$$-mp + pN(t) - qN(t) + \frac{q}{m} N^2(t). \quad (2)$$

2. Получим:

$$-\frac{m \frac{d}{dt} N(t)}{m(mp - pN(t) + qN(t)) - qN^2(t)} = -1. \quad (3)$$

3. Домножаем обе части уравнения на  $dt$ :

$$-\frac{mdN}{m(mp - pN(t) + qN(t)) - qN^2(t)} = -dt. \quad (4)$$

4. Возьмем от обеих частей уравнения интегралы:

$$\int -\frac{mdN}{m(mp - pN(t) + qN(t)) - qN^2(t)} = \int -dt. \quad (5)$$

5. Получаем обыкновенное уравнение с неизвестной  $N$ , зависящей от  $t$ :

$$N(t) = mp \frac{e^{(p+q)t} - 1}{e^{(p+q)t} p + q}. \quad (6)$$

Зависимость числа покупок в каждый момент времени представляется в следующем виде:  $N'(t) = mp \frac{e^{(p+q)t}(p+q)^2}{(e^{(p+q)t}p+q)^2}$ .

В пакете Wolfram Mathematica было построено аналитическое решение:

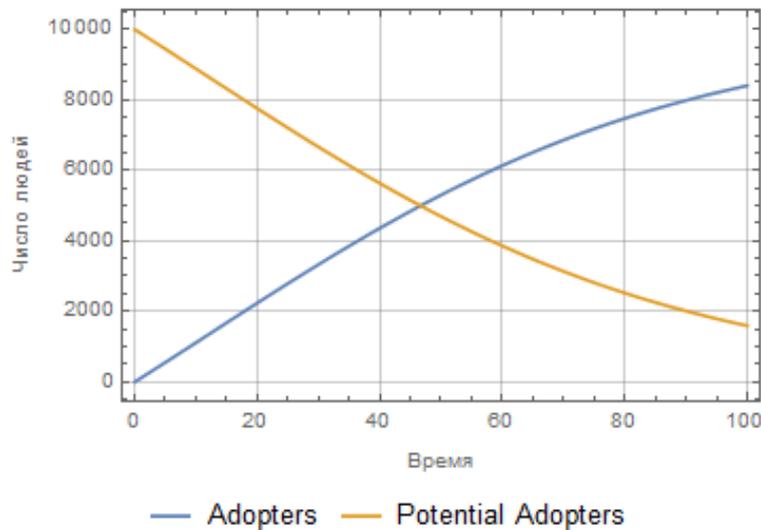


Рис. 2.1 Графики роста клиентов и потенциальных клиентов

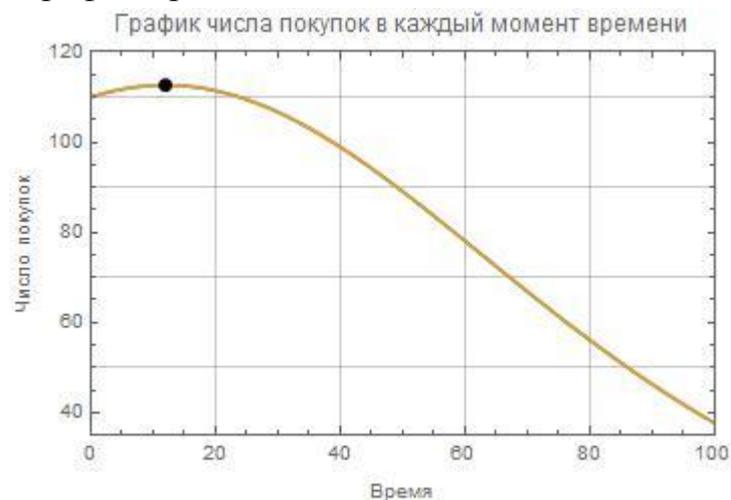


Рис. 2.2 Графики числа покупок

## 2.2 Реализация агентной модели Басса

Для реализации агентной модели Басса средствами AnyLogic было использовано дискретное пространство, упорядоченное расположение агентов. В процессе работы задавалась популяция с 10000 агентами и размерностью пространства 500×500 (Рис. 2.1).

**Consumer - Тип агента**

Действие на шаге:

Агент в диаграмме процесса  
 Движение  
 Пространство и сеть

В этом типе агента нет популяций других агентов

Выберите популяции агентов, которые Вы хотите поместить в данную среду:

Тип пространства:  Непрерывное  Дискретное  ГИС

Размерность пространства:

Ширина:   
 Высота:   
 Z-Высота:

Тип расположения:   Применить при запуске

Рис. 2.3 Задание типа пространства, размерности

Далее моделировался процесс приобретения нового продукта под влиянием рекламной кампании и “сарафанного радио”. Интенсивность рекламы и вероятность того, что продукт будет приобретен под ее влиянием, полагаются постоянными. Поэтому эффективность рекламы (определяет, какая доля людей купит продукт вследствие ее влияния) изначально задавалась константой.

Характеристики модели задавались с помощью параметров в классе *Person* (агенты задаются экземплярами именно этого класса). Подверженность человека влиянию рекламы *AdEffectiveness* задавалась параметром со значением 0.011. Также задавалось среднегодовое количество встреч человека *ContactRate*, равное 100 людям в год. Был добавлен еще один параметр *AdoptionFraction* (его значение 0.015.), задающий силу убеждения человека - долю общавшихся с владельцем продукта людей, которая приобретет этот продукт под влиянием общения.

Поведение агента описывалось визуально в классе этого агента с помощью диаграммы состояний. Изначально у агента состояние *PotentialUser* – потенциальный клиент, затем под влиянием рекламы и общения с потребителями агент может перейти в состояние *User* – клиент в момент приобретения продукта. Процесс приобретения продукта человеком моделирует переход, ведущий из верхнего состояния в нижнее.

Внутренний переход в состояние *User* моделирует общение человека со своим знакомым, в результате тот может быть убежден в покупке нового

продукта. Переход происходит с *заданной интенсивностью*, равной *ContactRate*. Вследствие этого перехода отправляется сообщение (`send("Buy!", RANDOM);`) другому агенту - модель “сарафанного радио”.

Еще один переход из состояния *PotentialUser* в состояние *User*. Этот переход моделирует процесс приобретения продукта под воздействием общения со знакомым. Не каждое обсуждение продукта со своим знакомым приведет к немедленному приобретению. Вероятность такого развития событий зависит от того, насколько данный потенциальный потребитель подвержен внушению, *AdoptionFraction*. Таким образом, свойств данного перехода задано правилом `randomTrue(AdoptionFraction)`. Значит, продукт приобретается с вероятностью, задаваемой параметром *AdoptionFraction*. Также в панели Свойств Агента в поле Действие при получении сообщения установлено правило `statechart.receiveMessage(msg)`. Теперь, когда агент получит сообщение от другого агента, он будет перенаправлять его в свою диаграмму состояний, где оно будет вызывать переход, моделирующий приобретение продукта под влиянием “сарафанного радио” (Рис. 2.2).

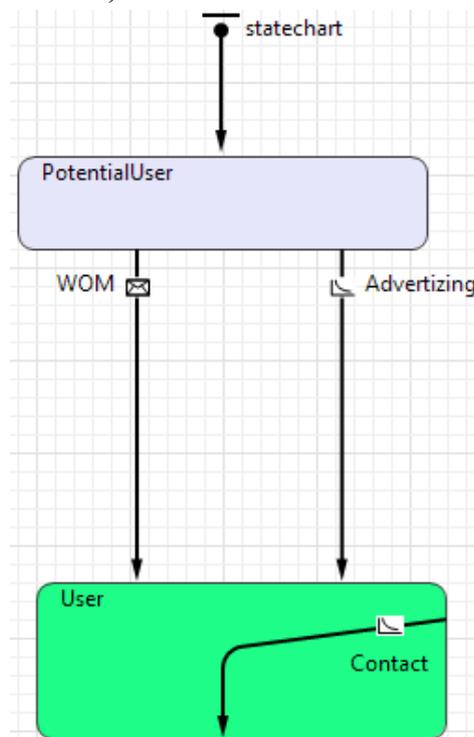


Рис. 2.4 Диаграмма состояний 1

Далее были смоделированы повторные покупки, полагая, что потребители продукта снова становятся потенциальными потребителями, когда продукт, который они приобрели, становится непригоден. Параметр *DiscardTime*, равный 1 году, определяет средний срок службы продукта.

Переход из состояния *User* в состояние *PotentialUser* срабатывает по прошествии срока службы продукта.

Модель была усовершенствована добавлением у потребителя еще одно состояния *WantsToBuy*, соответствующего времени, прошедшему с момента принятия решения о покупке продукта до момента доставки его клиенту. Однако если время доставки (параметр *MaxDeliveryTime*, равный 25 дням) превысит предельно допустимое время ожидания (параметр *MaxWaitingTime*, равный 7 дням), потребитель откажется от покупки. Переход из состояния *WantsToBuy* в состояние *User*, моделирующий доставку и, соответственно, покупку товара - *Purchase*.

Для задания времени ожидания (Рис. 2.3) выберем треугольное распределение вероятностей (недостаточно измерений для построения эмпирического распределения, но известны минимальное, максимальное и наиболее часто встречаемое значение).

**Purchase - Переход**

Имя:   Отображать имя  Исключить

Происходит:

Таймаут:

Действие:

Доп. условие:

Рис. 2.5 Свойства перехода *Purchase*

Переход *CantWait* из состояния *WantsToBuy* в состояние *PotentialUser* моделирует отказ от покупки товара ввиду его долгого отсутствия. Максимальное время ожидания задано с помощью треугольного распределения со средним значением *MaxWaitingTime* и отклонением от этого значения, равным 15 процентам (Рис. 2.4).

**CantWait - Переход**

Имя:   Отображать имя  Исключить

Происходит:

Таймаут:

Действие:

Доп. условие:

Рис. 2.6 Свойства перехода *CantWait*

Учтем в модели стратегию рекламной кампании: реклама имеет влияние *AdEffectiveness* лишь в течение того времени, пока она демонстрируется.

В таком случае у рекламы есть два состояния: *withAdvertizing* и *withoutAdvertizing*. Переход происходит по таймауте, например, спустя 3 месяца.

Диаграмма состояний приобрела следующий вид:

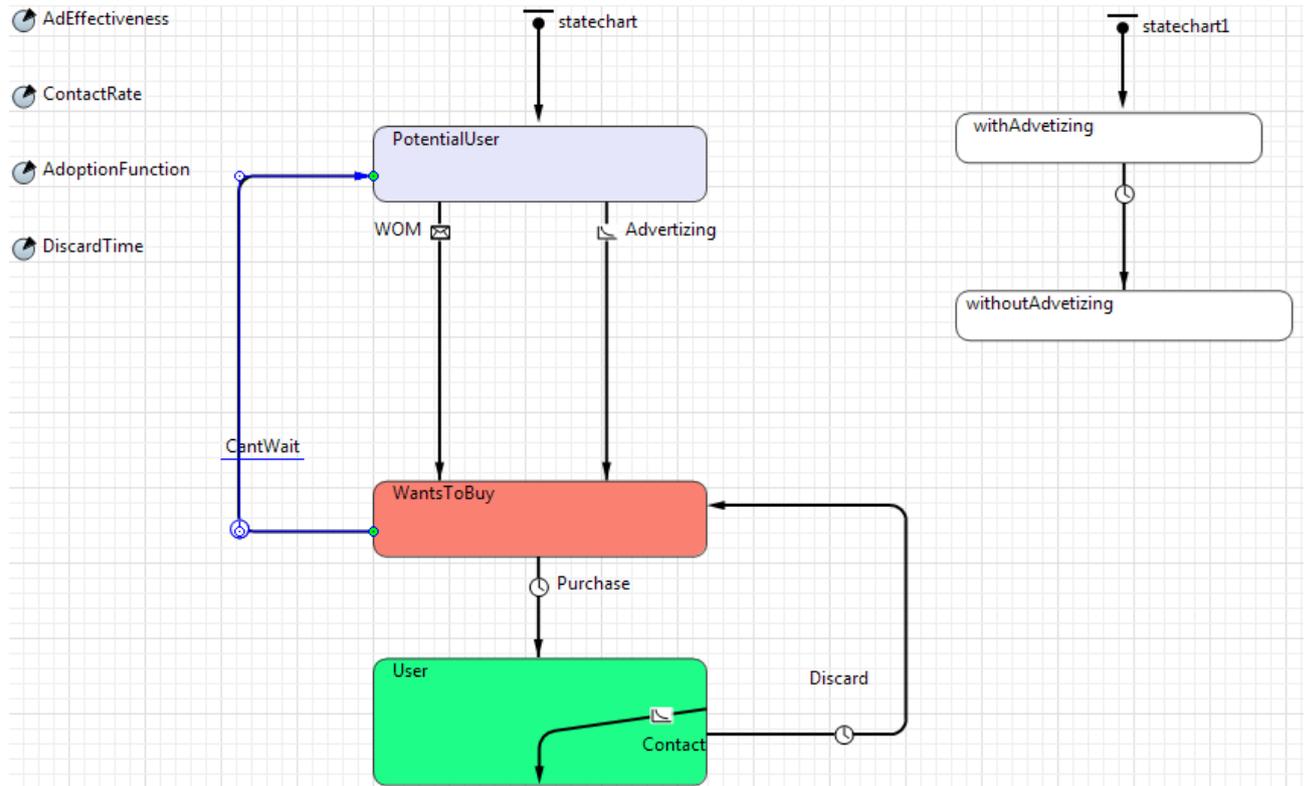


Рис. 2.7 Усложненная диаграмма состояний агентов

## 2.3 Результаты моделирования

### Графики изменения в популяции агентов

На первом графике представлены данные об изменении числа *PotentialUser* и *User* с течением времени, при значениях *MaxDeliveryTime* = 8 и *MaxWaitingTime* = 14.

На втором графике представлены данные о истории изменения числа *PotentialUser*, *User*, *WantsToBuy* в течение времени, при значениях *MaxDeliveryTime* = 8 и *MaxWaitingTime* = 14.

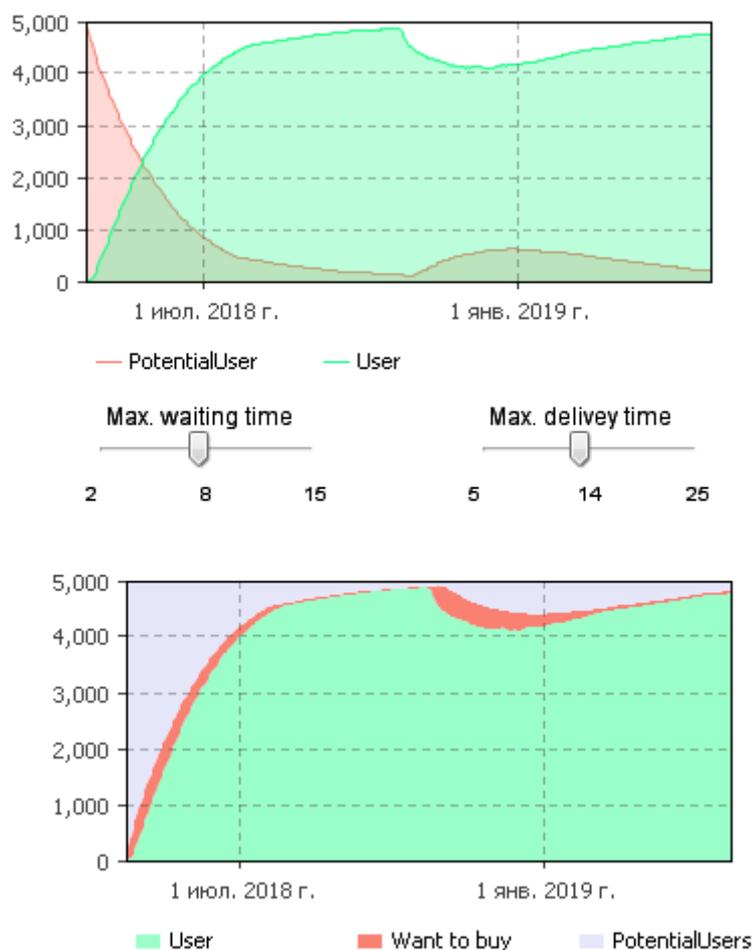


Рис. 2.8 Временной график и Временная диаграмма с накоплением изменения популяции агентов

С помощью диаграмм визуализированы данные, полученные в результате моделирования. Графики отличаются от графика роста клиентов аналитического решения (Рис. 2.1). График аналитического решения имеет S-образный рост. Графики результатов агентного моделирования изначально похожи, но начиная с определенного момента времени, отличаются, поскольку последней модели учтено большее параметров, влияющих на продажи.

### Популяция агентов

Ниже представлены данные о популяции агентов в конечный момент времени

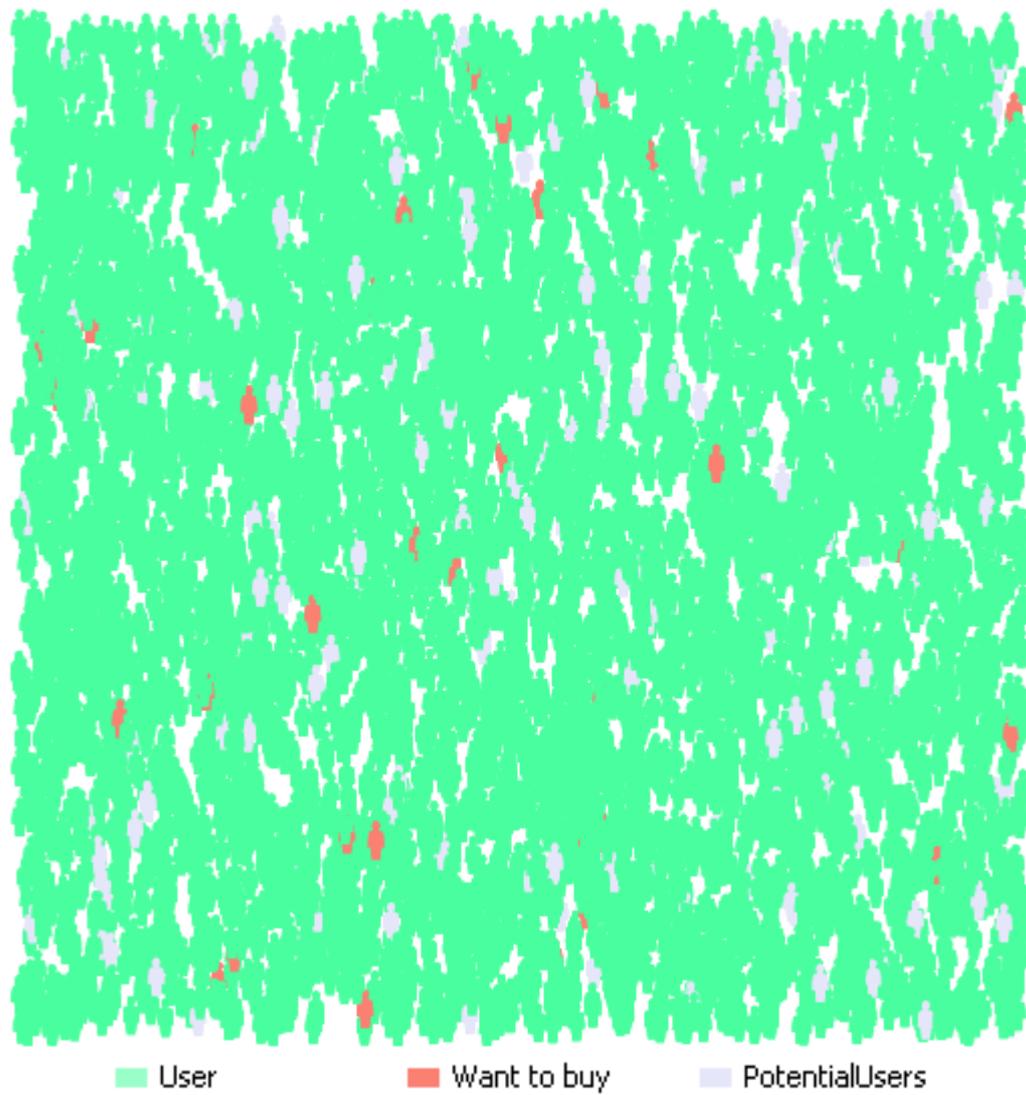


Рис. 2.9 Презентация модели – фигуры анимации агентов популяции

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе курсовой работы были сделаны следующие выводы. Во-первых, когда числовые вычисления являются уместными, агенты могут представлять вариант классического моделирования, однако предоставляют больше возможностей. Во-вторых, когда модель математически не полностью решена - ее равновесия неизвестны - модель на основе агентов может быть полезным инструментом анализа, моделирования процессов. В-третьих, когда математические модели либо нельзя построить, агентное моделирование - это, пожалуй, единственный метод, доступный для систематического анализа, возможность предсказать состояние системы в определенный момент времени.

В первой главе курсовой работы приводятся сведения о различных понятиях, таких как агентное моделирование, агент, состояние, переходы, диаграмма состояний. В главе описывается классификация социоэкономических систем и подходы к их решению. Данная глава состоит преимущественно из теоретических основ разрабатываемой темы.

Во второй главе содержится самостоятельный анализ темы, где описываются основные этапы реализации проекта, производится обработка и анализ результатов исследовательской работы. В данной главе приведена математическая модель распространения инноваций и аналитическое решение. Также модель Басса построена с помощью агентов с некоторыми усложнениями системы.

В результате курсового проекта и полученных знаний были достигнуты цели и задачи, которые были поставлены.

В перспективе хотелось бы усовершенствовать и реализовать в агентной модели некоторые расширения модели Басса распространения инноваций. Также представляет интерес изучение модели жизненного цикла организации, а также ее реализация с помощью агентов, каждому из которых характерно изменение усилия в производстве с течением времени.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Robert L. Axtell. Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences — The Brookings Institution, 1775 Massachusetts Ave. NW, Washington, DC 20036, 2000 — 23с.
2. Каталевский, Л.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие; 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 496 с.
3. AnyLogic – платформа для имитационного моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/>.
4. В.Н. Михайлов М-69 Имитационное моделирование: Учебно-методическое пособие. – Орел: Издательство ОФ РАНХиГС, 2015. – 164 с.
5. Андрей Борщёв. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. – ООО «Экс Джей Текнолоджис» XJ Technologies [www.xjtek.com](http://www.xjtek.com) и Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет Санкт-Петербург 194021 Россия – 26с.
6. Axtell, R. 1999. The Emergence of Firms in a Population of Agents. Working paper. The Brookings Institution.
7. Buss, S.R., C.H. Papadimitriou, and J.N. Tsitsiklis. 1991. On the Predictability of Coupled Automata: An Allegory about Chaos. *Complex Systems*, 5: 525-539.
8. С. Оптнер. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – Москва. Советское радио. 1969.