ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И КИБЕРНЕТИКИ

Кафедра программных систем

А.В. Баландин

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ В ANYLOGIC

Контролируемая самостоятельная работа

Самара

2026

Практические основы компьютерного моделирования систем в AnyLogic: Метод. указания по выполнению контролируемой самостоятельной работы / Самар. ун-т; *А.В. Баландин*. Самара, 2026. 21 с.

В методическом указании представлено задание для практического освоения обучающимися базовых инструментальных средств разработки моделей систем и их исследования в программной среде моделирования AnyLogic. В задании описаны объект и предмет моделирования, сформулированы цель и этапы моделирования, а также контролируемые преподавателем результаты выполнения работы.

Методические указания предназначены обучающимся в качестве руководства по выполнению контролируемой самостоятельной работы по дисциплине «Моделирование информационных процессов и систем».

ОГЛОВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **4**

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ МОДЕЛИРОВАНИЯ **5**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА 5

ОБОБЩЁННАЯ МОДЕЛЬ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА 6

Параметры и отношения между параметрами *6*

Модель времени *8*

Интерпретация отношений между параметрами *9*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ **10**

Эксперименты с моделью *14*

Создание эксперимента 14

Запуск эксперимента 16

Презентация хода эксперимента 18

Остановка эксперимента 19

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ **20**

Введение

При подготовке к практическому занятию по выполнению контролируемой самостоятельной работы (КСР) в системе AnyLogic обучающемуся предварительно необходимо:

- Скачать бесплатную для обучения версию системы моделирования AnyLogic[1] и установить на персональный компьютер.
- Самостоятельно изучить учебное пособие по теоретическим основам моделирования систем в AnyLogic[2].

При выполнении КСР необходимо:

1. Ознакомится со структурой справочной системы AnyLogic.
2. Научиться использовать средства навигации справочной системы AnyLogic для получения оперативной информации по использованию инструментальных средств при разработке проекта модели.
3. Изучить пользовательский интерфейс для управления созданием проекта модели и проведения экспериментов: набор панелей (вкладок) на рабочей области экрана и окно графического редактора.
4. Освоить создание, сохранение и открытие проекта модели в AnyLogic.
5. Изучить состав конструктивных графических элементов панели **Палитра**, используемых для создания моделей в виде графических диаграмм.
6. Освоить работу с графическим редактором для построения моделей.
7. Освоить работу в проекте модели с окном **Свойства** для управления свойствами элементов модели.

---

[1] https://www.anylogic.ru/downloads/#select-ple

[2] **Баландин А.В. Баландин А.В. Основы компьютерного моделирования систем в AnyLogic**. Учебное пособие - Самар. ун-т. Самара, 2026. 21 с.

8. Освоить создание, настройку параметров и проведение «простых» экспериментов с моделью.
9. Освоить модели времени и режимы управления модельным временем в процессе выполнения эксперимента («прогона» модели) в AnyLogic.
10. Изучить конструктивный элемент Событие, и использовать его в модели для автоматического завершения прогона эксперимента.

Объект и предмет моделирования

Моделирование движения пружинного маятника

Объект моделирования представляет собой физическую систему, состоящую из груза, прикреплённого к свободному концу закреплённой пружины, двигающегося в жидкой среде по горизонтальной поверхности (Рисунок 1).

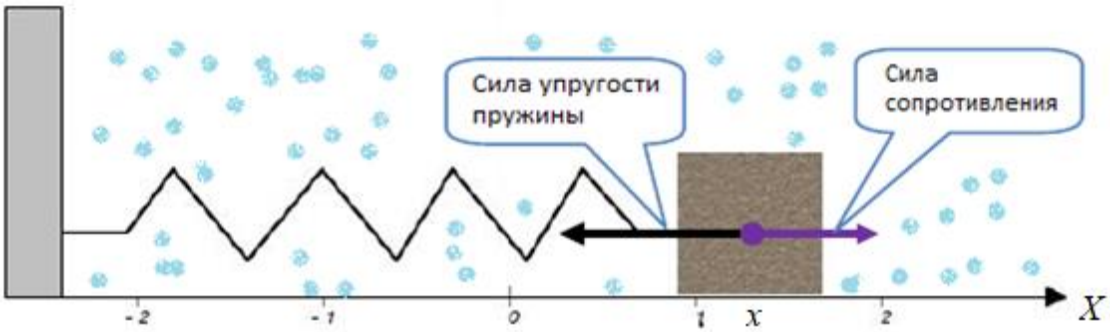

Рисунок 1 Положение движущегося пружинного маятника

К грузу в состоянии начального покоя приложены две противоположные уравновешивающие друг друга горизонтальные силы: *сила растяжения* и *сила упругости* растянутой пружины. Для простоты моделирования полагаем, что сила тяжести груза равна выталкивающей силе жидкости, и груз не оказывает давления на горизонтальную поверхность. Влияние формы груза на силу сопротивления жидкости в процессе его движения выразим через соответствующий коэффициент сопротивления жидкости k.

Предметом моделирования является колебательное движение груза на горизонтальной поверхности в жидкой среде, к которому в исходном состоянии

покоя была приложена заданная сила растяжения пружины. Если, находящийся в состоянии исходного покоя, груз отпустить (убрать силу растяжения), он начнёт горизонтальное возвратно-поступательное движение за счёт силы упругости сокращающейся/сжимающейся пружины. При этом мгновенно возникает сила сопротивления движению груза в жидкости. За счёт попеременного сжатия и растяжения пружины движение груза будет колебательным относительно точки покоя, в которой груз находился до момента приложения к нему силы растяжения пружины. Примем эту точку за начало координат горизонтальной оси x=0.

В жидкости колебательный процесс должен протекать с затуханием, так как энергия пружины будет тратиться на работу по преодолению силы сопротивления жидкости, вектор силы которой будет периодически менять направление на противоположное вектору скорости движения груза.

Целью моделирования является исследование изменения горизонтального положения груза во времени (фазовая траектория), после прекращения действия силы тяги.

Обобщённая модель пружинного маятника

Обобщённая схема моделирования является формальным методом моделирования, устанавливающий порядок спецификации параметров предмета моделирования, а также установления отношений между ними в наиболее общем виде. Так как предмет моделирования является физической системой, то проинтерпретируем представленную семантическую (описательную) модель пружинного маятника в жидкой среде в терминах физики. Груз далее будем называть физическим *телом* заданной массы, а предмет моделирования –*системой*.

Параметры и отношения между параметрами

Проанализируем предмет моделирования в соответствии с целью моделирования и специфицируем множество параметров моделируемой системы - P:

- m – масса тела;
- c – коэффициент жёсткости пружины;
- k – коэффициент сопротивления жидкости;
- x - смещение тела от начала координат;
- x_0 – исходное смещение тела от начала координат (точка начала координат - x=0) в момент прекращения действия силы тяги.
- $\vec{F}$ – вектор силы тяги;
- $\vec{F}_{\text{упр}}$ – вектор силы упругости пружины;
- $\vec{F}_{\text{с}}$ – сила сопротивления жидкости;
- $\vec{v}$ – вектор скорости горизонтального движения тела;
- t – параметр времени.

Из физических представлений ясно, что все параметры детерминированные, ряд параметров системы изменяются во времени, т.е. система является *детерминированной* и *динамической*. Все параметры принимают значения в стандартных физических единицах измерения на непрерывных множествах, т.е. являются *непрерывными*.

Параметр x_0 является независимым (*экзогенным*) и *управляемым* параметром - *входное воздействие*. Величина параметра x_0 ограничена размерами пружины и принимает значения на конечном непрерывном множестве вещественных чисел: $x_0 \in [x_{min}, x_{max}]$.

Параметр $x(t) \in [x_{min}, x_{max}]$ – положение колеблющегося тела в текущий момент времени, является *эндогенным динамическим* параметром - *выходная характеристика* моделируемой системы. Смещение $x = 0$ – точка начала координат, в которой на тело не действует сила упругости пружины - $\vec{F}_{\text{упр}} = 0$.

Параметр c - коэффициент жёсткости пружины, является вещественной константой, *экзогенный внутренний неуправляемый* параметр, характеризующий жёсткость пружины.

Параметр k – коэффициент сопротивления жидкости движению груза (определяемый для заданной формы груза вязкостью жидкости) является вещественной константой - *экзогенный неуправляемый* параметр как фактор *внешней среды*.

Параметр $\vec{F}(x_0)$ - сила тяги, *эндогенный статический* параметр, зависящий от параметра $x_0 = x(0)$ – фактор *внешней среды*, действующий в момент времени $t = 0$.

Параметр $\vec{F}_{\text{упр}}(x)$ – сила упругости пружины, *эндогенный динамический* параметр, зависящий от смещения $x(t)$ - *выходная характеристика* моделируемой системы, $\vec{F}_{\text{упр}}(0) = 0$.

Модули векторов силы упругости пружины и силы тяги будут принимать значения на одном и том же конечном непрерывном множестве вещественных чисел: $F_{\text{упр}}(x), F(x_0) \in [F(x_{min}), F(x_{max})]$, $\vec{F}_{\text{упр}}(x_0) = -\vec{F}(x_0)$.

Параметр $\vec{v}(x)$ – вектор мгновенной скорости в точке x - *выходная характеристика* моделируемой системы, *эндогенный динамический* параметр-вектор, модуль которого принимающий значения на конечном непрерывном множестве вещественных чисел $[0, v_{max}]$. Верхняя конечная граница v_{max} изменения значения модуля вектора скорости априори не известна.

Все параметры, зависящие от x, являются динамическими опосредованно.

Параметр $t = time()$ модель времени.

Модель времени

Анализ поведения пружинного маятника во времени позволяет сделать вывод, что в качестве модели времени $time()$, формирующей значение параметра времени t, естественно принять модель непрерывного времени - $M_T(t_0,\delta t)$, где t_0=0.

Интерпретация отношений между параметрами

Построенная обобщённая модель пружинного маятника является непрерывно-детерминированной моделью. Поэтому интерпретацию отношений между параметрами будем осуществлять в формате *D*-схемы. Для этого будем использовать известные физические законы движения объёмного тела заданной массы в жидкой среде под действием приложенных сил в непрерывном времени. Эти законы в общем случае выражаются дифференциальными или, в частности, алгебраическими уравнениями.

Мгновенный вектор переменной силы $\vec{\Phi}(t)$, действующей на тело в момент времени *t*, когда сила тяги отсутствует ($\vec{F} = 0$), определяется суперпозицией векторов силы упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}(t)$ и силы сопротивления жидкости $\vec{F}_{\text{с}}(t)$:

$$\vec{\Phi}(t) = m\frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \vec{F}_{\text{упр}}(t) + \vec{F}_{\text{с}}(t)\ ,$$

Так как все вектора параллельны горизонтальной оси *X*, а силы действуют в противоположных направлениях, то переходя к проекциям сил на ось *X*, уравнение примет вид:

$$m\frac{dv(t)}{dt} = F_{\text{упр}} - F_{\text{с}}.$$

Сила упругости пружины пропорциональна величине сжатия (растяжения) пружины, т.е. величине смещения $x(t)$ относительно точки $x = 0$, и действует в направлении противоположном смещению (т.е. имеют разные знаки). Следовательно, сила упругости будет равна:

$$F_{\text{упр}} = -c \cdot x(t).$$

Полагаем, что при малых скоростях для заданной формы груза сила сопротивления жидкости пропорциональна скорости движения тела $v(t)$, и равна:

$$F_{\text{с}} = k \cdot v(t).$$

Так как движение тела является переменным, то в произвольный момент времени t мгновенная скорость его движения в точке $x(t)$ задаётся дифференциальным уравнением вида:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}.$$

Состояние системы во времени в фазовом пространстве $X \times V$ будет представляться парой - $\left(x(t), v(t)\right) \in X \times V$. В итоге, фазовая траектория движения точки центра масс груза $\left(x(t), v(t)\right)$ в фазовом пространстве будет выражать отношения между параметрами предмета моделирования S - $\{x, v, t\}$ в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\dfrac{dv(t)}{dt} = -c \cdot x(t) - k \cdot v(t), \\ \dfrac{dx(t)}{dt} = v(t). \end{cases}$$

Значение начальной фазовой координаты при t=0 (момент прекращения действия силы тяги) равно:

$$\begin{cases} x(0) = x_0, \\ v(0) = 0. \end{cases}$$

В итоге математическая модель пружинного маятника выразилась в форме системы простых дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями.

Исследование модели

Для изучения поведения пружинного маятника во времени не сложно получить аналитическое решение построенной системы дифференциальных уравнений в и затем исследовать полученные функциональные зависимости фазовых координат точки центра масс груза от времени. В данной работе необходимо получить численное решение полученной математической модели в AnyLogic. Для этого в системе AnyLogic необходимо создать проект модели (например, с именем

"Пружинный маятник") и полученную систему дифференциальных уравнений представить средствами графического редактора для моделирования динамических систем и системной динамики в виде диаграммы. Затем осуществить с полученной в AnyLogic графической моделью вычислительные эксперименты ("прогоны"), наблюдая на экране в процессе прогона презентацию фазовой траектории точки центра масс груза во времени.

При построении диаграммы динамический параметр модели, задаваемый дифференциальным уравнением, представляются в окне графического редактора в виде элемента типа Накопитель. Поэтому для включения в модель двух динамических параметров $v(t)$ и $x(t)$ следует размесить в окне графического редактора модели два элемента типа Накопитель, перетащив их из палитры Системная динамика (Рисунок 2), и задать в их свойствах дифференциальные уравнения, соответствующие параметрам $v(t)$ и $x(t)$.

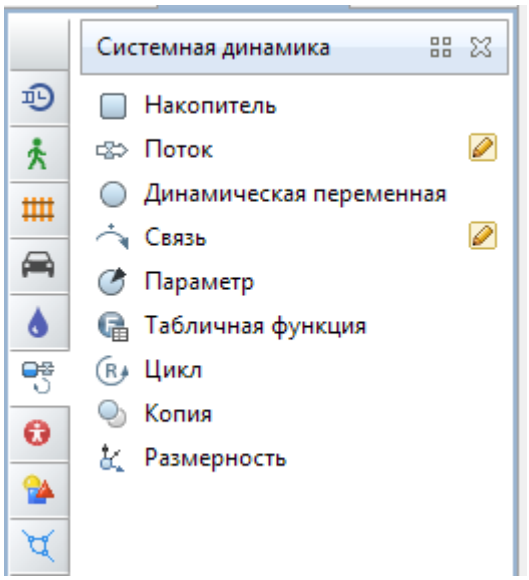

Рисунок 2 Палитра элементов системной динамики

Переименуем один из накопителей в xt, и установим ему **Свойства**: Режим задания уравнения: Произвольный. Сформируем в поле для дифференциального уравнения формулу: $\frac{dxt}{dt} = Vt$. Установим начальное значение смещения xt (начальное отклонение от нулевого значения) равным 10 (Рисунок 3).

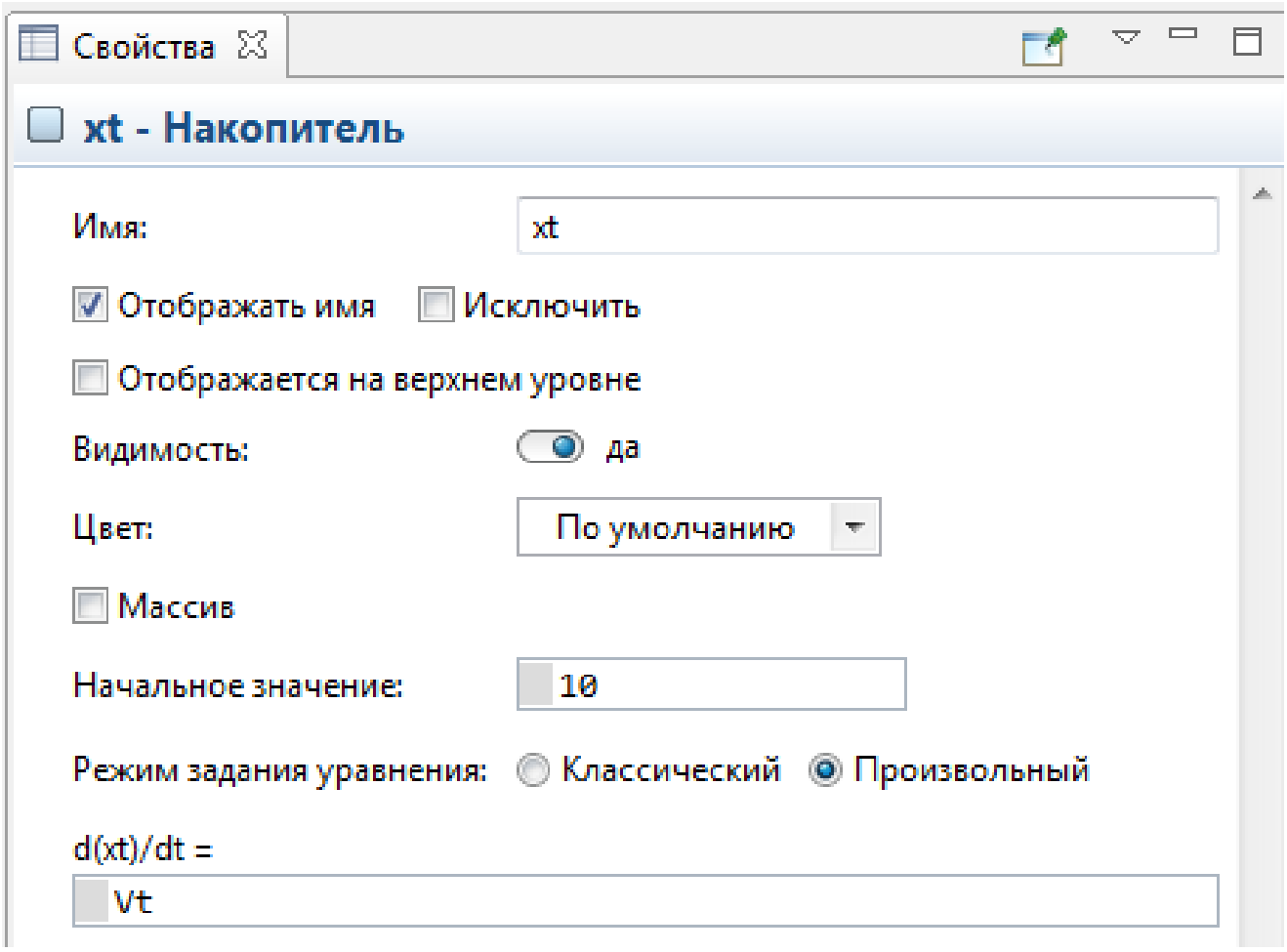

Рисунок 3 Панель свойств накопителя xt

Повторим действия предыдущего шага для второго накопителя – Vt (Рисунок 4).

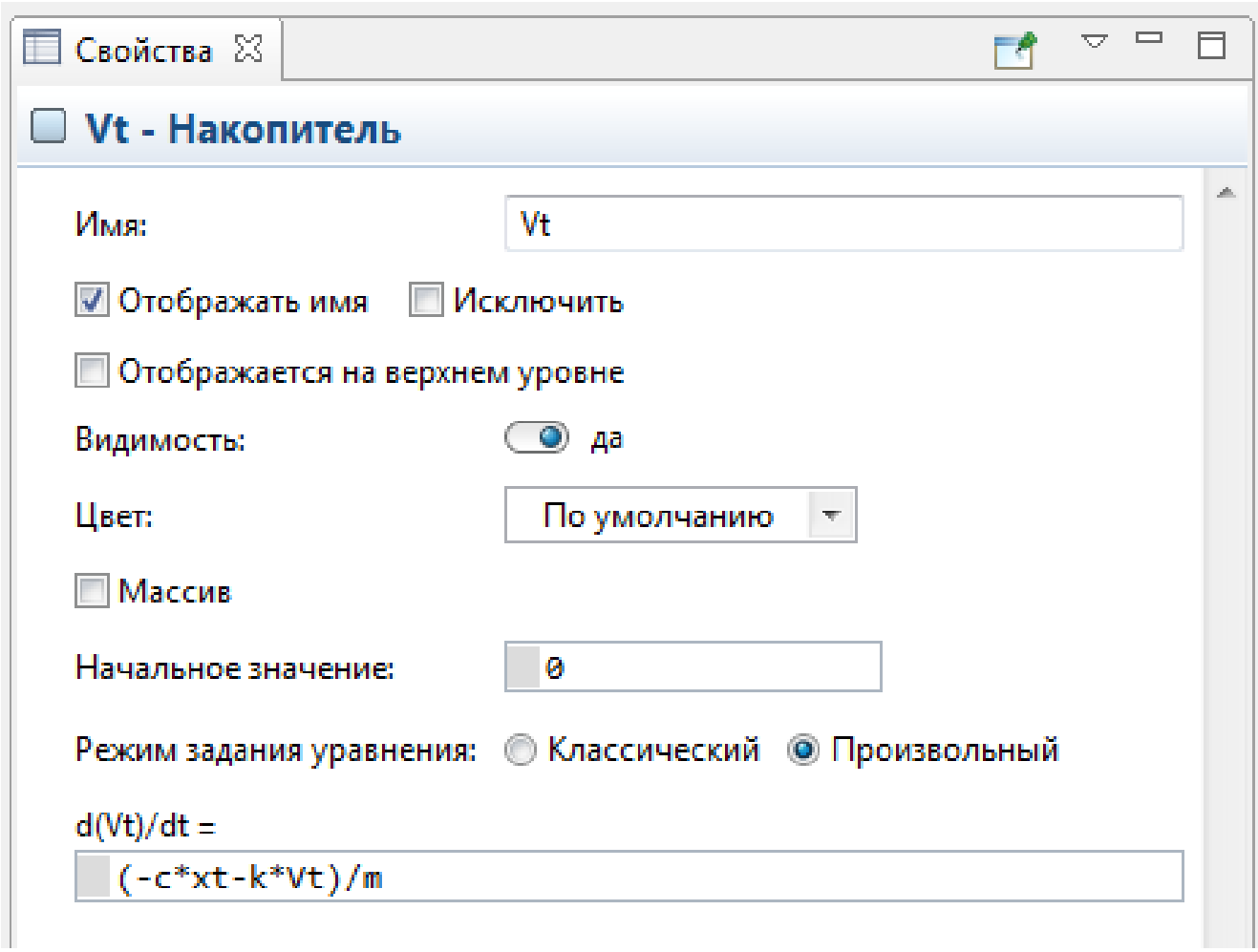

Рисунок 4 Панель свойств накопителя Vt

Откроем палитру Агент и введём в диаграмму два атрибута типа Параметр - Параметр для задания жёсткости пружины – c, и коэффициента сопротивления жидкости – k, а также атрибут типа Переменная Переменная для задания массы тела - m. Заданные в их окнах свойств начальные значения по умолчанию (равные нулю) изменим: для c – на 10, для k – на 10, и начальное значение m – на 100. Установим между атрибутами и накопителем требуемые связи, используя элемент Связь палитры Системная динамика. При установлении связи могут возникать сообщения об ошибках. Необходимо устранить причины ошибок, следуя подсказкам системы по их устранению в окне свойств связи. В итоге диаграмма с накопителями, задающими динамические параметры в форме дифференциальных уравнений, в графической форме примет вид (Рисунок 5).

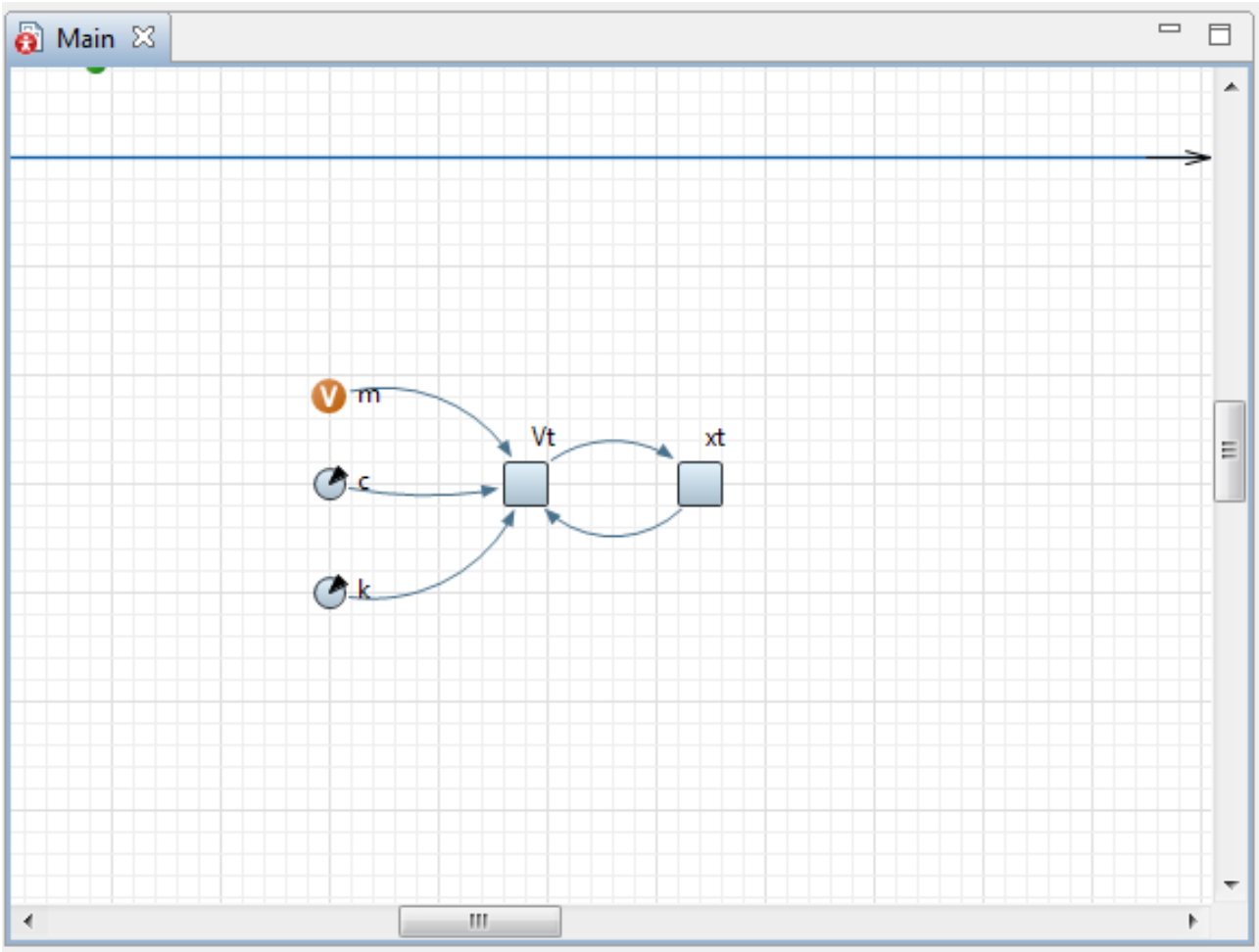

Рисунок 5 Итоговая диаграмма модели

Эксперименты с моделью

Создание эксперимента

В AnyLogic эксперименты с построенной в виде диаграммы агента моделью пружины заключаются в вычислении параметров модели для последовательно изменяющихся моментов модельного времени. При этом для вычисления значений параметров для каждого момента времени модель непрерывного времени - $M_{\mathcal{T}}(t_0,\delta t)$, заменяется в AnyLogic либо моделью дискретного монотонного времени (*реальное относительное время*) с заданным тиком Δt - $M_{\mathcal{T}}(t_0,\Delta t)$, либо моделью дискретного спорадического времени (*виртуальное относительное время*) - $M_{\mathcal{T}}(t_0, \not\cong)$, с неопределённым тиком $\not\cong$.

Для численного экспериментирования с моделью пружины в виде агентной диаграммы необходимо построить (сгенерировать) соответствующий ей программный код. Кроме того, для определения типа и настройки параметров эксперимента необходимо в проекте создать особый объект - «эксперимент». В одном проекте, можно создать необходимый набор различных экспериментов с разными агентами проекта. Для этого используется меню Файл (Рисунок 6).

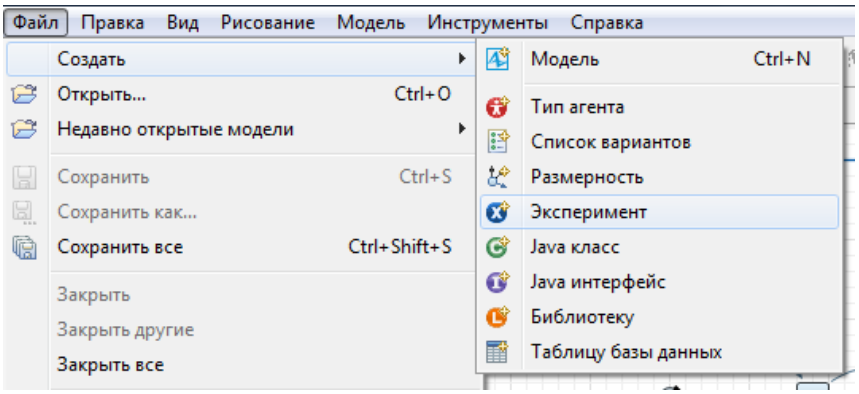

Рисунок 6 Определение эксперимента с моделью

По умолчанию при создании проекта модели в нём автоматически для агента main по умолчанию автоматически определяется один эксперимент типа «Простой эксперимент» с именем Simulation. Простой эксперимент заключается в том, что в процессе его выполнения для каждого сменяющегося момента модельного времени все параметры модели вычисляются заданным для них в модели образом. Эксперимент с моделью завершается либо по заданному в свойствах эксперимента моменту времени, либо по событию, вызвавшему функцию завершения модели.

Эксперимент как объект характеризуется набором настраиваемых свойств, унаследованных от агентной диаграммы. В качестве наследуемых экспериментом свойств выступают атрибуты диаграммы типа Параметр и заданные атрибуты модели времени (Рисунок 7). Запуская очередной прогон эти атрибуты эксперимента можно изменять, не изменяя их значения в диаграмме. Заметим, что атрибут типа Переменная, эксперимент не наследует.

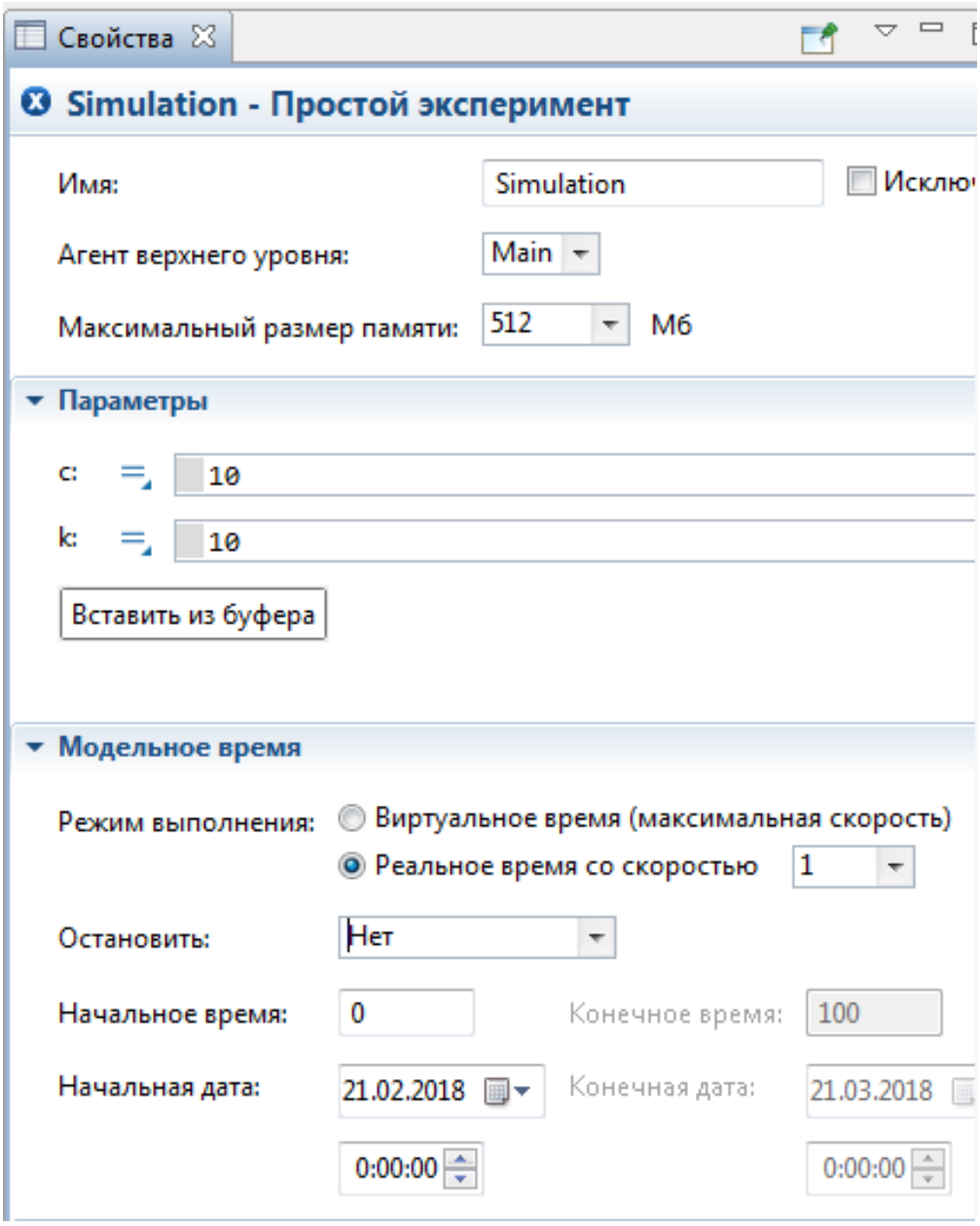

Рисунок 7 Настройка параметров эксперимента

Запуск эксперимента

Так как количество созданных в проекте экспериментов в общем случае более одного, то при запуске необходимый эксперимент следует выбрать из списка экспериментов (Рисунок 8).

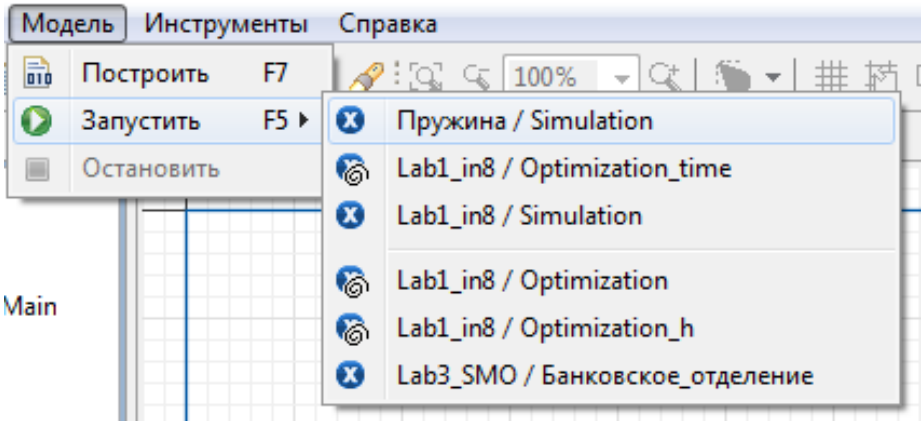

Рисунок 8 Меню выбора запускаемого эксперимента

В результате открывается окно управления прогоном эксперимента (Рисунок 9).

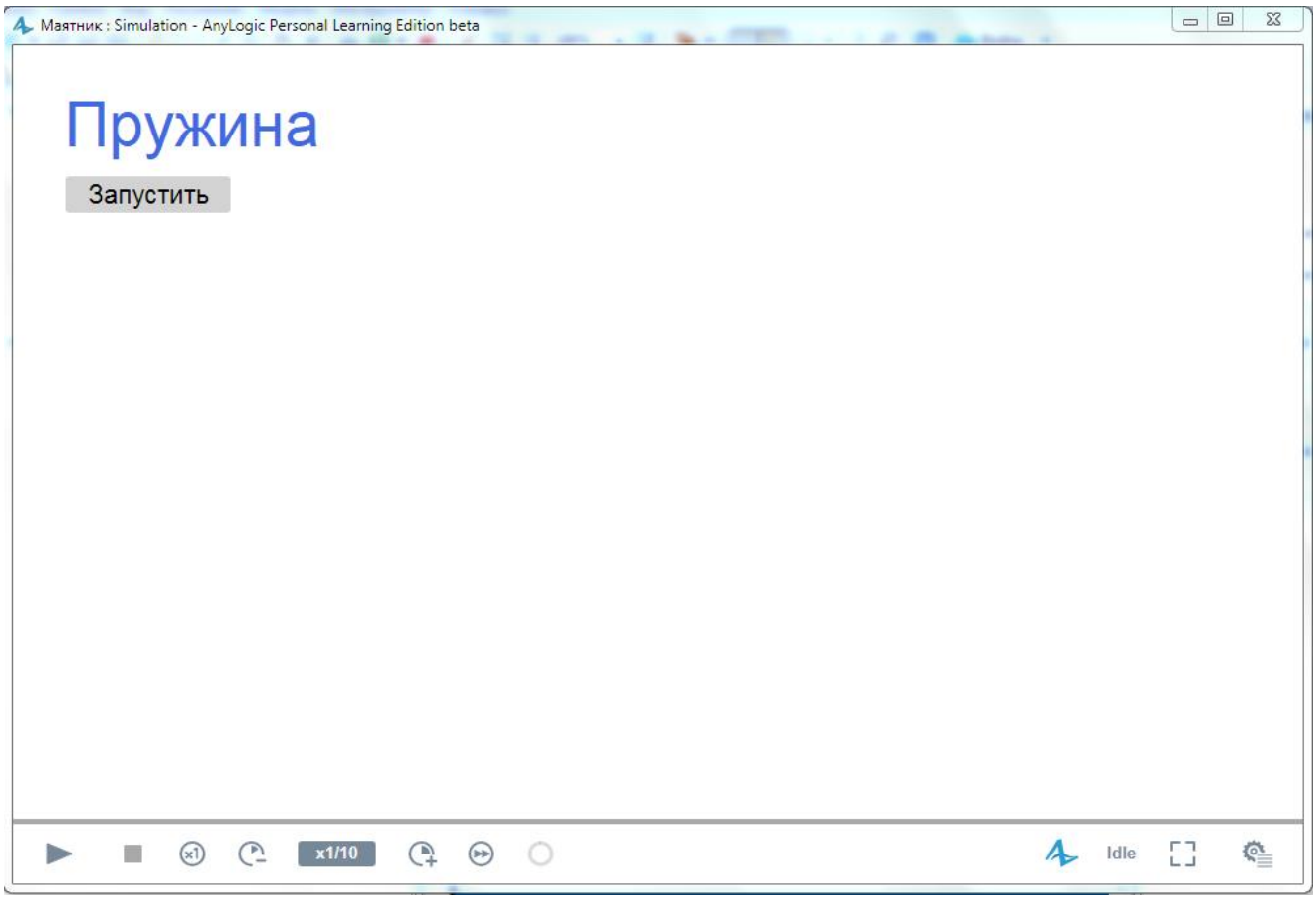

Рисунок 9 Окно управления прогоном эксперимента

В нижней части окна располагаются кнопки управления экспериментом. Запуск эксперимента осуществляется нажатием кнопки ▶.

Презентация хода эксперимента

Хода эксперимента выражается в визуализации изменения атрибутов графической диаграммы модели в процессе выполнения эксперимента, называемой презентацией. Окно презентации диаграммы модели открывается сразу после запуска эксперимента. В окне презентации в процессе прогона визуализируются изменения значений атрибутов во времени. Для более выразительного отображения динамики изменения значений атрибутов модели для них в презентации можно открывать окно-«*инспект*», например для накопителей (Рисунок 10). Окно инспекта открывается двойным щелчком мыши по значку атрибута на диаграмме. Инспект позволяет выбрать форму отображения значения атрибута параметра в числовом или графическом виде. С помощью мыши окно инспекта можно перемещать и растягивать (изменять размеры). Кнопка позволяет (при необходимости) корректировать текущее числовое значение параметра. Щелчок по кнопке с «графиком» переводит инспект в режим показа графика изменения параметра во времени.

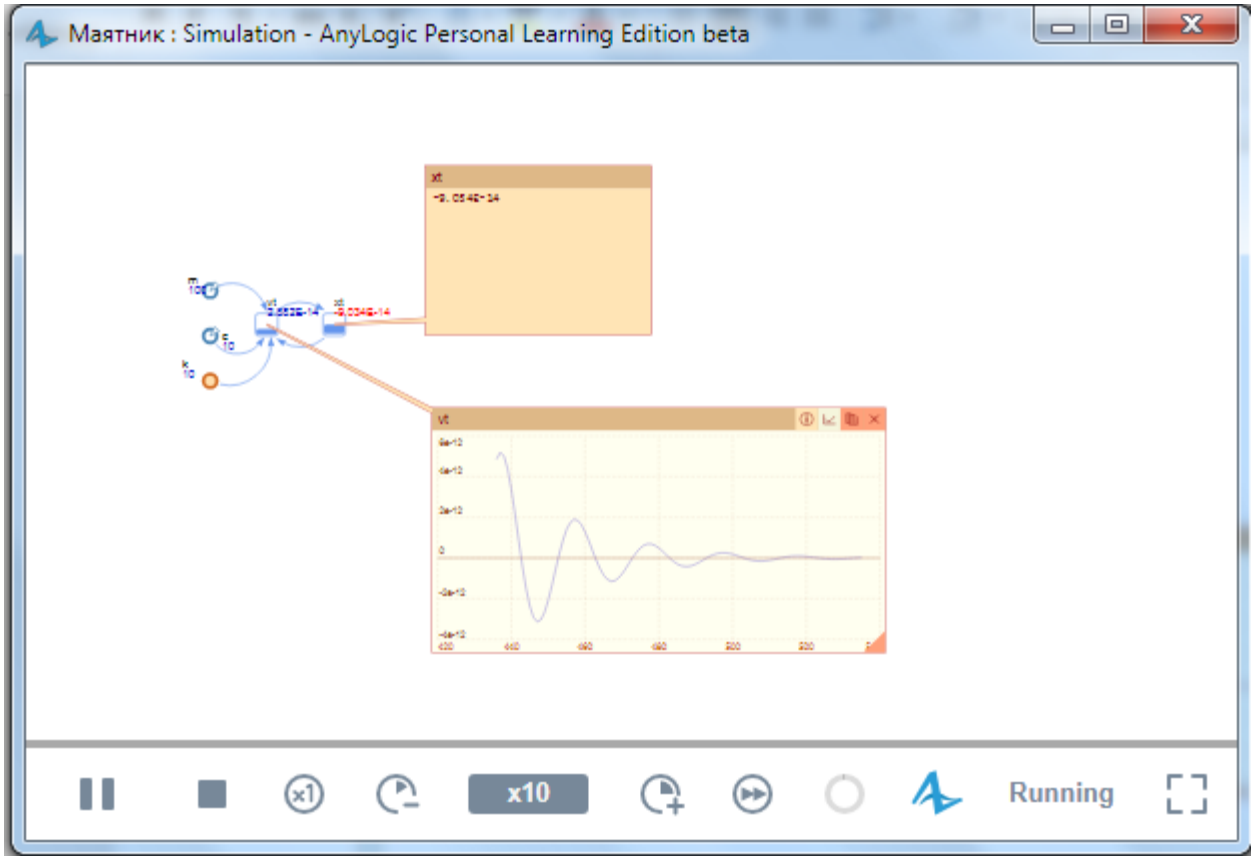

Рисунок 10 Презентации модели с открытыми «инспектами»

Остановка эксперимента

Запущенный на выполнение эксперимент можно временно остановить, нажав в нижней части окна эксперимента кнопку ❚❚, а затем продолжить, нажав кнопку ▶. Эксперимент можно вручную прервать и завершить, нажав кнопку ■. Однако эксперимент может завершится и автоматически, если в каком-то из элементов модели запуститься программный фрагмент, в котором выполниться функция finishSimulation(). Например, в модель можно добавить в диаграмму из панели Агент элемент Событие. Этот элемент позволяет задать условие над параметрами модели, при выполнении которого будет выполнено включённое в него запланированное программное действие. В качестве такого действия для завершения эксперимента можно выполнить функцию finishSimulation().

В данной модели эксперимент целесообразно автоматически остановить, когда груз практически перестанет колебаться. То есть, в крайнем положении смещения и

модуль скорости, и модуль смещения груза маятника с заданной точностью близки к 0. Формально это выражается в виде предиката ($|Vt| \approx 0$ & $|xt| \approx 0$) – колебания практически затухли. Для реализации в модели условия остановки эксперимента в диаграмму надо добавить элемент Событие, например с именем стоп, с заданным в свойствах условием остановки и действием завершения эксперимента (Рисунок 11).

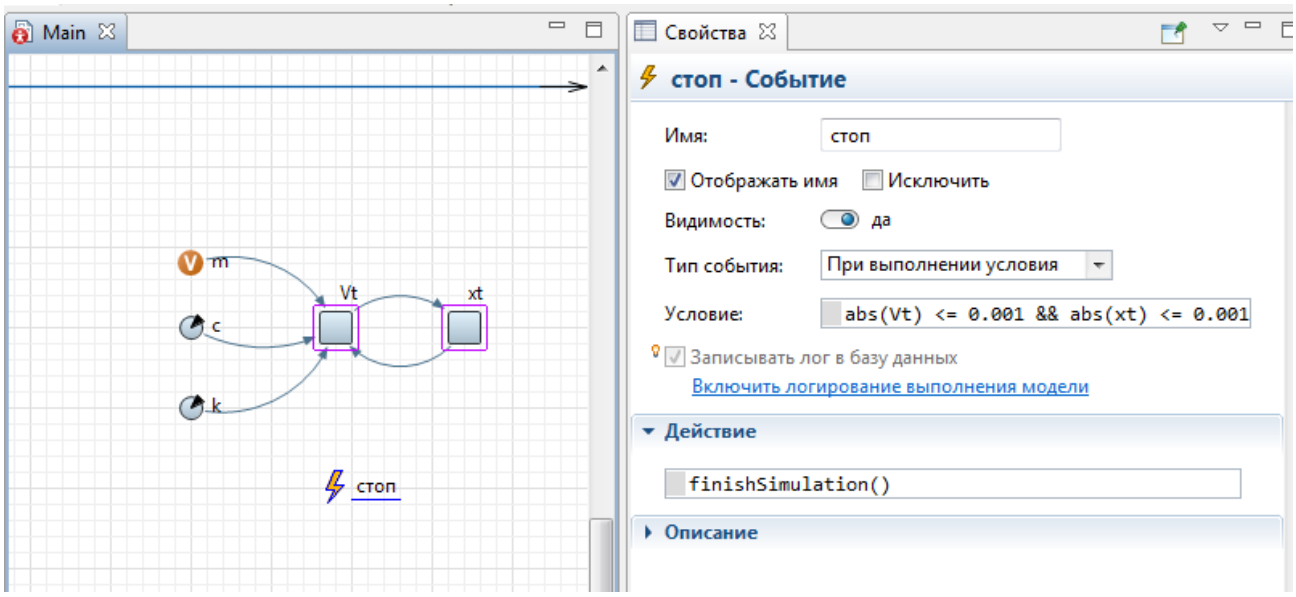

Рисунок 11 Остановка эксперимента по событию

Контролируемые результаты

КСР считается выполненной, если:

1. Система моделирования AnyLogic установлена на компьютер.
2. Изучена структура и средства навигации справочной системы AnyLogic.
3. Изучен пользовательский интерфейс для создания и управления проектом и проведения экспериментов с моделью: набор панелей (вкладок) на рабочей области экрана, окно графического редактора, окно управления экспериментом.
4. Изучен состав тематических конструктивных элементов панели **Палитра** (группы **Агент** и **Системная динамика**) и их использование при построении графической диаграммы модели.

5. Освоена работа с графическим редактором для построения моделей.
6. Освоена работа с окном **Свойства** для управления свойствами элементов диаграммы модели.
7. Освоены создание, настройка параметров и проведение «простых» экспериментов с моделью.
8. Освоена работа с моделями времени, настройка модели времени и управление модельным временем в процессе выполнения эксперимента («прогона» модели).
9. Изучен и использован в диаграмме модели элемент Событие для автоматического завершения прогона эксперимента.