

БИОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ПОИСКОВОГО ПОВЕДЕНИЯ*

© 2008 г. **В. А. Непомнящих, Е. Е. Попов, В. Г. Редько**

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок, Ярославской обл, НИИ

Системных исследований РАН, Москва

Поступила в редакцию 17.06.07 г.

Охарактеризовано направление исследований "Адаптивное поведение", которое рассматривается как бионический подход к разработке систем искусственного интеллекта. Одна из актуальных задач в рамках этого подхода – моделирование поискового поведения животных. Представлена общая схема поискового адаптивного поведения с инерционным переключением между поисковыми тактиками. Изучена конкретная модель поискового поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц. Показана адекватность модели биологическим экспериментальным данным, которая характеризуется как своей спецификой, отражающей память личинок о размерах последних обработанных частиц, так и общими свойствами инерционного переключения.

Введение. Направление исследований "Адаптивное поведение". Основной подход этого направления, активно развивающегося за рубежом с начала 1990-х годов [1,2], – изучение искусственных (в виде компьютерной программы или робота) организмов, которые называются аниматами (от англ. animal + robot = animat), способных приспосабливаться к внешней среде. Поведение аниматов имитирует поведение животных, при этом строятся именно такие модели, которые применимы к описанию поведения *как реального животного, так и искусственного анимата* [3,4]. Хотя официально "Адаптивное поведение" было провозглашено в 1990 г., существовали явные провозвестники этого направления, например, в нашей стране еще в 1960-70-х гг. подобные исследования вели М.Л. Цетлин, М.М. Бонгард, Д.А. Поспелов [5-7].

В исследованиях адаптивного поведения используется ряд нетривиальных компьютерных методов [2]: нейронные сети, генетический алгоритм [8-10], классифицирующие системы (Classifier Systems) [11], обучение с подкреплением (Reinforcement Learning) [12].

В настоящее время эти работы идут по следующим темам [13]: сенсорные системы и управление, обучение и адаптация, выбор действий, навигация и внутренние модели мира, антиципаторное адаптивное поведение, нейроэволюция (настройка нейронных сетей аниматов эволюционными методами), возникновение языка и коммуникаций при адаптивном поведении, коллективное и социальное поведение, биологически инспирированное поведение роботов, поведение и мышление как сложные адаптивные системы.

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН "Интеллектуальные компьютерные системы" (проект 2-45) и РФФИ (проект № 07-01-00180).

Отечественные разработки в области моделирования адаптивного поведения ведутся скромными усилиями ученых-энтузиастов [14-19].

1. Поисковое поведение аниматов. Одно из актуальных направлений исследований в рамках анимат-подхода – имитация поискового поведения животных. Проиллюстрируем подходы к этому моделированию на примере [20,21].

В [20] изучались механизмы ориентации самцов тутового шелкопряда в струе феромона самки. Самец воспринимает запах с помощью рецепторов, расположенных на симметричных антеннах. Казалось бы, что самцу нужно двигаться к самке прямо по градиенту феромона. Но, как показали биологические эксперименты и компьютерное моделирование [20], такая стратегия не соответствует реальному поведению бабочек. Ориентация самцов включает в себя не только движение в сторону наибольшего раздражения, но и спонтанные, независимые от раздражения зигзаги при движении в струе запаха, а также петли, описываемые самцами, которые вышли за пределы струи. Поиск источника запаха включает в себя две чередующиеся тактики: 1) движение в выбранном направлении, приближенно соответствующем градиенту феромона, 2) устойчивое повторение поворотов, приводящее к выбору нового направления движения. При этом переход от одной тактики к другой характеризуется определенной инерционностью, которая позволяет животным не обращать внимания на мелкие изменения ситуации и использовать наиболее общие закономерности переменной внешней среды.

Такое применение тактик и инерционное переключение между тактиками характерны для многих организмов [19]. Например, в [21] исследовалось поведение червей нематод *Caenorhabditis elegans*, которое продемонстрировало, что в процессе хемотаксиса нематоды так же, как и бабочки, чередуют две тактики: 1) движение в определенном направлении и 2) повторение резких поворотов (пируэтов), приводящее к выбору нового направления движения. Переходы между этими тактиками инерционны.

Инерционность в переключении между тактиками поведения, позволяющая использовать наиболее общие закономерности в изменениях ситуаций, должна быть полезна и для искусственных автономных адаптивных систем. Например, инерционность вполне естественна при переходе от одной цели поведения к другой, что соответствует хорошо известному принципу доминанты [22]. Поэтому изучение принципов инерционного переключения между тактиками поведения интересно и важно как с точки зрения понимания принципов организации адаптивного поведения в живых организмах, так и в целях применения этих принципов в искусственных автономных системах.

В настоящей работе излагаются результаты исследования поискового поведения на примере личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* – насекомых, обитающих на дне водоемов.

Личинки носят на себе "домик" – трубку из песка и других частиц, которые скрепляются между собой по краям с помощью клейкой белковой нити. Строительство требует меньше времени, усилий и белка, если личинки используют относительно крупные и плоские частицы: при одинаковых размерах домика общая протяженность швов между составляющими его немногими крупными частицами оказывается меньше, чем в том случае, когда домик сооружается из большого числа мелких частиц. Однако для поиска крупных частиц на дне водоема затрачиваются время и энергия, не известные ручейнику заранее. Задача осложняется еще и тем, что личинки при этом не пользуются зрением и могут обнаружить частицу и определить её размер только на ощупь, что требует дополнительных затрат времени. В этой ситуации личинки ведут себя примерно следующим образом [23]. Они передвигаются по дну до тех пор, пока не найдут и не прикрепят к домику крупную частицу. После этого они остаются на месте и ощупывают одну за другой соседние частицы. Если несколько частиц подряд оказываются мелкими, ручейники прекращают ощупывание и снова начинают передвигаться по дну, пока не найдут новую крупную частицу, после чего цикл повторяется. В целом это выглядит вполне адаптивно: в естественных водоемах частицы разного размера имеют тенденцию скапливаться на разных участках дна. Поведение личинок приводит к тому, что готовый домик состоит в основном из крупных частиц. Данный цикл можно представить как чередование двух тактик: 1) сбор и прикрепление частиц на одном и том же участке и 2) поиск нового участка с подходящими частицами. Переключение между тактиками имеет инерционный характер.

В [23] была построена математическая модель подобного поведения личинок ручейников, основанная на предположении, что степень готовности R к прикреплению очередной частицы i зависит от готовности, соответствовавшей предыдущей частице $i-1$, а также от относительного различия в размерах q этих частиц

$$R_i = aR_{i-1} \exp [b(q_i - q_{i-1}) / q_{i-1}], \quad (1.1)$$

где a и b – положительные параметры. Личинка прикрепляет частицу i , если готовность R превышает определенную величину, равную размеру той частицы, которая была прикреплена к домику последней (даже если прикрепление имело место задолго до обнаружения частицы i). В противном случае личинка тратит на ощупывание частицы тем меньше времени, чем ниже готовность, а затем отбрасывает ее. Если же готовность оказывается ниже некоторого порога, то ручейник прекращает ощупывание частиц и начинает передвигаться, причем продолжительность передвижения тем больше, чем ниже готовность. При соответствующем выборе параметров эта модель количественно воспроизводит выбор действий ручейниками, включая преимущественный (но не исключительный) выбор крупных частиц, предпочтение участков с крупными частицами и изменения длительности ощупывания частиц. Однако модель

в [23] описывает только действия ручейников, но не динамику поведения во времени. Кроме того, помимо анализа поведения личинок ручейников целесообразно сопоставить конкретную модель с более общими представлениями о закономерностях поискового поведения аниматов.

Настоящая работа посвящена как построению и исследованию модели поискового поведения личинок ручейников с учетом временных характеристик, так и сопоставлению этой конкретной модели с общей схемой поискового поведения. При этом особое внимание обращается на те свойства поискового адаптивного поведения, которые могут быть достаточно универсальными и специфичными как для других животных, так и для искусственных автономных адаптивных систем.

2. Общая схема поискового поведения с двумя тактиками. Следуя работе [24], изложим общую модель поискового поведения, которая включает в себя механизм переключения двух тактик поведения: А) двигаться в выбранном направлении (консервативная тактика), Б) изменить направление движения случайным образом (поисковая стохастическая тактика). Модель рассматривается для простого случая поиска максимума функции двух переменных. Подчеркнем, что здесь не предлагается новый метод оптимизации, а решение задачи максимизации биологически инспирировано и учитывает важную роль мотивации при переключении тактик поведения. Предположения модели состоят в следующем

1. Рассматривается анимат, который может двигаться в двумерном пространстве x,y . Задача анимата – поиск максимума функции $f(x,y)$.
2. Анимат функционирует в дискретном времени $t = 0,1,2,\dots$, он может оценивать изменение текущего значения функции $f(x,y)$ по сравнению с предыдущим тактом времени $\Delta f(t) = f(t) - f(t-1)$.
3. Каждый такт времени анимат совершает движение, при этом его координаты x, y изменяются на величины $\Delta x(t), \Delta y(t)$ соответственно.
4. Анимат имеет две тактики поведения: А) двигаться в выбранном направлении, Б) изменить направление движения случайным образом. Смещение анимата в следующий такт времени $\Delta x(t+1), \Delta y(t+1)$ для этих тактик определяется различным образом. Переключение между тактиками регулируется величиной $M(t)$, зависимость от времени которой определяется выражением

$$M(t) = k_1 M(t-1) + \xi(t) + I(t), \quad (2.1)$$

где k_1 – параметр, характеризующий инерционность переключения тактик ($0 < k_1 < 1$), $\xi(t)$ – нормально распределенная случайная величина со средним, равным 0, и средним квадратическим отклонением σ , $I(t)$ – интенсивность раздражителя. Для величины интенсивности раздражителя $I(t)$ предусматриваем две возможности:

$$I(t) = k_2 \Delta f(t) \quad (2.2)$$

и

$$I(t) = k_2 \Delta f(t)/f(t-1). \quad (2.3)$$

где $k_2 > 0$. Согласно (2.2), (2.3) интенсивность положительна, если шаг приводит к увеличению значения функции, и отрицательна – в противном случае. Формула (2.3), применимая при $f(t) > 0$, учитывает опыт разработки подобных моделей [19, 23].

Предполагаем, что при $M(t) > 0$ анимат придерживается тактики А), при $M(t) < 0$ – тактики Б). Величину $M(t)$ можно рассматривать как *мотивацию* к выбору тактики А).

Тактика А). При движении в выбранном направлении анимат смещается на величину R_0

$$\Delta x(t+1) = R_0 \cos \phi_0, \quad \Delta y(t+1) = R_0 \sin \phi_0, \quad (2.4)$$

где угол ϕ_0 характеризует сохраняющееся направление движения анимата,

$$\cos \phi_0 = \frac{\Delta x(t)}{\sqrt{[\Delta x]^2 + [\Delta y]^2}}, \quad \sin \phi_0 = \frac{\Delta y(t)}{\sqrt{[\Delta x]^2 + [\Delta y]^2}}.$$

Тактика Б). При случайном повороте анимат также смещается на некоторую величину r_0 , а направление его движения случайно варьируется

$$\Delta x(t+1) = r_0 \cos \phi, \quad \Delta y(t+1) = r_0 \sin \phi, \quad (2.5)$$

где $\phi = \phi_0 + w$, ϕ_0 – угол, задающий направление движения в текущий такт времени t , величина w нормально распределена (среднее значение w равно нулю, среднее квадратическое отклонение равно w_0), ϕ – угол, характеризующий направление движения в такт времени $t+1$.

Пример поиска максимума функции $f(x,y)$ рассмотрен на рис. 1,2. На рис. 1 показана траектория движения анимата в координатах x,y ; на рис. 2 – зависимость оптимизируемой функции от времени. Функция $f(x,y)$ имеет вид $f(x,y) = \sin x + \sin y$. Начальная точка поиска $x = 0, y = 0$. Параметры расчета равны: $R_0 = 0.01$; $r_0 = 0.01$; $w_0 = 2$; $k_1 = 0.8$; $k_2 = 0.2$; $\sigma = 0.01$. Интенсивность раздражителя $I(t)$ определяется выражением (2.2). Видно, что анимат придерживается в основном тактики А) и изредка следует тактике Б) и, в конце концов, оказывается в окрестности максимума функции $f(x,y)$.

Отметим, что данная схема легко обобщается на случай поиска оптимума функции многих переменных. Необходимо подчеркнуть, что схемы поиска экстремума функций, близкие к изложенной, разрабатывались рядом авторов (Цыпкин Я.З., Растринин Л.А., Неймарк Ю.И.), см. например, [25]. Однако данная схема в наиболее явном и четком виде использует свойства инерционности, стохастичности и влияние изменения оптимизируемой функции (см. формулы (2.1)-(2.3)). В принципе, возможны модификации модели с применением схем адаптации,

исследованных в 1960-80 гг. Например, можно учесть инерционность с помощью автоматов, аналогичных автоматам М.Л. Цетлина [5], и такая модель была нами разработана [26]. Изучение модели [26] показало, что она также достаточно эффективно обеспечивает поиск экстремума функций, хотя сама модель более громоздкая, чем представленная выше. В схему можно вводить дальнейшие естественные усовершенствования, например, уменьшение шага R_0 при приближении к экстремуму (аналогично методам работ [25, 27, 28]), постепенное уменьшение интенсивности стохастичности (подобно известному методу отжига [29]) и т.п. Так как наша задача – охарактеризовать общие закономерности адаптивного поискового поведения, то ограничимся наиболее простой формой модели. Изложенная схема характеризует общие закономерности поискового поведения для приведенных выше примеров самцов бабочек тутового шелкопряда [20] и червей нематод [21], хотя и не учитывает конкретные детали механизмов стохастического поиска: петли, описываемые самцами бабочек, и пируэты червей-нематод. Конкретные механизмы поискового поведения на примере личинок ручейников анализируются в следующих разделах.

3. Поисковое поведение ручейников. Эксперимент. Далее проводим рассмотрение для следующего биологического эксперимента [30]. Личинок ручейников помещали в кольцевой коридор с водой, дно которого было покрыто сплошным слоем песка. На большей части коридора (участок 1) на дне были только песчинки (мелкие частицы). На небольшом участке коридора (участок 2), кроме песка, находились еще предпочитаемые личинками крупные плоские частицы (специально изготовленные фрагменты яичной скорлупы приблизительно квадратной формы). Диаметр кольца был 87 мм, ширина кольца – 16 мм. Площадь участка 2 равнялась 1/6 площади кольца. Характерные линейные размеры песчинок составляли 0.5-1 мм, размер стороны скорлупки – 1.5-2 мм, размер самих личинок – 12 мм. Вероятность того, что ручейник встретит на участке 2 крупную, а не мелкую частицу, была примерно 0.2.

Эксперимент проводили с 40 личинками ручейников. Личинкам разрушали переднюю и заднюю треть уже построенного домика. Ручейников по одному помещали в центр участка 1 и наблюдали их поведение до прикрепления первой частицы, а затем ещё в течение 1 ч. после этого. Изредка личинка не прикрепляла частицы слишком длительное время (порядка 1 ч.), эксперименты с такими личинками не включались в число наблюдений.

Поведение личинок было следующим. Прежде чем начать строительство, ручейники передвигались по коридору, поднимали со дна и обследовали значительное число частиц. Все особи посещали участок 2 во время передвижения и поднимали как песок, так и скорлупу. Четыре личинки начали строительство на участке 1 и не возвращались на участок 2 до конца

эксперимента. Остальные особи начинали строительство с прикрепления скорлупы на участке 2, причем 17 из них уже не уходили с этого участка, хотя и перемещались внутри его. Оставшиеся 19 особей провели на этом участке больше половины времени эксперимента. Личинки, оставшиеся на участке 1, прикрепили в среднем по 7 песчинок. Среднее число прикрепленных частиц как для 17 особей, оставшихся на участке 2, так и для 19 особей, покидавших и возвращавшихся на участок 2, составило 5 скорлупок и 2 песчинки. Эксперимент показывает, что личинки ручейников предпочитают находиться на участке 2, где они строят домик в основном из крупных частиц – скорлупок.

М о д е л ь . Цель изложенного ниже – продемонстрировать адекватность компьютерной модели биологическому эксперименту. Далее разработанный подход может быть использован при развитии теории систем управления адаптивным поведением. Строим модель поискового поведения личинок ручейников, делая следующие предположения.

1. Время считаем дискретным, шаг по времени Δt – равным минимальному характерному времени в поведении личинки, что составляет порядка 1 с.
2. Движение личинки вдоль кольца задаем одномерным, т.е. пренебрегаем шириной кольца по сравнению с его диаметром d .
3. Личинка имеет две тактики поведения: а) искать и прикреплять к домику частицы в своей локальной окрестности, б) перемещаться на новое место.
4. При тактике а) возможны две операции: *тестирование* частицы, при котором она может быть отброшена, и *прикрепление* протестированной частицы к домику.
5. Тенденцию к прикреплению частиц характеризуем переменной $M(t)$, которую в данной модели можно рассматривать как *мотивацию* к прикреплению. Динамика $M(t)$ определяется формулой (2.1), в которой k_1 – параметр, характеризующий медленную релаксацию мотивации ($0 < k_1 < 1$, $1 - k_1 \ll 1$); $\xi(t)$ – нормально распределенная случайная величина со средним, равным 0, и средним квадратическим отклонением σ , а интенсивность раздражителя $I(t)$ определяется различным образом для разных операций, выполняемых модельной личинкой.

При *тестировании* интенсивность раздражителя $I(t)$ изменяется в соответствии с выражением

$$I(t) = k_2 (S_{curr} - S_{last}) / S_{last}, \quad (3.1)$$

где k_2 – положительный параметр; S_{curr} – площадь тестируемой в данный момент частицы; S_{last} – площадь последней протестированной частицы. Формула (3.1) учитывает сравнение площадей тестируемой и последней протестированной частиц аналогично сравнению размеров частиц по (1.1).

При *прикреплении* и *перемещении* интенсивность раздражителя $I(t) = 0$.

6. Считаем, что тестирование и прикрепление происходит при превышении мотивацией $M(t)$ определенного порога, который в том и другом случае различен: для тестирования H_{test} пропорционален площади последней протестированной частицы S_{last} : $H_{test} = k_3 S_{last}$, для прикрепления H_{att} пропорционален площади последней прикрепленной частицы S_{att} : $H_{att} = k_4 S_{att}$, k_3 , k_4 – положительные параметры.
7. Схема выполнения операций состоит в следующем. Если мотивация $M(t)$ оказалась больше порога тестирования H_{test} и при этом не происходит прикрепления, то личинка начинает ощупывать расположенную рядом с ней частицу. Когда мотивация $M(t)$ меньше порога H_{test} , то тестируемая частица отбрасывается. Если частица не отбрасывается, то тестирование продолжается в течение определенного времени T_{test} , после чего $M(t)$ сравнивается с порогом прикрепления H_{att} . Прикрепления не происходит при $M(t) < H_{att}$; в случае $M(t) > H_{att}$ частица прикрепляется в течение T_{att} (в процессе прикрепления мотивация с порогом уже не сравнивается). Времена тестирования T_{test} и прикрепления T_{att} зависят от размера частицы.
8. Если личинка не тестирует и не прикрепляет частицу, то она перемещается в случайном направлении; эпизодически, с интервалом в T_{change} личинка выбирает новое случайное направление движения вдоль кольца.
9. Величина перемещения личинки за один такт времени (длительностью Δt) равна L .

В соответствии с проведенным в [23] анализом в модель были введены пороги тестирования и прикрепления, зависящие от размеров ранее протестированных или прикрепленных частиц. Это означает, что личинки ручейников обладают памятью о размерах последних обрабатываемых частиц и используют память при организации адаптивного поведения.

4. Результаты моделирования. Расчет по основной модели. Анализ модели проводился путем компьютерного моделирования, при котором, так же как в биологическом эксперименте [30], предполагалось, что личинки помещены в кольцевой коридор диаметром 90 мм. Полагалось, что сектор размером 1/6 части периметра (участок 2) имеет частицы двух размеров: малые (песчинки) и большие (скорлупки), на остальной части коридора (участок 1) есть только песчинки. Линейные размеры песчинки и скорлупки составляли 0.5 и 1.5 мм соответственно. Площадь частицы считалась равной квадрату ее размера. Вероятность того, что ручейник встретит на участке 2 крупную, а не мелкую частицу, была равна 0.2. Шаг по времени $\Delta t = 1$ с.

Сначала модельная личинка помещалась в центр участка 1. Исходная мотивация к прикреплению $M(0) = 0$. Исходный порог прикрепления $H_{att}(0) = k_4 S_L$, где S_L – площадь

крупной частицы, затем этот порог постепенно уменьшался по экспоненте с характерным временем 3000 тактов времени, до тех пор, пока не прикреплялась первая частица, далее порог H_{att} определялся размерами прикрепляемых частиц. Исходный порог тестирования $H_{test}(0) = k_3 S_S$, где S_S – площадь малой частицы; порог H_{test} не менялся до тех пор, пока не начиналось тестирование.

В соответствии с экспериментальными данными величина перемещения личинки за один такт времени $L = 2$ мм. Полагалось, что время тестирования T_{test} малой и большой частицы составляет 5 и 10 с соответственно; время прикрепления T_{att} малой и большой частицы составляет 60 и 120 с; время изменения направления движения $T_{change} = 30$ с. Остальные параметры модели (k_1 - k_4 , σ) были выбраны следующим образом. Так как характерное время прикрепления частиц – порядка 100 с, то полагалось, что характерное время релаксации мотивации должно быть того же порядка: $k_1 = 0.99$. Параметры $k_3 = 0.01$, $k_4 = 1$. Параметры k_2 и σ грубо варьировались в диапазоне от 0.001 до 0.1 и были подобраны так, чтобы при моделировании получалось поведение, примерно подобное наблюдавшемуся в биологическом эксперименте: $k_2 = 0.007$, $\sigma = 0.05$.

Расчет проводился в течение 7200 тактов времени, что соответствует 2 ч. для моделируемых процессов (далее временные характеристики приводятся именно для модельных личинок). Как и в биологическом эксперименте, анализировалось поведение 40 личинок в течение 1 ч. после прикрепления первой частицы; если ни одна частица не прикреплялась в течение 1 ч. (таких расчетов оказалось 3 из 43), то аналогично биологическому эксперименту эти расчеты не принимались во внимание.

Поведение модельных личинок ручейников имело следующие свойства: в начале компьютерного эксперимента личинки перемещались по кольцевому коридору, в большинстве случаев (в 27 случаях из 40) посещая и покидая участок 2 еще до момента прикрепления первой частицы, в 13 расчетах личинки прикрепляли частицы на участке 2 при первом его посещении; среднее время до момента прикрепления первой частицы составило 1815 с (среднее квадратическое отклонение 872 с); почти во всех случаях (в 39 из 40) первой прикреплялась крупная частица; количество частиц в течение часа после начала прикрепления первой частицы в среднем по 40 расчетам составило: 4.2 крупные частицы (среднее квадратическое отклонение 1.68) и 0.6 мелких частиц (среднее квадратическое отклонение 1.53); в 14 расчетах личинка не покидала участок 2 после начала прикрепления частиц, в 10 расчетах личинка находилась вне участка 2 в конце наблюдения, в остальных 16 – уходила с участка 2 и вновь возвращалась на него.

Количественные зависимости, характеризующие поведение личинок, представлены на рис. 3-5. На рис. 3 приведены зависимости изменения суммарной площади домика личинки от

времени $S(t)$ для трех типичных расчетов. Видно, что 1) число прикрепляемых частиц невелико и по порядку величины близко к среднему значению, наблюдавшемуся в биологическом эксперименте, 2) имеется сильный разброс в числе прикрепляемых частиц и во времени начала прикрепления первой частицы, 3) преимущественно прикрепляются крупные частицы (площадью 2.25 мм^2), но эпизодически – и мелкие частицы (площадью 0.25 мм^2). Отметим, что зависимость I на рис. 3 соответствует максимальному числу прикрепленных малых частиц. Прикрепление малых частиц наблюдалось только в 8 расчетах из 40 (в 3 расчетах было прикреплено по одной малой частице, а в 5 остальных – 2-5 либо 7 малых частиц – по одному случаю для каждого из этих чисел).

Детали поведения личинок (пример 3 на рис. 3), иллюстрируются рис. 4, 5. На рис. 4 представлены временные зависимости суммарной площади прикрепленных частиц $S(t)$ и приведенной угловой координаты личинки $\phi_{norm}(t)$. На рис. 5 – временная зависимость мотивации к прикреплению $M(t)$ от момента $t = 3000$ до конца расчета. Угловая координата личинки ϕ_{norm} приведена к интервалу $[0, 2\pi]$; центр участка 1, в который помещается личинка в начале расчета, соответствует $\phi_{norm}(t) = 0$, участок 2 соответствует интервалу $(5/6)\pi < \phi_{norm} < (7/6)\pi$.

После $t = 3018$ личинка попадает на участок 2, при этом ее угловая координата не меняется вплоть до момента времени $t = 3430$. В начальные моменты нахождения на участке 2 мотивация меньше порога прикрепления (см. рис. 5), поэтому прикрепления частиц не происходит, а они только тестируются и отбрасываются (крупные и мелкие). Так как на этом участке достаточно часто попадают крупные частицы (с вероятностью 0.2), то, согласно выражениям (2.1), (3.1), в моменты их тестирования увеличивается мотивация $M(t)$. Рост мотивации $M(t)$ при случайных вариациях $M(t)$ и спадах, происходящих при тестировании мелких частиц сразу после тестирования крупных, а также обусловленных релаксацией мотивации, имеет место до $t = 3288$ (второй пик на кривой $M(t)$ в рассматриваемом интервале времени), когда мотивация $M(t)$ превышает порог прикрепления H_{att} и начинается прикрепление крупной частицы до момента $t = 3408$. При этом происходит существенная релаксация мотивации (до величины, равной примерно 0.4). Затем некоторое время продолжается тестирование частиц, сопровождаемое колебаниями мотивации, а после $t = 3430$ мотивация становится ниже порога тестирования и начинается перемещение личинки. Перемещение эпизодически прерывается тестированием и отбрасыванием частиц (иногда длительным, например, рассматриваемая личинка не перемещается при $3818 < t < 4317$), до тех пор, пока при $t = 4830$ личинка вновь попадает на участок 2, где лежат крупные частицы. При их тестировании происходит достаточно устойчивый рост мотивации $M(t)$, который приводит к тому, что при $t = 5140$ начинает прикрепляться новая крупная частица. После чего вновь

происходит релаксация мотивации, которая оказывается не столь значительной, как после прикрепления первой частицы, и личинка не перемещается, а остается на участке 2, и процесс тестирования и прикрепления частиц продолжается до конца расчета.

Модель с оптимизацией средней скорости роста площади домика. Как уже отмечалось выше, в отличие от общей схемы поискового поведения, изложенной в разд. 2, в данной модели предполагается, что личинки ручейников обладают памятью о размерах последних обрабатываемых частиц и используют эту память при организации адаптивного поведения. Мы делали попытку построить другую модель без такой памяти, в которой происходит оптимизация средней скорости роста площади домика личинки. Вторая модель была построена аналогично модели разд. 3, но вместо формулы (3.1) полагалось

$$I(t) = k_2 [V(t) - V(t-T_L)] / [V(t-T_L) + A], \quad (4.1)$$

где $V(t)$ – усредненная по достаточно длительному интервалу времени T_L ($T_L \sim 300$ с) скорость роста площади домика, A – положительный параметр, введенный для учета возможности нулевого значения $V(t)$.

Выражение (4.1) подразумевает, что при поисковом поведении осуществляется оптимизация функции средней скорости роста площади домика, аналогично тому, как происходит оптимизация функции $f(t)$ в общей схеме разд. 2. Такое приближение может показаться вполне разумным с биологической точки зрения, так как быстрое построение домика необходимо для безопасности ручейников. Однако расчеты на основе формулы (4.1), показали, что хотя в рамках этой модели нетрудно найти поведение, при котором личинка находит участок 2 и скорость роста площади домика примерно такая же, как для реальных личинок, специфика процесса присоединения частиц в модели существенно отличается от эксперимента. В расчетах не наблюдается предпочтительного присоединения крупных частиц. На рис. 6 показана типичная зависимость суммарной площади прикрепленных частиц S от времени t для расчета по второй модели. Для этого примера при $2800 < t < 3800$ личинка находилась на участке 2, при этом присоединялись преимущественно мелкие частицы: 13 мелких частиц и только 2 крупных. Это показывает, что в модель необходимо вводить память не о средней скорости роста площади домиков, а о размерах последних обрабатываемых частиц, как это и сделано в модели, изложенной в разд. 3, – только при наличии такой памяти личинка запоминает, что после прикрепления крупной частицы целесообразно прикрепить снова крупную частицу. Таким образом, хотя уравнения (2.1), (4.1) описывают интересную систему оптимизации, она недостаточно адекватна рассматриваемым биологическим данным.

Заключение. Итак, построена математическая модель поискового поведения личинок ручейников, строящих домики из крупных и мелких частиц. Модель использует понятие *мотивации*, в данном случае мотивации к прикреплению частиц к домику. Продемонстрировано, что для адекватного описания поиска участков с крупными частицами и процессов прикрепления частиц к домику необходимо учитывать то, что личинки обладают памятью о размерах последних обрабатываемых частиц и используют эту память при организации поведения. Проведен цикл расчетов и сделан подбор параметров, при которых модель соответствует биологическим экспериментальным данным.

В модель включен механизм регулирования мотивации $M(t)$ к прикреплению частиц, соответствующий принципу *частичного успеха*: при тестировании крупной частицы, которая все же не прикрепляется из-за недостаточно высокого уровня текущей мотивации, происходит рост $M(t)$, в результате чего повышается тенденция к прикреплению следующих крупных частиц. Такой рост мотивации $M(t)$ можно видеть, например, на рис. 5 в интервале времени от 3018 до 3288 с. (детали этого роста описаны в разд. 4). Отметим, что наряду с ручейниками принцип частичного успеха известен и у других организмов. Например, можно говорить о частичном успехе у пауков-скакунов, подманивающих жертву, в случае, когда жертва приблизилась, но еще не настолько, чтобы можно было её схватить [31, 32].

Анализ зависимостей координат личинки от времени демонстрирует, что на достаточно больших интервалах времени модельная личинка придерживается одной и той же тактики, что характеризует ее инерционность. Следовательно, хотя есть специфика поведения, обусловленная памятью о размерах обрабатываемых частиц, в целом исследованная модель аналогична общей схеме инерционного переключения между тактиками поведения (разд. 2).

Модель в некоторых аспектах подобна методам оптимизации функций, которые разрабатывались рядом авторов, см. [25,27,28,33]. В настоящей статье основной акцент сделан на понимание механизмов адаптивного поиска, типичных для биологических организмов. Используемое здесь понятие мотивации позволяет характеризовать те особенности поискового поведения, которые важны для автономных адаптивных систем (как живых, так и искусственных), имеющих несколько тактик или целей поведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior / Eds. J.-A. Meyer, S.W. Wilson. Cambridge, London. The MIT Press, 1990.
2. От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. М.: Изд-во УРСС, сер. "Науки об искусственном", 2006.
3. Непомнящих В.А. Аниматы как модель поведения животных // IV Всероссийская науч.-техн. конф. "Нейроинформатика-2002". Матер. дискуссии "Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты". М.: МИФИ, 2003. С. 58-76.
4. Непомнящих В.А. Поиск общих принципов адаптивного поведения живых организмов и аниматов // Новости искусственного интеллекта. 2002. № 2. С. 48-53.
5. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделирование биологических систем. М.: Наука, 1969.
6. Бонгард М.М., Лосев И.С., Смирнов М.С. Проект модели организации поведения – "Животное" // Моделирование обучения и поведения. М.: Наука. 1975. С.152-171.
7. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М.: Наука, 1987.
8. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975.
9. Емельянов В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003.
10. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: Изд-во УРСС, сер. "Синергетика: от прошлого к будущему", 2005.
11. Holland J.H., Holyoak K.J., Nisbett R.E. et all. Induction: Processes of Inference, Learning, and Discovery. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
12. Sutton R., Barto A. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press, 1998.
13. From Animals to Animats 9. The Ninth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, Proceedings / Eds. S. Nolfi, G. Baldassarre, R. Calabretta et all, Rome, Italy: Springer, 2006.
14. Жданов А.А. Бионический метод автономного адаптивного управления // От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. М.: Изд-во УРСС, сер. "Науки об искусственном", 2006. С. 343-385.
15. Станкевич Л.А. Когнитивный подход к управлению гуманоидными роботами // От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. М.: Изд-во УРСС, сер.

- "Науки об искусственном", 2006. С. 386-443.
16. Самарин А.И. Мобильные роботы и самоорганизация в нейронных структурах – ретроспективный взгляд // От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. М.: Изд-во УРСС, сер. "Науки об искусственном", 2006. С. 145-155.
 17. Вайнцвайг М.Н., Полякова М.П. О моделировании мышления // От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. М.: Изд-во УРСС, сер. "Науки об искусственном", 2006. С. 280-286.
 18. Анохин К.В., Бурцев М.С., Зарайская И.Ю. и др. Проект "Мозг анимата": разработка модели адаптивного поведения на основе теории функциональных систем // Тр. восьмой национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием. Т.2. М.: Физматлит, 2002. С. 781-789.
 19. Непомнящих В.А. Модели автономного поискового поведения // От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. М.: Изд-во УРСС, сер. "Науки об искусственном", 2006. С. 200-242.
 20. Kuwana Y., Shimoyama I., Sayama Y., Miura H. Synthesis of pheromone-oriented emergent behavior of a silkworm moth // Proc. IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, 1996. P. 1722-1729.
 21. Pierce-Shimomura J.T., Morse T.M., Lockery S.R. The fundamental role of pirouettes in *Caenorhabditis elegans* Chemotaxis // J. Neuroscience. 1999. V. 19. № 21. P. 9557-9569.
 22. Ухтомский А.А. Доминанта. М.-Л.: Наука, 1966.
 23. Непомнящих В.А., Подгорный К.А. Формирование упорядоченного поведения при случайной последовательности раздражителей у личинок ручейника *Chaetopteryx villosa* Fabr. (Limnephilidae: Trichoptera: Insecta) // Журн. общ. биологии. 1994. Т.55. № 3. С. 328-336.
 24. Попов Е.Е., Редько В.Г., Непомнящих В.А. Моделирование поискового поведения анимата на основе принципов спонтанной активности // Проблемы нейрокибернетики. Матер. 14-й междунар. конф. по нейрокибернетике. Т. 2. Ростов-на-Дону. Изд-во ООО "ЦВВР", 2005. С. 142-143.
 25. Растринг Л. А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981.
 26. Мосалов О.П., Непомнящих В.А., Редько В.Г. Модель поискового поведения, основанная на биологических аналогиях // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. тр. II Междунар. научно-практического семинара. М.: Физматлит, 2003. С. 222-227.
 27. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
 28. Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем. М.: Наука, 1970.

29. Kirkpatrick S., Gelatt C. D. Jr., Vecchi M. P. Optimization by simulated annealing // Science. 1983. V. 220. № 4598. P. 671–680.
30. Непомнящих В.А. Противоречие между оптимизацией и упорядоченностью в строительном поведении личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* Fabr. (Limnephilidae: Trichoptera) // Журн. общ. биологии. 2002. Т.63. № 3. С. 473-482.
31. Jackson R.R., Wilcox R.S. Spider flexibly chooses aggressive mimic signals for different prey by trial and error // Behaviour. 1993. V.127. № 1. P. 21-36.
32. Cross F.R., Jackson R.R. Spider heuristics // Behavioral Processes. 2005. V.69. №2. P. 125-127.
33. Неймарк Ю.И. Динамические системы и управляемые процессы. М.: Наука, 1978.
34. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов // УФН. 1962. Т. 77. Вып. 3. С. 449-480.

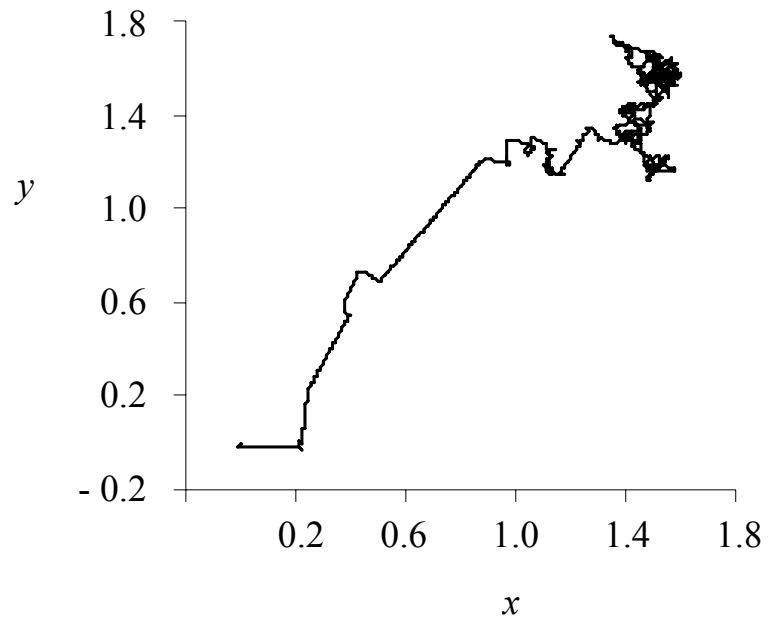


Рис. 1. Траектория движения анимата в координатах x, y

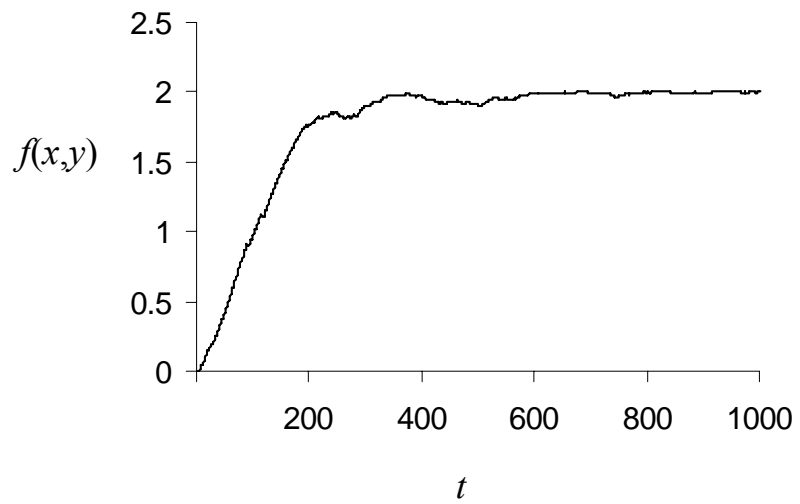


Рис. 2. Зависимость функции $f(x, y)$ от времени

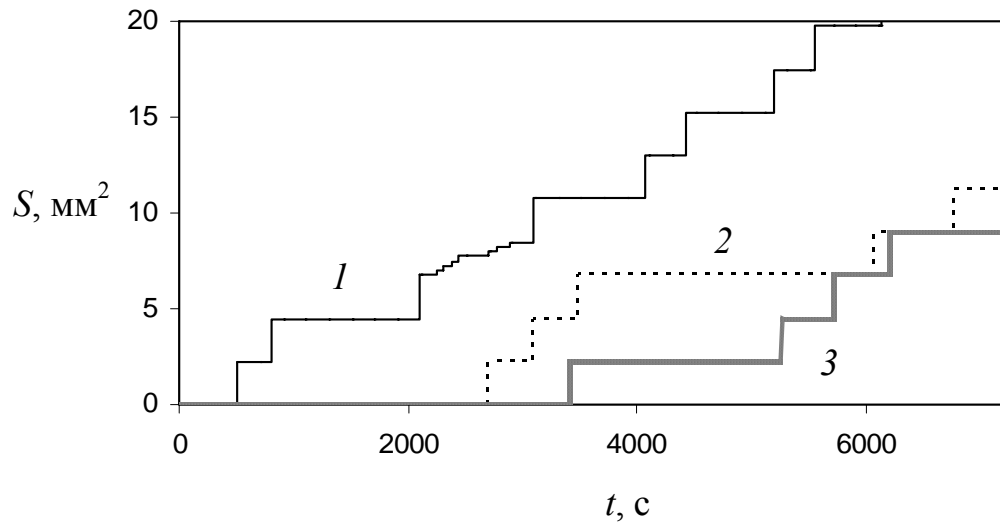


Рис. 3. Зависимость суммарной площади прикрепленных частиц S от времени t для трех различных расчетов

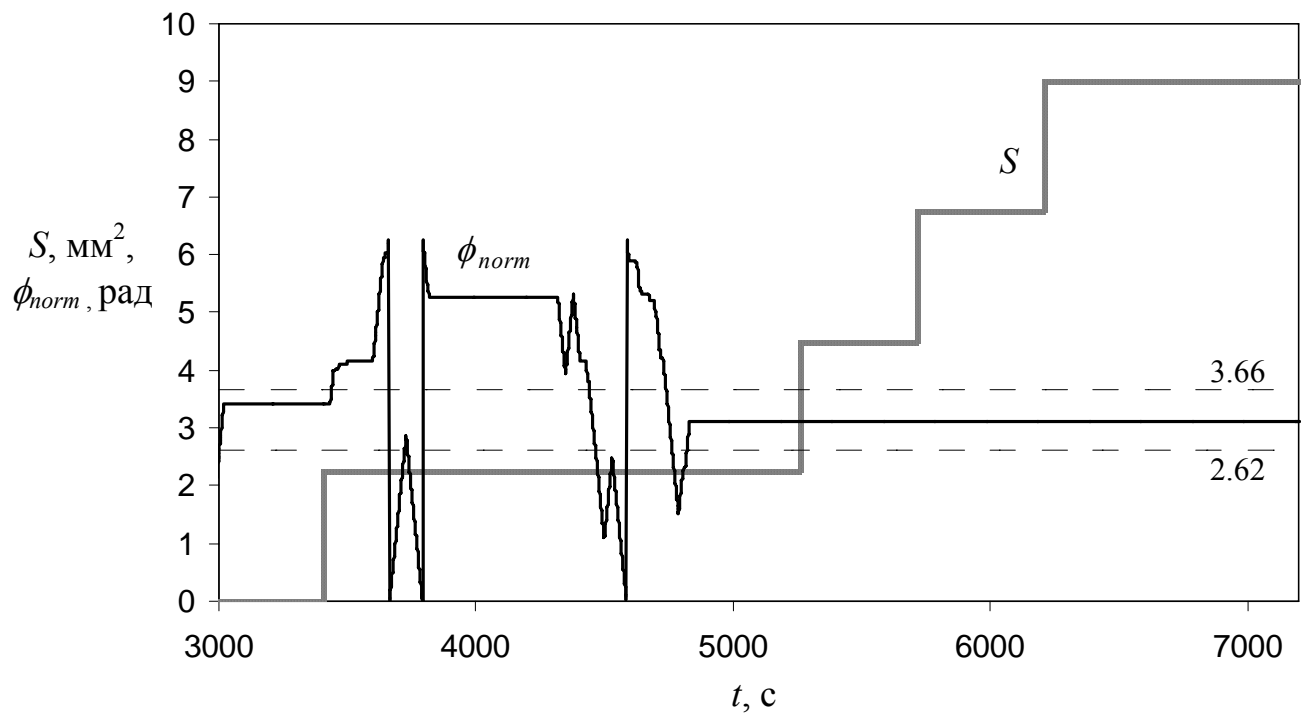


Рис. 4. Временные зависимости суммарной площади прикрепленных частиц $S(t)$ и приведенной угловой координаты $\phi_{norm}(t)$ личинки для расчета, соответствующего примеру 3 на рис. 3; $t > 3000$. Горизонтальные штриховые линии с надписями 2.62 и 3.66 соответствуют граничным значениям $\phi_{norm}(t)$ для участка 2

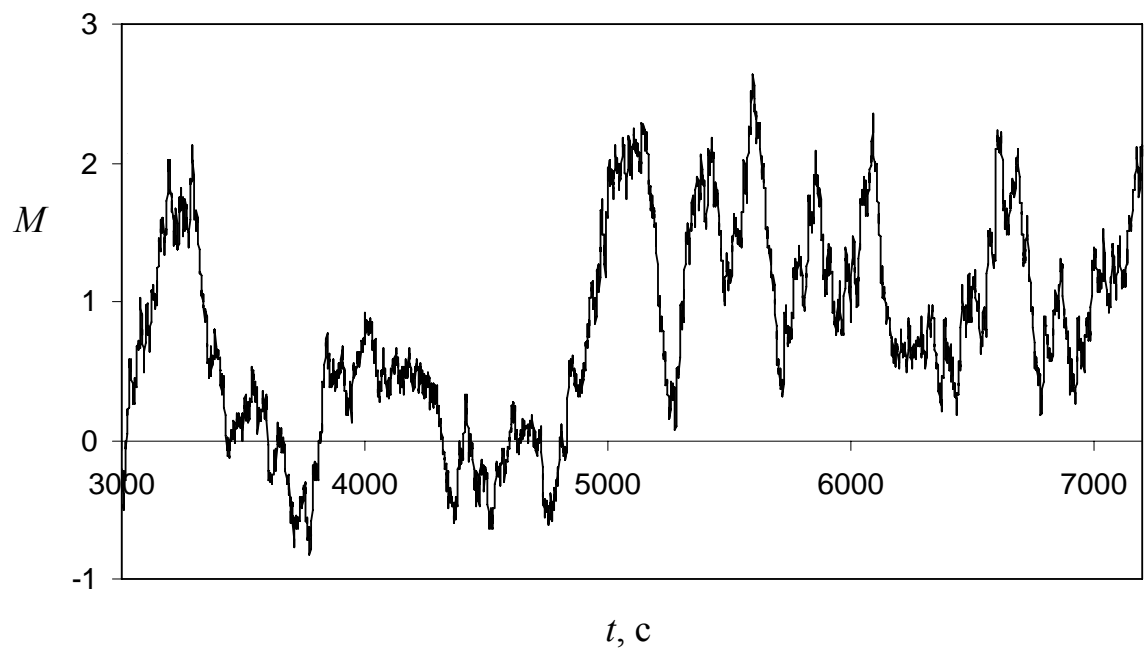


Рис. 5. Временная зависимость мотивации к прикреплению $M(t)$; тот же расчет, что и на рис. 4

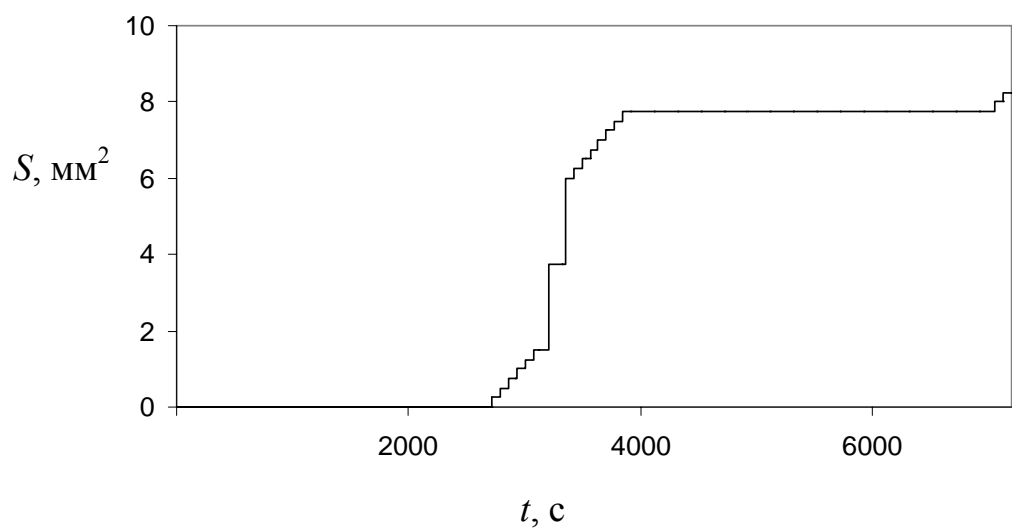


Рис. 6. Зависимость суммарной площади прикрепленных частиц S от времени t для расчета по второй модели; интенсивность раздражителя $I(t)$ определяется выражением (4.1)