

На правах рукописи



ПЛЕШКОВА ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ  
ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НАСЕКОМЫМ**

Специальность 05.13.18  
Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Тамбов – 2014

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Астраханский государственный университет»

- Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Лихтер Анатолий Михайлович**
- Официальные оппоненты: **Арзамасцев Александр Анатольевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
Тамбовский государственный университет,  
заведующий кафедрой компьютерного  
и математического моделирования
- Большаков Александр Афанасьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
Саратовский государственный технический  
университет им. Ю.А. Гагарина, профессор  
кафедры автоматизации, управления, мехатроники
- Ведущая организация: **ФГБУН «Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова» Российской академии наук**

Защита диссертации состоится 5 июня 2014г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д. 212. 260.07 при ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 160.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «ТГТУ» <http://www.tstu.ru>.

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., доцент



Егоров Сергей Яковлевич

## Общая характеристика работы

Повышение эффективности систем управления биологическими объектами в силу сложности их структуры, наличия многочисленных внутренних механизмов управления и регулирования, локализованных на биологическом уровне, а также особенностей социального поведения невозможно без использования современных методов, базирующихся на математическом моделировании и компьютерных технологиях.

Существующие технические средства, основанные на применении физических, в частности, световых полей для воздействия на рецепторные системы объектов различной биологической природы (В.Н. Мельников, В.Р. Протасов, Г.П. Мазохин-Поршняков, N.J. Strausfeld, E. Reisenman и др.), обладают существенными недостатками, поскольку при их проектировании не учитываются такие факторы, как геометрические параметры системы, особенности ландшафта и широты местности, время года и суток, а также оптические характеристики органов зрения и других элементов экосистемы объекта управления.

Реализация подхода, основанного на анализе систем передачи оптического сигнала объектам управления биологической природы, в частности, насекомым, являющимся одним из ее элементов, невозможна без построения математической модели, позволяющей максимизировать критерий эффективности функционирования системы – ее производительность, в котором учтены все ранее перечисленные факторы.

**Актуальность** работы заключается в необходимости построения математической модели и разработке на ее основе эффективных устройств для передачи оптического сигнала насекомым с различными типами зрения.

**Целью работы** является повышение производительности систем привлечения насекомых за счет совершенствования процесса передачи им оптического сигнала с использованием разработанной математической модели.

**Объектом исследования и моделирования** являются системы передачи оптического сигнала насекомым.

**Предметом исследования** является математическая модель систем передачи оптического сигнала насекомым с различными типами зрения.

Для достижения поставленной цели работы необходимо было решить следующие **задачи**:

- проанализировать существующие системы передачи оптического сигнала насекомым;
- разработать математическую модель систем передачи оптического сигнала насекомым с различными типами зрения с учетом характеристик среды их обитания.
- создать алгоритмы для расчета характеристик, а также структурной и параметрической оптимизации систем передачи оптического сигнала насекомым без и с применением метода внешней (оптической) фильтрации;
- разработать комплексы проблемно-ориентированных программ для расчета характеристик эффективных систем передачи оптического сигнала насекомым.

**Методы исследования.** Для построения математической модели использовались методы математического моделирования, физики, биофизики, численные методы, а также теории вероятности и математической статистики. Реализация алгоритмов выполнена на языке C# в среде программирования “MS Visual Studio 2010”.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- впервые обоснована, разработана и исследована математическая модель объекта, отличающаяся учетом шумов, создаваемых искусственными и естественными источниками электромагнитного излучения оптического диапазона;
- разработаны алгоритмы, отличающиеся использованием баз данных селективных источников, насекомых с различными типами зрения и особенностей

ландшафта местности для проведения вычислительного эксперимента с целью моделирования объекта исследования;

- с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента выполнено комплексное исследование объекта, в процессе которого учтены геометрические и физические параметры, особенности ландшафта и широты местности, время года и суток, а также вариативность: без и с применением метода внешней (оптической) фильтрации;
- создана теоретическая база для разработки высокопроизводительных систем передачи оптического сигнала биологическим объектам различной природы.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

- математическая модель объекта исследования;
- алгоритмы и комплексы проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента с целью исследования математической модели объекта;
- результаты исследования зависимостей характеристик объекта от геометрических и физических параметров, особенностей ландшафта и широты местности, времени года и суток;
- результаты комплексного исследования и проектирования эффективных технических систем для передачи оптического сигнала насекомым.

**Практическая значимость:**

1. На основании математических моделей и алгоритмов созданы комплексы проблемно-ориентированных программ:

- «Программный комплекс для расчета характеристик канала передачи оптической информации дневным летающим насекомым», № 2011612494.
- «Программный комплекс для расчета параметров канала с внешней фильтрацией при передаче оптической информации насекомым», № 2012610365.

2. Разработана и зарегистрирована полезная модель «Устройство привлечения насекомых с использованием селективных источников электромагнитного излучения», № 93221.

3. Разработано и зарегистрировано изобретение «Способ биологической защиты от кровососущих насекомых и устройство для его реализации», № 2417588.

Результаты диссертационной работы нашли свое применение в ряде практических разработок систем для передачи оптического сигнала насекомым и поддержаны следующими грантами:

- Программа развития инновационной инфраструктуры вуза «Каспийский инновационно-технологический комплекс “Астраханский государственный университет”», 2010–2012 гг.
- «УМНИК», 2010 и 2011 гг.

Отмечены дипломами конкурсов следующие работы:

- Лучший инновационный проект. Межрегиональный конкурс. Диплом за инвестиционно-привлекательный проект, 2011 г.
- Диплом победителя встречи клуба инноваторов г. Астрахань, 2011 г.

**Апробация работы.** По результатам исследования сделан ряд докладов на международных и всероссийских конференциях: «Иноватика – 2010», г. Ульяновск; «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерений» (УКИ10), г. Москва, 2010г.; «Московский международный конгресс. Биотехнология: состояние и перспективы развития», г. Москва, 2012 г.; «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ12), г. Москва, 2012 г.; «Проблемы математического моделирования, супервычислений и информационных технологий», г. Таганрог, 2012 г., а также на ежегодных научных конференциях АГУ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 31 печатная работа, в том числе: 9 статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ, 16 в материалах международных и всероссийских научных конференций, 2 статьи в зарубежных изданиях, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на полезную модель, 1 патент на изобретение.

Диссертация соответствует пунктам 1, 4 и 5 паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Личный вклад автора и роль соавторов.** Основные результаты работы, теоретические выкладки, приложения и выводы, выносимые на защиту, принадлежат лично соискателю. Роль соавторов в совместных публикациях заключается в следующем: Лихтер А.М. – постановка задачи исследования процесса передачи оптического сигнала объекту биологической природы; Джалмухамбетов А.У. – расчет распределения солнечной энергии на поверхности Земли в различное время года и суток; Рогожина Ю.Н. и Шагаутдинова И.Т. – расчет энергетических характеристик по математическим моделям, предложенным автором, и интерпретация разработанных алгоритмов в программный код языков высокого уровня. Полученные ими результаты опубликованы в совместных статьях. Все соавторы принимали участие в обсуждении полученных патентов и свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 148 наименований и 7 приложений. Общий объем диссертационной работы – 172 страницы, 69 рисунков и 12 таблиц. К диссертации прилагаются акты о внедрении результатов исследований в производственный и учебный процесс, копии свидетельств патентов и свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** приведен анализ систем передачи оптического сигнала объектам биологической природы – насекомым.

Для построения математической модели объекта исследования обосновано использование основных законов электромагнитного излучения, распространяющегося в атмосфере Земли, с учетом явлений поглощения, рассеяния, поляризации и дисперсии (уравнения Максвелла, закон Бугера, формулы Френеля и др.).

В результате анализа устройств, реализующих процесс передачи электромагнитного излучения оптического диапазона, сделан вывод о возможности повышения производительности установок на основе применения информационных критериев качества (функции «отношение сигнал/шум» и пропускной способности канала передачи информации) для выбора эффективных параметров систем.

**Во второй главе** на основе системного подхода при анализе объекта исследования (рис. 1) сформулирована задача выбора эффективных параметров в виде «Найти такой вектор параметров»:

$$\vec{P}^* = \vec{P}(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m; b_1, b_2, \dots, b_k), \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m$  – соответственно регулируемые (высота над поверхностью Земли, расстояние до насекомого, температура нити накала вольфрамовой лампы, параметры оптических фильтров) и нерегулируемые (чувствительность органа зрения насекомого, излучательная способность селективного источника, высота полета насекомого) переменные;  $b_1, b_2, \dots, b_k$  – параметры объекта исследования (ослабление оптического излучения атмосферой, мощность солнечного и лунного излучения в различное время года и суток, спектральные коэффициенты отражения природных поверхностей), при котором критерий эффективности – его производительность  $N$  – принимает максимальное значение:

$$N(\bar{P}^*) = N_{\max} \cdot \quad (2)$$

Производительность установки (количество пойманных в ловушку насекомых, шт.) определяется выражением:

$$N = K \cdot \Pi \cdot \tau, \quad (3)$$

где  $K$  – некоторый постоянный для данной ловушки коэффициент;  $\Pi = \Delta f \cdot \log_2(1 + C/Ш)$  – пропускная способность канала передачи информации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C$  – сигнал, Вт;  $Ш$  – шум, Вт;  $C/Ш$  – функция «отношение сигнал/шум»;  $\Delta f$  – полоса частот, воспринимаемая органом зрения насекомого, Гц;  $\tau$  – время работы установки, с.

В этом случае решение задачи выбора эффективных параметров объекта исследования сводится к максимизации пропускной способности канала передачи информации  $\Pi$  и значения функции «отношение сигнал/шум» ( $C/Ш$ ).

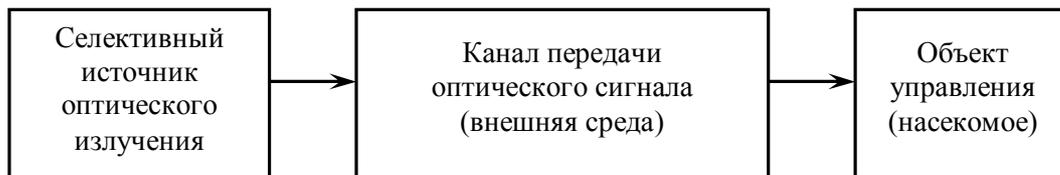


Рис. 1. Структурная схема системы для передачи оптического сигнала насекомым

### Построение математической модели объекта исследования

Основными источниками внешних естественных помех при распространении полезного сигнала являются излучение Солнца, Луны, Земли и ее покровов, атмосферы (рис. 2). Мощность солнечного и лунного излучения, отраженного от какой-либо поверхности и воспринимаемого глазом насекомого, зависит не только от параметров и особенностей строения зрительного органа, но и от характеристик отражающих поверхностей, которыми в данном случае являются облака и подстилающая поверхность (вода, растительность и почва).

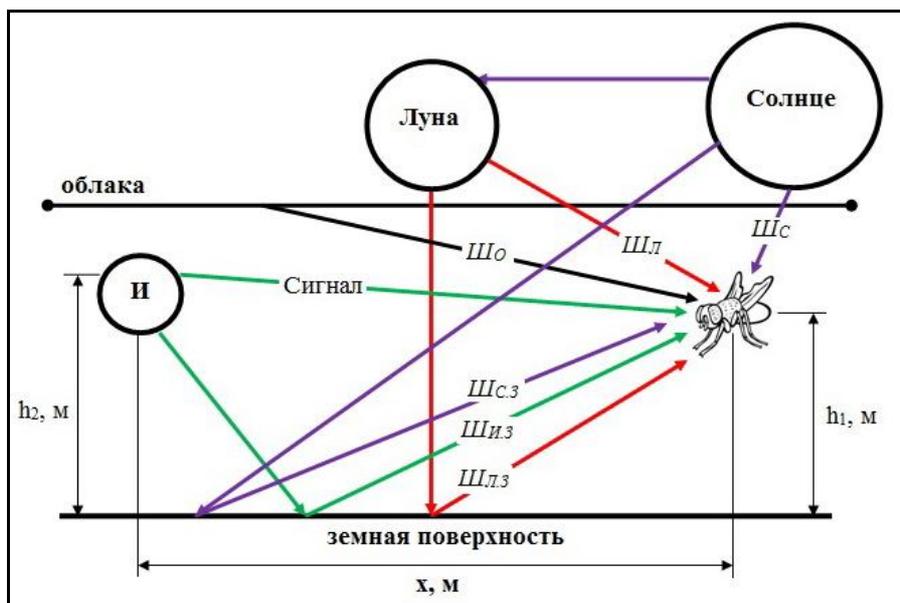


Рис. 2. Схема распространения электромагнитного излучения в системе передачи оптического сигнала насекомым, где И – источник селективного электромагнитного излучения; ОУ – объект управления;  $h_1$  – расстояние от земной поверхности до объекта управления;  $h_2$  – расстояние от земной поверхности до источника излучения;  $x$  – расстояние между И и ОУ по горизонтали

Считая, что шумы от естественных и искусственных источников излучения аддитивно складываются, выражение для шума можно записать в следующем виде:

$$Ш = Ш_c + Ш_{c.з} + Ш_l + Ш_{л.з} + Ш_{и.з} + Ш_o + Ш_p, \quad (4)$$

где  $Ш_o, Ш_{c.з}, Ш_{и.з}, Ш_{л.з}$  – шумы, обусловленные отражением соответственно солнечного, лунного и искусственного излучения от облаков и земной поверхности;  $Ш_c, Ш_l$  – шумы, обусловленные прямой солнечной и лунной подсветкой;  $Ш_p$  – шум, вызванный рэлеевским рассеянием. При построении математической модели в первом приближении можно пренебречь шумами при отражении излучения Солнца и Луны от облаков  $Ш_o$  вследствие их относительной малой величины по сравнению с другими источниками шумов, а также шумом  $Ш_p$ , вызванным рэлеевским рассеянием, поскольку он носит слабоселективный характер.

Оптический сигнал, воспринимаемый органом зрения насекомого, и общий шум имеют вид:

$$C = S_{o.з} \cdot \frac{m}{l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \exp(-q(\lambda) \cdot l) d\lambda, \quad (5)$$

$$Ш = Ш_c + Ш_l + Ш_{c.з} + Ш_{л.з} + Ш_{и.з}, \quad (6)$$

где  $l = \sqrt{x^2 + (h_2 - h_1)^2}$ , м;  $r(\lambda)$  – функция спектральной излучательной способности селективного источника света;  $\tau(\lambda)$  – функция относительной спектральной чувствительности глаза насекомого;  $m$  – коэффициент, учитывающий различие между функциями видности глаза человека и насекомого;  $S_{o.з}$  – площадь органа зрения насекомого, м<sup>2</sup>;  $q(\lambda) = k(\lambda) + \sigma(\lambda)$ ;  $k(\lambda)$  – спектральный коэффициент ослабления оптического излучения атмосферой в УФ и видимой части спектра;  $\sigma(\lambda) = 0.83NA^3 \cdot \lambda^{-4}$  – спектральный коэффициент рэлеевского рассеяния;  $N$  – число молекул в 1 м<sup>3</sup>;  $A$  – эффективное сечение рассеяния по флуктуации плотности в атмосфере, м<sup>2</sup>.

Шумы, обусловленные прямой солнечной и лунной подсветкой, соответственно имеют следующий вид:

$$Ш_c = S_{o.з} \cdot \frac{m}{\pi} \left( \frac{R_c}{R_{3.o}} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) \cdot k(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

$$Ш_l = S_{o.з} \cdot \frac{m}{\pi} \left( \frac{R_c}{R_{л.o}} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) \cdot k(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

где  $\xi(\lambda, T)$  – спектральное распределение излучения Солнца;  $R_c, R_{3.o}, R_{л.o}$  – радиусы Солнца, земной и лунной орбит соответственно.

Выражения для шумов  $Ш_{c.з}$  и  $Ш_{л.з}$  с учетом таких основных природных факторов, как особенности спектральных отражательных способностей почвы, водной поверхности и растительности, поглощение излучения атмосферой Земли, изменение мощности лунного излучения на поверхности Земли в зависимости от фазы Луны:

$$Ш_{c.з} = S_{o.з} \cdot \frac{m}{\pi} \left( \frac{R_c}{R_{3.o}} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) k(\lambda) \tau(\lambda) Noise(\lambda) \exp(-q(\lambda)) d\lambda, \quad (9)$$

$$Ш_{л.з} = S_{o.з} \cdot \frac{m}{\pi} \left( \frac{R_c}{R_{3.o}} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) k(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) S(n) Noise(\lambda) \exp(-q(\lambda)) d\lambda, \quad (10)$$

где  $S(n)$  – спектральная функция распределения мощности лунного излучения на земной поверхности в зависимости от фазы Луны;  $\eta(\lambda)$  – функция спектральной энергетической освещенности Луны;  $Noise(\lambda) = (\mu(\lambda)S_1 + \nu(\lambda)S_2 + \psi(\lambda)S_3)$ ;  $\mu(\lambda), \nu(\lambda), \psi(\lambda)$  – спектральные характеристики отражения соответственно почвы, воды и растительности;  $S_1, S_2, S_3$  – весовые коэффициенты, показывающие относительную долю площади, занимаемой соответствующими поверхностями в  $1 \text{ м}^2$ .

Шум, обусловленный отражением излучения селективного источника от подстилающей поверхности, определяется выражением:

$$Ш_{u.3} = S_{o.3} \cdot \frac{m}{h_2^2 \cdot \pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \tau(\lambda) Noise(\lambda) \exp(-q(\lambda) \cdot h_2) d\lambda, \quad (11)$$

Разработанная математическая модель учитывает не только различия в восприятии оптического сигнала насекомыми с разными типами зрения, зависимость значения функции «отношение сигнал/шум» от геометрических параметров системы передачи электромагнитного излучения оптического диапазона, но и особенности ландшафта местности, а также влияние режима естественной освещенности в различное время года и суток.

Для имитации реальных ландшафтных условий применялся генератор случайных чисел, который моделировал случайные изменения весовых коэффициентов природных поверхностей в соответствии со следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} S_1 &= rnd(1), \\ S_2 &= rnd(1 - S_1), \\ S_3 &= 1 - S_1 - S_2, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $rnd(1)$  – функция, позволяющая получить равномерно распределенное случайное число в заданном интервале значений  $[0, 1]$ .

Используя известные соотношения астрономии по расчету облученности земной поверхности, шум от прямой солнечной подсветки можно представить в виде:

$$Ш_c = S_{o.3} \cdot \frac{m}{\pi} \left( \frac{R_c}{R_{3.o}} \right)^2 \cos \theta(\varphi, n, t) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda) k(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (13)$$

где  $\varphi$  – широта местности;  $t$  – время суток;  $n$  – число истекших суток с начала года.

Тогда выражение для шума  $Ш_{c.3}$  примет вид:

$$Ш_{c.3} = S_{o.3} \cdot \frac{m}{\pi} \left( \frac{R_c}{R_{3.o}} \right)^2 \cos \theta(\varphi, n, t) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) k(\lambda) \tau(\lambda) Noise(\lambda) \exp(-q(\lambda)) d\lambda, \quad (14)$$

С учетом (5-11, 13,14) получено выражение функции «отношение сигнал/шум» в общем виде:

$$\frac{C}{Ш} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \exp(-q(\lambda) \cdot l) d\lambda}{l^2 (Ш_c + Ш_l + Ш_{c.3} + Ш_{л.3} + Ш_{u.3})}. \quad (15)$$

Так как функция «отношение сигнал/шум» обратно пропорциональна суммарному оптическому шуму, можно проанализировать ее зависимость от уровня освещенности, создаваемого Солнцем на земной поверхности, в течение суток и с учетом времени года (рис. 3).

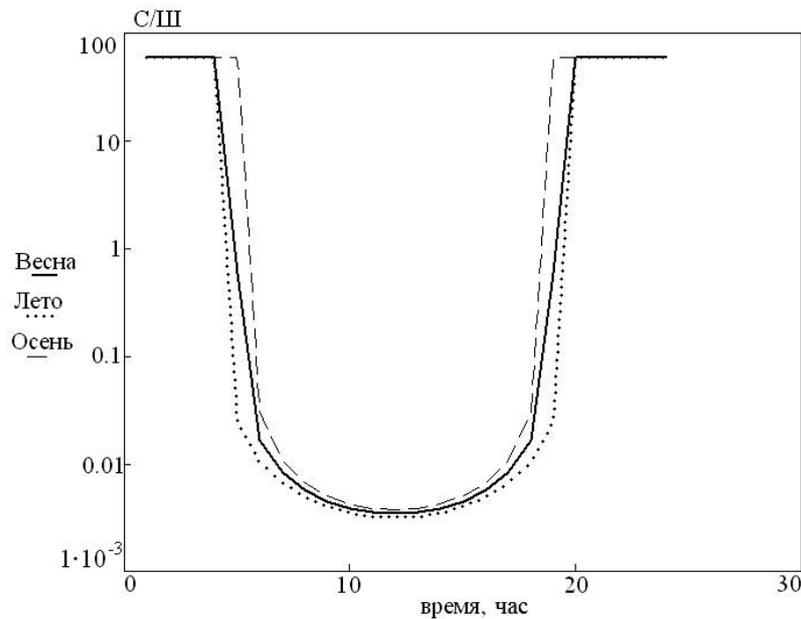


Рис. 3. График зависимости функции «отношение сигнал/шум» от энергетической освещенности земной поверхности в различное время года и суток для насекомых с трихромным видом зрения и селективным источником электромагнитного излучения (ксеноновая лампа,  $x = 5$  м;  $h_2 = 4$  м;  $S_1 = 0,2$ ;  $S_2 = 0,3$ ;  $S_3 = 0,5$ )

В данном случае не рассматриваются зимние месяцы года, так как они не совпадают с активной фазой жизнедеятельности насекомых.

Из анализа кривых на рисунке 3 видно, что функция «отношение сигнал/шум» принимает максимальное значение в ночное время суток, а затем резко убывает и в момент времени  $t = 12$  ч имеет минимальное значение. Отсюда следует, что режим естественной освещенности непосредственным образом влияет на моделирование объекта исследования.

При построении математической модели рассматривались различные типы распространенных селективных источников электромагнитного излучения оптического диапазона: ксеноновая лампа, галогенная лампа и лампа с вольфрамовой нитью накала. При этом спектральная излучательная способность последней была задана в виде:

$$r(\lambda, T) = r_0(\lambda, T) \cdot \xi(\lambda, T), \quad (16)$$

где  $r_0(\lambda, T)$  – излучательная способность вольфрама.

На основании экспериментальных данных было получено аналитическое выражение излучательной способности вольфрама  $r_0(\lambda, T)$  в температурном диапазоне  $600 \div 2600$  К и интервале длин волн от 0.3 до 0.76 мкм:

$$r_0(\lambda, T) = a_1(T) + \frac{a_2(T)}{1 + \left( \frac{\lambda^{p(T)}}{x_0(T)} \right)}, \quad (17)$$

$$\text{где } a_1(T) = -4.91 \cdot 10^{-5} T^4, \quad (18)$$

$$a_2(T) = -9.15 \cdot 10^{-5} T^4, \quad (19)$$

$$x_0(T) = -8.80 \cdot 10^{-5} T^4, \quad (20)$$

$$p(T) = 3.61 - 4.22 \cdot 10^{-4} T - 1.13 \cdot 10^{-7} T^2. \quad (21)$$

Исследованы зависимости функции «отношение сигнал/шум» и пропускной способности от температуры нити накала вольфрамовой лампы. Сделан вывод о том, что

на практике для достижения эффективной работы устройства достаточно ограничиться температурами не выше 1200 К, что положительно скажется на ресурсе работы источника излучения. В то же время показана зависимость производительности установки от геометрических параметров системы (рис. 4).

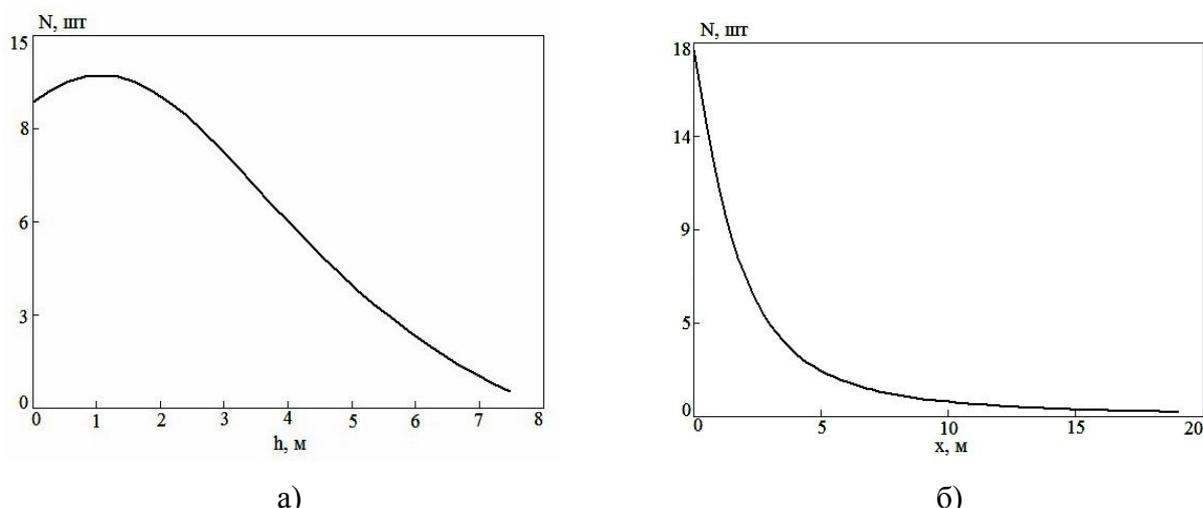


Рис. 4. Графики зависимости производительности установки от: а) высоты  $h$ ; б) расстояния  $x$  при температуре нити накала вольфрамовой лампы  $T = 1200$  К для насекомых с трихромным типом зрения в период ее работы с 8.00–9.00 ч, 20 мая 2013 г.

***Разработка алгоритма и программного обеспечения  
для расчета характеристик объекта исследования***

На основании математической модели объекта исследования был разработан алгоритм (рис. 5) и программное обеспечение для расчета его характеристик.

Алгоритм содержит следующие операции:

- 1) формирование баз данных: насекомых с различными типами зрения (монохромное, дихромное, трихромное), источников электромагнитного излучения (галогенная, ксеноновая, вольфрамовая лампа (при температуре  $T = 600 \div 2600$  К));
- 2) выбор комбинаций пар «насекомое – источник излучения»;
- 3) расчет основной информационной характеристики – функции «отношение сигнал/шум» ( $C/Ш$ );
- 4) структурная оптимизация системы из условия максимального значения  $C/Ш$ ;
- 5) вывод на печать полученных результатов: оптимальных параметров системы и графиков зависимостей от ее основных параметров значения функции «отношение сигнал/шум» ( $C/Ш$ ).

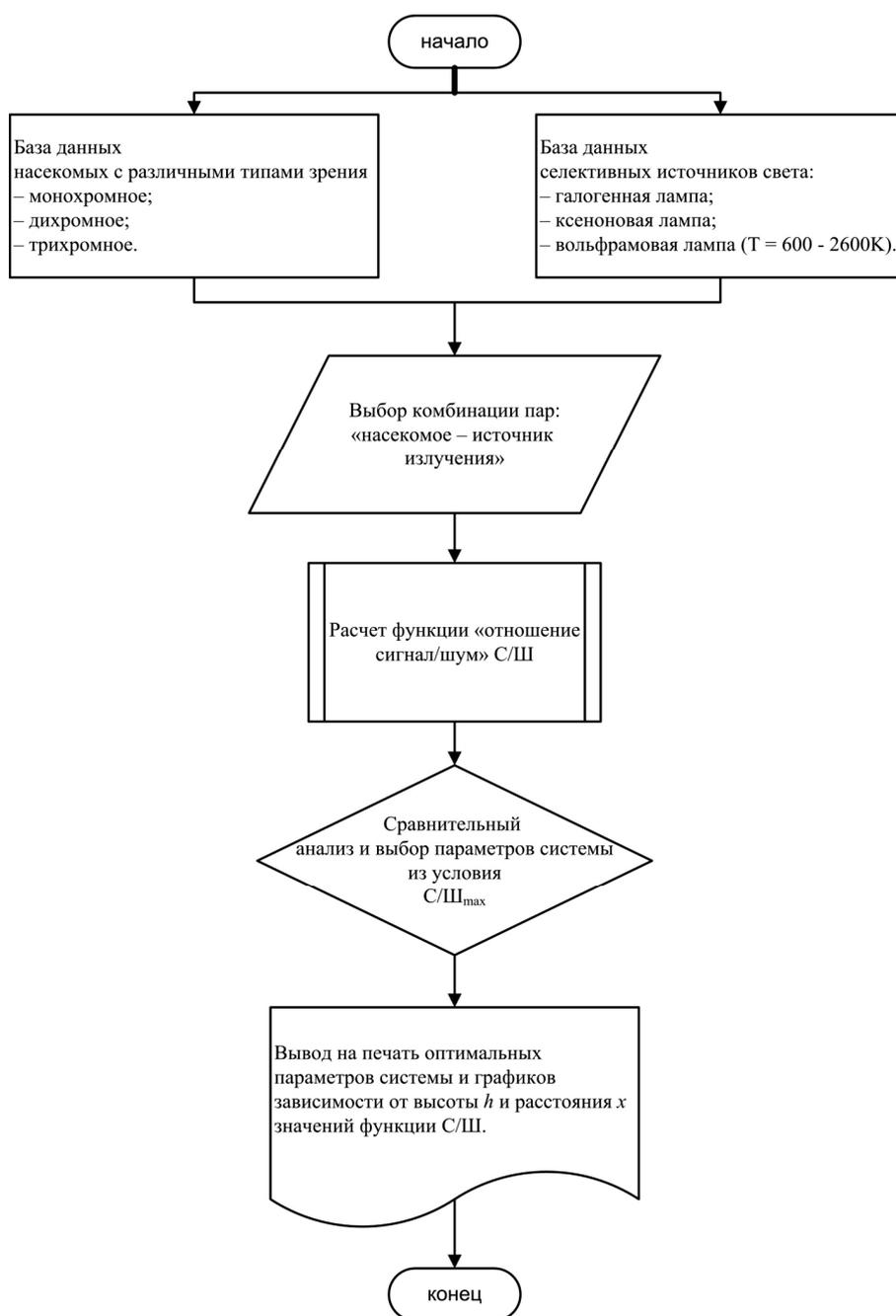


Рис. 5. Алгоритм для расчета характеристик объекта исследования

Разработанная математическая модель объекта позволяет рассчитать оптимальную высоту источника, расстояние между источником и приемником сигнала для различных сочетаний пары «селективный источник – насекомое с различными типами зрения». При расчетах характеристик объекта были получены значения отношения «сигнал/шум», которые являются недостаточными для разработки устройств с высокой производительностью.

Адекватность модели проверялась по  $F$ -критерию Фишера при помощи сравнения выборок определения полученных в ходе замеров и расчета количества пойманных в ловушку насекомых для того же интервала времени. Общее количество экспериментальных выборок составило 9, по 18 значений в каждой выборке. Значение  $F_{набл}$  (отношение большей исправленной дисперсии к меньшей) находилось в интервале от 1,05 до 1,55, учитывая, что при числе степеней свободы 17 и 16 и уровне значимости  $F_{кр} = 2,31$  отсутствуют основания отвергнуть нулевую гипотезу об адекватности модели.

Следовательно, разработанную математическую модель объекта исследования можно считать адекватной.

В третьей главе рассмотрена математическая модель объекта исследования с применением метода внешней (оптической) фильтрации, который является апробированным в оптико-электронике способом повышения эффективности систем передачи оптического сигнала. На рисунке 6 представлена структурная схема объекта исследования с применением метода внешней (оптической) фильтрации, в математической модели которого учтены типы зрения насекомого (моно-, ди- или трихромного), спектральная излучательная способность источника, пропускание атмосферы Земли, а также его географические, геометрические и ландшафтные характеристики.

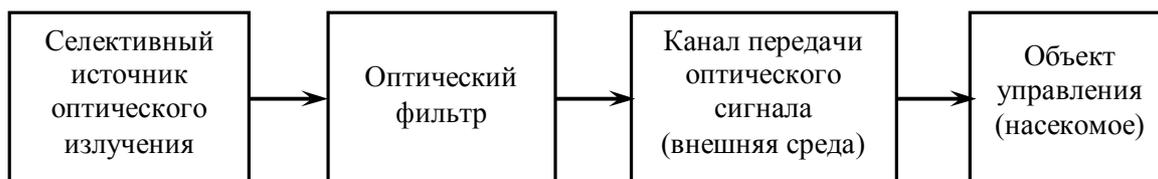


Рис. 6. Структурная схема объекта с применением метода внешней (оптической) фильтрации

О результативности выбора эффективных параметров объекта на основе разработанной математической модели можно судить по значению величины  $\psi = \frac{\Pi_2}{\Pi_1}$ , где  $\Pi_2$  и  $\Pi_1$  – пропускные способности канала передачи информации в системах с оптическим фильтром и без него, соответственно.

#### ***Математическая модель объекта исследования с применением внешней (оптической) фильтрации***

Для объекта с применением метода внешней (оптической) фильтрации выражение для оптического сигнала примет вид:

$$C_\phi = S_{o.з} \cdot \frac{m}{l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot f(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \exp(-q(\lambda) \cdot l) d\lambda, \quad (22)$$

где  $f(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания фильтра.

Наиболее распространенными моделями оптических фильтров являются:

- фильтр, спектральный коэффициент пропускания которого описывается функцией Гаусса:

$$f(\lambda) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma}\right)^2\right], \quad (23)$$

- фильтр, спектральный коэффициент пропускания которого описывается функцией Лоренца:

$$f(\lambda) = \frac{a}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta}\right)^2}, \quad (24)$$

а также прямоугольный фильтр и фильтры с верхней и нижней границами:

$$f(\lambda) = \begin{cases} 0, \lambda < \lambda_n \\ const, \lambda \geq \lambda_n \\ const, \lambda \leq \lambda_с \\ 0, \lambda > \lambda_с \end{cases} \quad (25)$$

В этом случае оптический шум, обусловленный отражением искусственного излучения от земной поверхности, определяется выражением:

$$(\text{Ш}_{\text{и.з}})_{\phi} = S_{\text{о.з}} \cdot \frac{m}{h_2^2 \cdot \pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot f(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \text{Noise}(\lambda) \exp(-q(\lambda)) d\lambda, \quad (26)$$

а функция «отношение сигнал/шум» имеет вид:

$$\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right)_{\phi} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot f(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \exp(-q(\lambda) \cdot l) d\lambda}{l^2 (\text{Ш}_c + \text{Ш}_l + \text{Ш}_{\text{с.з}} + \text{Ш}_{\text{л.з}} + (\text{Ш}_{\text{и.з}})_{\phi})}. \quad (27)$$

**Алгоритм и программное обеспечение для расчета характеристик объекта исследования с применением метода внешней (оптической) фильтрации**

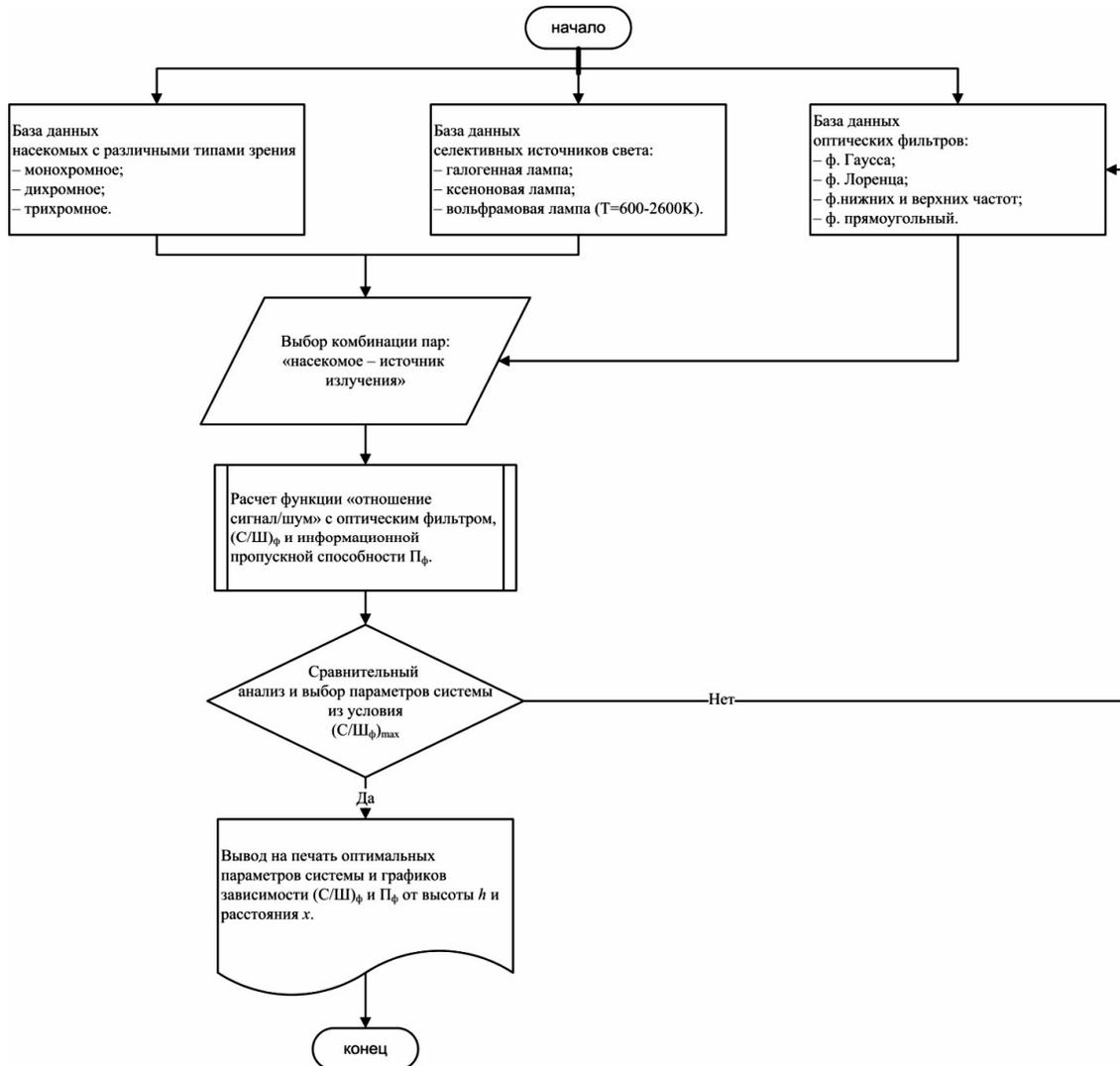


Рис. 7. Алгоритм расчета характеристик объекта исследования с применением метода внешней (оптической) фильтрации

На основе разработанной математической модели объекта с применением метода внешней (оптической) фильтрации построен алгоритм, который позволяет рассчитать его основные характеристики с учетом всех влияющих факторов (рис. 7).

Алгоритм содержит следующие операции:

- 1) формирование баз данных насекомых с различными типами зрения, источников электромагнитного излучения и оптических фильтров;
- 2) выбор комбинаций пар «насекомое – источник излучения»;
- 3) расчет основных характеристик – функции «отношение сигнал/шум»  $(C/Ш)_\phi$  и пропускной способности канала передачи информации  $P_\phi$ ;
- 4) структурная оптимизация системы передачи оптического сигнала насекомым из условия максимального значения  $(C/Ш)_\phi$ ;
- 5) реализация выполнения пп. 1–5 алгоритма после обращения к базе данных оптических фильтров;
- 6) вывод на печать результатов расчета оптимальных параметров системы, а также графиков зависимостей  $(C/Ш)_\phi$  и  $P_\phi$  от ее основных параметров.

Разработанный программный комплекс позволяет рассчитать эффективные параметры объекта исследования и, в конечном итоге, решить задачу его структурной и параметрической оптимизации.

Расчеты показали, что полосовые фильтры и фильтры нижних/верхних частот хотя и дают увеличение значения функции «отношение сигнал/шум» и пропускной способности канала передачи информации, однако более перспективно применение оптических фильтров Лоренца и Гаусса, которые в сочетании с селективными источниками излучения значительно, почти на порядок, увеличивают значение критерия эффективности системы и, соответственно, производительности установки (рис. 8).

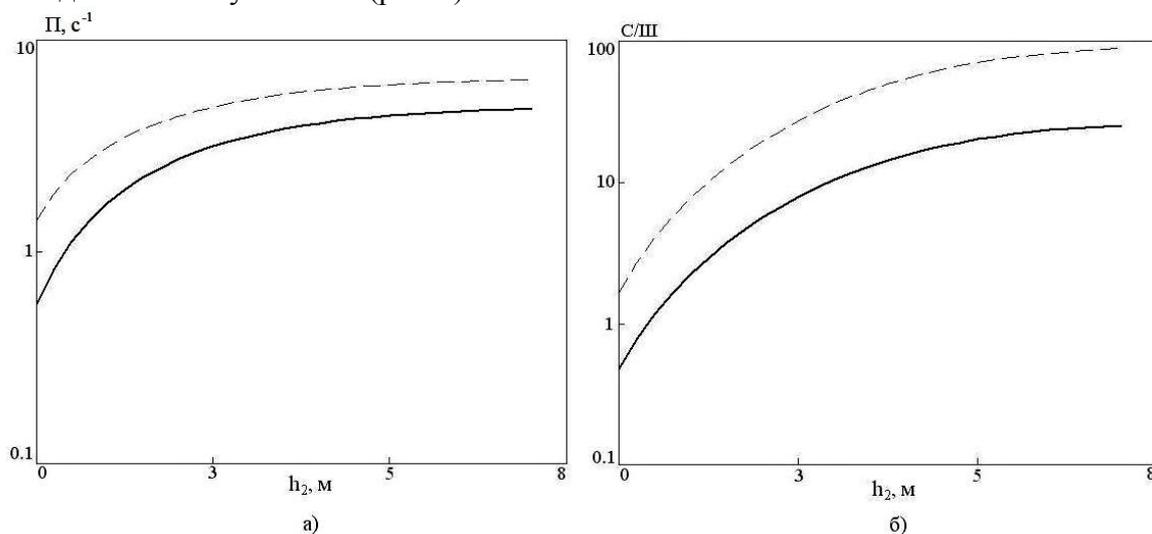


Рис. 8. Графики зависимости от высоты  $h_2$  расположения селективного источника света (ксеноновая лампа) над поверхностью Земли: а) информационной пропускной способности; б) функции «отношение сигнал/шум» для насекомых с монохромным типом зрения без применения (—) фильтра и с применением (----) фильтра Гаусса ( $\lambda_0 = 350\text{нм}$ ,  $\sigma = 200\text{нм}$ )

Разработанная математическая модель объекта с применением внешней (оптической) фильтрации позволила исследовать характеристики и рассчитать его эффективные параметры. Результаты моделирования, представленные на графиках (рис. 8), свидетельствуют об увеличении значения функции «отношение сигнал/шум» и пропускной способности канала передачи информации, что подтверждает вывод об эффективности применения на этапе проектирования метода внешней (оптической) фильтрации. В качестве примера приведены сравнительные результаты расчетов

характеристик объекта исследования для насекомых с монохромным типом зрения без и с применением метода внешней (оптической) фильтрации сигнала (табл.).

Таблица. Характеристики объекта исследования для насекомых с монохромным типом зрения

Фильтр	С/Ш	$\Pi_1$	$(C/Ш)_\phi$	$\Pi_2$	$\psi$
<b>Галогенная лампа</b>					
Гаусс ( $\lambda_0 = 400\text{нм}, \sigma = 300\text{нм}$ )	0,02	0,029	0,11	0,151	<b>5,5</b>
Лоренц ( $\lambda_0 = 500\text{нм}, \Delta = 250\text{нм}$ )			0,6	0,678	<b>30</b>
<b>Ксеноновая лампа</b>					
Гаусс ( $\lambda_0 = 400\text{нм}, \sigma = 150\text{нм}$ )	0,09	0,124	0,85	0,89	<b>9,4</b>
Лоренц ( $\lambda_0 = 450\text{нм}, \Delta = 350\text{нм}$ )	$4 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$	0,04	<b>6,25</b>
<b>Вольфрамовая лампа при <math>T=1200\text{K}</math></b>					
Гаусс ( $\lambda_0 = 400\text{нм}, \sigma = 250\text{нм}$ )	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$9,76 \cdot 10^{-3}$	0,014	<b>2,5</b>
Лоренц ( $\lambda_0 = 350\text{нм}, \Delta = 350\text{нм}$ )			$10^{-2}$		<b>26</b>
<b>Вольфрамовая лампа при <math>T=2600\text{K}</math></b>					
Гаусс ( $\lambda_0 = 400\text{нм}, \sigma = 250\text{нм}$ )	$2,12 \cdot 10^{-2}$	0,03	$9,56 \cdot 10^{-2}$	0,132	<b>4,51</b>
Лоренц ( $\lambda_0 = 350\text{нм}, \Delta = 350\text{нм}$ )			0,1	0,148	<b>4,71</b>

**Проектирование эффективных технических систем  
на основе разработанной математической модели объекта исследования**

В четвертой главе приведены результаты комплексного исследования и проектирования технических систем, отличающихся своей эффективностью, селективностью и высокой производительностью. К ним относятся системы защиты от насекомых-вредителей и борьбы с кровососущими насекомыми, в частности:

- роботизированный комплекс для борьбы с колорадским жуком;
- механизированный комплекс для привлечения саранчи и переработки ее в кормовую массу для рыб и птиц;
- устройство для биологической защиты от кровососущих насекомых.

Работа указанных технических систем основана на предложенной математической модели объекта исследования, позволяющей рассчитать эффективные параметры их элементов.

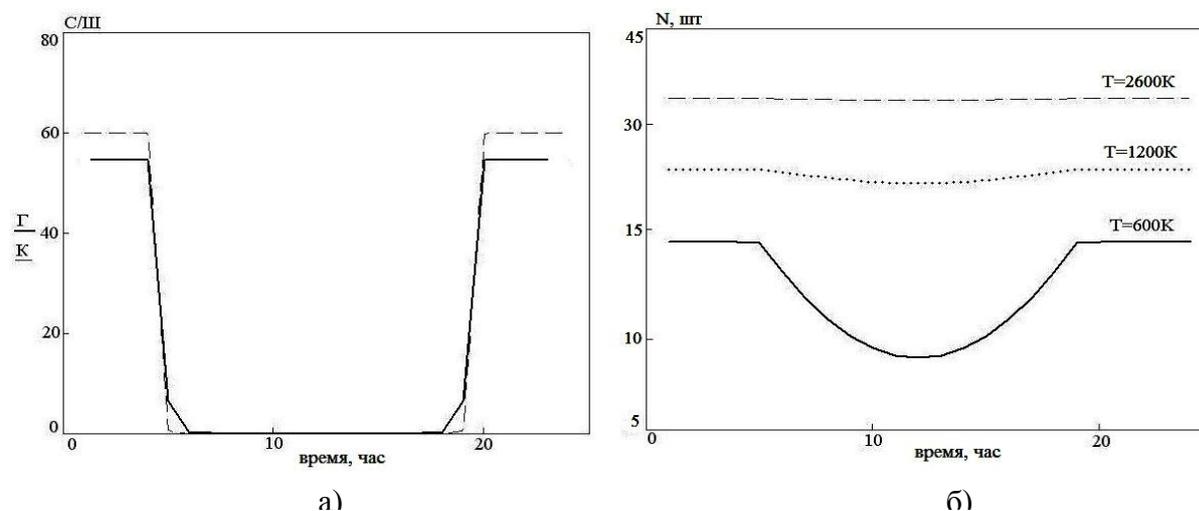


Рис. 9. Графики зависимости: а) функции «отношение сигнал/шум» с использованием галогенной и ксеноновой ламп; б) производительности установки с применением вольфрамовой лампы при различных температурах для насекомых с трихромным видом зрения от времени суток

К числу таких параметров относятся: максимальное расстояние от источника оптического излучения до насекомого, высота размещения технической системы над поверхностью Земли, оптимальная температура нити накала вольфрамовой лампы, временные интервалы функционирования механизированного комплекса для привлечения саранчи в течение суток (рис. 9), параметры оптических фильтров в случае применения систем с внешней (оптической) фильтрацией сигнала.

Из анализа графиков на рисунке 9 следует, что при использовании в качестве источников излучения ламп различного типа рабочий период механизированного комплекса ограничен диапазонами:

- от 0.00 до 5.00 и от 18.00 до 24.00 ч – для ксеноновой лампы;
- от 0.00 до 4.00 и 19.00 до 24.00 ч – для галогенной лампы.

Производительность установки значительно меняется в течение дня при температурах ниже 1200 К, а затем увеличивается и остается практически постоянной при температурах выше 1200 К. Однако при температуре нити накала вольфрамовой лампы порядка 2600 К ресурс ее работы значительно сокращается.

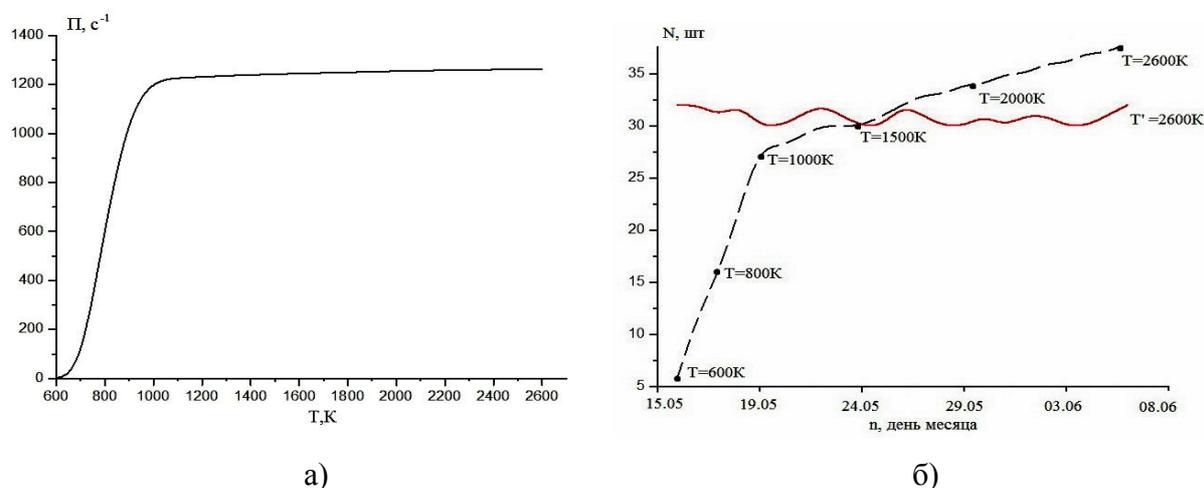


Рис. 10. Графики зависимости: а) расчетной пропускной способности канала передачи информации от температуры накала вольфрамовой лампы; б) количества насекомых, пойманных в ловушки в различные дни месяца при постоянной (—) и меняющейся (---) температурах нити накала вольфрамовой лампы для насекомых с трихромным типом зрения

Для проверки теоретических расчетов были проведены эксперименты, в которых использовались две ловушки, отличающиеся тем, что в одной из них температура накала нити вольфрамовой лампы оставалась постоянной, порядка 2600 К, а в другой изменялась в диапазоне от 600 до 2600 К (рис. 10). Результаты эксперимента свидетельствуют о достаточно удовлетворительном совпадении экспериментальных и расчетных данных по математической модели.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа систем передачи оптического сигнала насекомым разработана математическая модель объекта с учетом особенностей их типа зрения, геометрических и физических параметров, особенностей ландшафта, широты местности, времени года и суток, позволяющая выполнить его структурную и параметрическую оптимизацию, в результате которой в несколько раз увеличивается ресурс селективного источника излучения и суточный рабочий режим установки.

2. Разработаны алгоритмы и реализованы комплексы проблемно-ориентированных программ, отличающиеся использованием баз данных селективных источников и насекомых с различными типами зрения, а также особенностей ландшафта местности для проведения вычислительного эксперимента и моделирования объекта исследования.
3. Показано, что применение внешней (оптической) фильтрации в системах передачи оптического сигнала насекомым позволяет в среднем на 20 % повысить производительность установки.
4. На основе разработанной математической модели объекта исследования спроектированы технические системы для передачи оптического сигнала насекомым, обладающие повышенной производительностью.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах из перечня ВАК РФ

1. Лихтер, А. М. Математическое моделирование световых полей в системах управления поведением насекомых / А. М. Лихтер, Ю. А. Плешкова // *Естественные науки*. – 2010. – № 3 (32). – С. 188–192.
2. Плешкова, Ю. А. Модель процесса передачи оптической информации в системах управления поведением насекомых / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // *Экологические системы и приборы*. – 2010. – № 12. – С. 24–27.
3. Плешкова, Ю. А. Моделирование зависимостей информационных и энергетических характеристик систем управления поведением насекомых от их геометрических параметров / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // *Экологические системы и приборы*. – 2011. – № 2. – С. 27–32.
4. Плешкова, Ю. А. Моделирование влияния режима естественной освещенности на процесс передачи оптической информации насекомым / Ю. А. Плешкова, А. У. Джалмухамбетов, А. М. Лихтер // *Естественные науки*. – 2011. – № 1 (34). – С. 35–39.
5. Плешкова, Ю. А. Моделирование характеристик канала передачи оптической информации с учетом особенностей ландшафта местности / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2011. – № 1 (13). – С. 65–71.
6. Плешкова, Ю. А. Программная реализация алгоритмов расчета характеристик процесса передачи оптического излучения насекомым / Ю. А. Плешкова // *Известия ЮФУ. Технические науки. Проблемы математического моделирования, супервычислений и информационных технологий*. – 2012. – № 6. – С. 174–178.
7. Плешкова, Ю. А. Управление поведением насекомых с помощью оптической фильтрации / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // *Проблемы управления*. – 2012. – № 6. – С. 51–55.
8. Плешкова, Ю. А. Повышение эффективности процесса передачи оптической информации насекомым с применением метода внешней фильтрации / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2012. – № 3 (19). – С. 62–71.

**Публикации по теме диссертации в других изданиях**

9. Плешкова, Ю. А. Влияние особенностей ландшафта местности на характеристики оптического канала передачи информации насекомым / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // Экокультура и фитобиотехнологии улучшения качества жизни на Каспии : материалы Международной конференции с элементами научной школы для молодежи (7–10 декабря 2010 г.). – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2010. – С. 56–60.
10. Плешкова, Ю. А. Исследование зависимости информационных и энергетических характеристик процесса передачи оптического излучения насекомым от режима естественной освещенности / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // Экокультура и фитобиотехнологии улучшения качества жизни на Каспии : материалы Международной конференции с элементами научной школы для молодежи (7–10 декабря 2010 г.). – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2010. – С. 81–85.
11. Лихтер, А. М. Математическое моделирование энергетических и информационных характеристик элементов систем управления поведением насекомых / А. М. Лихтер, Ю. А. Плешкова, Ю. Н. Рогожина, И. Т. Шагаутдинова // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерений : материалы Российской конференции с международным участием УКИ-10 (18–20 октября 2010 г.). – Москва : ИПУ РАН, 2010. – С. 28-31.
12. Плешкова, Ю. А. Математическое моделирование процесса передачи оптической информации насекомым с использованием излучателя типа «серое тело» / Д. А. Кирюхина, Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // Человек и животные : материалы VI Международной заочной конференции, посвященной 80-летию Астраханского государственного университета (май 2012 г.). – Астрахань : Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет», 2012. – С. 131–135.
13. Плешкова, Ю. А. Методы исследования процессов передачи оптической информации биологическим объектам / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // Фармацевтические и медицинские технологии : Международная научно-практическая конференция в рамках Московского международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития» (г. Москва, 20–22 марта 2012 г.). – Москва : Экспо-биохим-технологии ; РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012 – С. 358–363.
14. Плешкова, Ю. А. Математическое моделирование систем управления поведением насекомых с использованием метода оптической фильтрации / Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения : Российская конференция с международным участием УКИ'12 (г. Москва, 16–19 апреля 2012 г.). – Москва : ИПУ РАН, 2012. – С. 77–81.
15. Pleshkova, U. Mathematical modeling of the process of the optical information transmission to the insects / U. Pleshkova, A. Likhter // The advanced science open access journal. USA. –2011. – №4. – P.59-65.
16. Pleshkova, U.A. The methods of investigation of the optical information transfer to the biological objects/ U. A. Pleshkova, A.M. Likhter // Proceedings of the International Scientific Conference «Pharmaceutical and Medical biotechnology (Moscow: JSC “Expo-biochem-technologies”, D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology). – 2012, P. 344-352.

**Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

17. А. с. 2011612494 РФ. Программный комплекс для расчета характеристик канала передачи оптической информации дневным летающим насекомым / Ю. Н. Рогожина, И. Т. Шагаутдинова, Ю. А. Плешкова, А. М. Лихтер ; правообладатель Астраханский государственный университет. – № 2011610861 ; заявл. 11.02.2011 ; опубл. 25.03.2011.
18. А. с. 2012610365 РФ. Программный комплекс для расчета параметров канала с внешней фильтрацией при передаче оптической информации насекомым / А. М. Лихтер, Ю. А. Плешкова. – № 2011618794 ; заявл. 18.11.2011 ; опубл. 10.01.2012.
19. Пат. 93221 РФ. Устройство привлечения насекомых с использованием селективных источников электромагнитного излучения / Лихтер А. М., Глушкова К. Е., Лубянова Е. В., Ветрова А. А., Плешкова Ю. А., Шагаутдинова И. Т., Рогожина Ю. Н., Мамцев И. С. – № 2009114138 ; заявл. 14.04.2009 ; опубл. 27.04.2010.
20. Пат. 2417588 РФ. Способ биологической защиты от кровососущих насекомых и устройство для его осуществления / Ремзов Н. С., Дусалиев Р. М., Рогожина О. Н., Шагаутдинова И. Т., Плешкова Ю. А., Ветрова А. А., Лубянова Е. В., Глушкова К. Е., Лихтер А. М. – № 2009120243 ; заявл. 27.05.2009 ; опубл. 10.05.2011.