

# Cloud of Science

Том 3 № 4

Электронный журнал  
[www.cloudofscience.ru](http://www.cloudofscience.ru)

12+

---

# Электронный журнал Cloud of Science

Том 3. № 4

ISSN 2409-031X

*Тематика журнала:* Информатика; Автоматика и вычислительная техника; Математическое моделирование; Использование пакетов прикладных программ для решения инженерных и экономических задач; Компьютерное моделирование в естественных науках.

*Периодичность:* 4 номера в год.

Статьи проходят обязательное рецензирование.

**Статьи индексируются в базе данных РИНЦ  
(Российский индекс научного цитирования)**

Статьи принимаются в формате MS Word по электронной почте  
[e\\_nikulchev@mti.edu.ru](mailto:e_nikulchev@mti.edu.ru)

Приветствуются статьи с приложением в виде текстов программ, запускаемых программных модулей, роликов, анимации. Все приложения размещаются на странице номера журнала в сети Интернет и направлены на повышение восприятия материала и обоснованности выводов.

Статьи проходят независимое рецензирование двумя экспертами. Максимальное время экспертизы — один месяц с даты регистрации. Статья считается зарегистрированной после направления письма автору с указанием регистрационного номера. Статьи могут быть не приняты к публикации в журнале в случае отрицательных рецензий обоих рецензентов или при несоответствии тематике журнала. Отсутствие «научной новизны» не может являться основанием для отклонения рукописи.

## Редакционная коллегия

### Главный редактор

**Никульчев Е. В.**, д. т. н., профессор  
проректор, Московский технологический институт  
(Россия, Москва)

### Члены редколлегии

**Андрейчикова О. Н.**, д. т. н., профессор  
в. н. с., Центральный экономико-математический институт  
РАН (Россия, Москва)

**Анрианов Д. Е.**, д. т. н., доцент  
зав. каф., Владимирский государственный университет  
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (Россия, Муром)

**Баракнин В. Б.**, д. т. н., доцент  
в. н. с., Институт вычислительных технологий СО РАН,  
проф., Новосибирский государственный университет  
(Россия, Новосибирск)

**Барановский Н. В.**, к. ф.-м. н.  
доцент, Энергетический институт НИУ Томский политехниче-  
ский университет (Россия, Томск)

**Белов В. В.**, д. т. н., профессор  
профессор, Рязанский государственный радиотехнический  
университет (Россия, Рязань)

**Бубнов Г. Г.**, д. э. н., профессор  
ректор, Московский технологический институт  
(Россия, Москва)

**Веремей Е. И.**, д. ф.-м. н., профессор  
зав. каф., факультет ПМ-ПУ, Санкт-Петербургский государ-  
ственный университет (Россия, Санкт-Петербург)

**Винокур А. И.**, д. т. н., профессор  
директор института, Московский политехнический универси-  
тет (Россия, Москва)

**Вольнский А. А.**, PhD,  
professor (associate), Университет Южной Флориды  
(США, Тампа)

**Горяшко А. П.**, д. т. н., профессор  
профессор, Московский технологический институт  
(Россия, Москва)

**Демидова Л. А.**, д. т. н., профессор  
профессор, Рязанский государственный радиотехнический  
университет (Россия, Рязань)

**Жабко А. П.**, д. ф.-м. н., профессор  
зав. каф., факультет ПМ-ПУ, Санкт-Петербургский государ-  
ственный университет (Россия, Санкт-Петербург)

**Иглин С. П.**, к. т. н., профессор  
профессор, Харьковский политехнический институт  
(Украина, Харьков)

**Карпухин А. В.**, к. т. н., доцент  
в. н. с., Харьковский национальный университет радиоэлек-  
троник (Украина, Харьков)

**Ковшов Е. Е.**, д. т. н., профессор  
профессор, МГТУ «СТАНКИН» (Россия, Москва)

**Куанг Чинь Лыонг**, к. ф.-м. н.  
профессор, Университет Бинь Зьонг (СРВ, Хошимин)

**Ландэ Д. В.**, д. т. н., с. н. с.  
зав. отделом, Институт проблем регистрации информации  
НАН Украины, профессор, НТУУ Киевский политехнический  
институт (Украина, Киев)

**Лушников Б. В.**, к. т. н., доцент  
доцент, Юго-Западный государственный университет  
(Россия, Курск)

**Майков К. А.**, д. т. н., профессор  
профессор, МГТУ имени Н. Э. Баумана (Россия, Москва)

**Мещеряков В. А.**, д. т. н., доцент  
зав. каф., Омский филиал Финансового университета  
при Правительстве РФ (Россия, Омск)

**Мокрицкая Т. П.**, д. геолог. н., доцент  
профессор, Днепропетровский национальный университет  
им. Олесь Гончара (Украина, Днепропетровск)

**Мухамедиев Р. И.**, д. инж. н., профессор  
директор института, Казахский национальный исследовате-  
льский университет, (Казахстан, Алматы), проф. Института ме-  
неджмента информационных систем (Латвия, Рига)

**Осипов И. В.**,  
директор, i2study Inc. (США, Сан-Франциско)

**Очков В. Ф.**, д. т. н., профессор  
профессор, НИУ Московский энергетический институт  
(Россия, Москва)

**Патель Н.**, PhD, профессор,  
профессор, Технологический институт Бирла (Индия, Мерса,  
Ранчи)

**Плужник Е. В.**, DBA  
первый проректор, Московский технологический институт  
(Россия, Москва)

**Подольнец Л. А.**, д. э. н., профессор  
зав. каф., Санкт-Петербургский университет сервиса  
и экономики (Россия, Санкт-Петербург)

**Пылькин А. Н.**, д. т. н., профессор  
декан, зав. каф., Рязанский государственный радиотехнический  
университет (Россия, Рязань)

**Рогачев Г. Н.**, д. т. н., доцент  
профессор, Самарский государственный технический универ-  
ситет (Россия, Самара)

**Солдаткин В. И.**, д. ф. н., профессор  
вице-президент, Московский технологический институт  
(Россия, Москва)

**Сухомлин В. А.**, д. т. н., профессор  
зав. лаб., Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова (Россия, Москва)

**Тарасевич Ю. Ю.**, д. ф.-м. н., профессор  
зав. лаб., Астраханский государственный университет  
(Россия, Астрахань)

**Тютиков В. В.**, д. т. н., профессор  
проректор, Ивановский государственный энергетический  
университет (Россия, Иваново)

**Титов С. А.**, к. э. н., доцент  
Московский технологический институт  
(Россия, Москва)

**Федотов А. М.**, чл.-корр. РАН, д. ф.-м. н.,  
профессор  
профессор, Новосибирский государственный университет,  
г. н. с., Институт вычислительных технологий СО РАН  
(Россия, Новосибирск)

**Хранилов В. П.**, д. т. н., профессор  
зам. директора ИРИТ, Нижегородский государственный  
технический университет имени Р. Е. Алексеева  
(Россия, Нижний Новгород)

**Хо Дак Лок**, PhD, prof.  
ректор, Хошиминский Технологический Институт  
(СРВ, Хошимин)

**Штейнберг В.** PhD, prof.  
профессор, Научный институт имени Х. Вейцмана  
(Реховот, Израиль)

**Черных И. В.**, д. т. н., доцент  
зав. каф., Уральский федеральный университет  
им. Б. Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург)

## Содержание

Том 3. № 4

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*В. Ф. Очков, А. В. Соколов, С. Д. Федорович, Л. Мекес*  
Путешествие от дома в школу по маршруту Ферма или Второе оптическое свойство гиперболы ..... 494

*В. Н. Агеев*  
О некоторых свойствах сопряженных круговых дуг ..... 518

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

*Л. А. Демидова, И. А. Клюева*  
Разработка SVM-классификатора с применением гибридных версий алгоритма роя частиц на основе поиска по сетке..... 528

### ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

*С. Э. Грегер, С. В. Поршнев*  
Метод объектно-ориентированного представления многоуровневых семантических моделей..... 548

*Р. Г. Сухарев, О. И. Лукьянчиков, Е. В. Плужник*  
Методы и средства профилирования и управления распределенными системами... 562

### ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*И. В. Осипов*  
Технические средства человеко-компьютерного взаимодействия TUI.  
Обзор и анализ возможностей использования в игрофикации ..... 572

*Л. Ю. Ворочаева, С. Ф. Ефимов, О. Г. Локтионова, Б. В. Лушников, С. Ф. Яцун*  
Моделирование движения летательного аппарата с машущим крылом ..... 603

*Е. Б. Баблюк, Ю. М. Берлад, А. Г. Летяго, А. П. Кондратов*  
Материалы тест-объектов для настройки авиационных оптико-электронных систем дистанционного зондирования земли ..... 617

*А. П. Кондратов, М. В. Коновалова, Е. П. Черкасов, И. А. Савенкова*  
Неразрушающая оценка параметров рельефной маркировки термоусадочных монтажных изделий для авиационной техники ..... 625

### ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

*А. С. Семенов*  
Механизм оценки технологических проектов с венчурной составляющей..... 635

## Путешествие от дома в школу по маршруту Ферма или Второе оптическое свойство гиперболы<sup>1</sup>

В. Ф. Очков\*, А. В. Соколов\*\*, С. Д. Федорович\*, Л. Мекес\*\*\*

\*Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

\*\*ГБОУ Лицей 1502 при МЭИ  
ул. Молостовых, 10А, Москва, 111555

\*\*\*Компания «Медтроник»  
Нидерланды

e-mail: ochkov@twf.mpei.ac.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрено решение задач оптимизации применительно к проблемам отражения и преломления луча света. Представлено численное и аналитическое решение алгебраических и дифференциальных уравнений линзы и фокусирующего зеркала в среде Mathcad. Показано, как современные программные средства могут легко и изящно решать оптические задачи. Аналитически решено обыкновенное дифференциальное уравнение плоско-выпуклой линзы. Подчеркнуто оптическое свойство гиперболы, базирующееся не на законе отражения, а на законе преломления света. Выведена формула коэффициента преломления материала плоскогиперболической линзы с совпадающими оптическим и геометрическим фокусами.

*Ключевые слова:* отражение и преломление света, оптический путь, принцип Ферма, принцип таутохронизма, закон Снеллиуса, пакет Mathcad, гипербола, парабола.

*Дворник приколачивал к дому флаг.*

*Прохожий спросил, что это значит.*

*Дворник ответил: «Это значит, что в городе праздник».*

*«А какой это праздник?», — спросил прохожий.*

*«А праздник такой, что наш математик нашел еще одно свойство гиперболы», — ответил дворник.*

*Прохожий, устыженный своим незнанием, растворился в воздухе.*

*Даниил Хармс. «Праздник», новая редакция*

Школьник или студент может добраться из дома или общежития до учебного заведения разными путями. Он может идти по улице, может пробираться через дворы и закоулки, может проехать часть дороги на общественном транспорте и т. д. Кратчайшее расстояние между двумя точками, как известно, прямая линия. Но да-

<sup>1</sup> Расчетные документы статьи можно скачать на <https://www.ptcusercommunity.com/message/465225>

леко не всегда можно и нужно перемещаться по прямой. Даже если нет явных препятствий в виде зданий, заборов и прочих преград, то перемещение по прямой даже в чистом поле не всегда оказывается самым оптимальным, если под оптимизацией понимать не сокращение расстояния, а минимизацию времени в пути. Ученики, опаздывая в школу, думают не о расстоянии, а о времени.

Давайте не будем голословными и для начала решим такую простенькую задачу: человек находится на открытой местности в точке А (рис. 1). Сгущаются тучи, гремит гром, вот-вот начнется гроза с ливнем... Нужно как можно быстрее добраться до точки В, где расположено некое укрытие: дом, беседка, навес... По какой траектории человеку бежать, если он стоит на газоне, перед домиком асфальт, а путь пересекает вспаханная полоса?

Эту типичную задачу оптимизации, где целевой функцией будет время перемещения от точки А к точке В, а переменными оптимизации — абсциссы точек С и D, мы решим в среде пакета Mathcad [1], который в настоящее время по ряду причин очень популярен у школьников, студентов, инженеров и научно-технических работников. Ординаты точек С и D заданы и отмечают прямые линии раздела участков «газон — пашня» и «пашня — асфальт», которые параллельны оси абсцисс. Скорость бега по газону (г), вспаханному полю (п) и асфальту (а) тоже заданы и, естественно, разные:  $v_a > v_g > v_p$ . Заданы также координаты начальной и конечной точек А и В.

На рис. 1 показано решение этой задачи с использованием встроенной в Mathcad функции **Minimize**. У нее переменное число аргументов. В нашей задаче их три: имя целевой функции  $t$  (time) и имена двух переменных оптимизации  $x_c$  и  $x_D$ . Функция **Minimize** по особому численному алгоритму [1] будет автоматически менять значения переменных оптимизации  $x_c$  и  $x_D$  так, чтобы целевая функция приняла минимальное значение. Значения переменных  $x_c$  и  $x_D$  при проведении поиска изменяются от некоторых исходных (первое предположение — см. рис 1), которые задаются самим пользователем, исходя из «физики» задачи. При значениях  $x_c$  и  $x_D$ , взятых для первого предположения, время бега от точки А к точке В равно 2 мин 50 с, а минимизация с помощью функции **Minimize** дает значение 2 мин 31 с. Но возникают законные сомнения, минимум ли это, нет ли более оптимального маршрута бега по трем ломаным отрезкам прямой? Ответ проверяется построением контурного графика и двух сечений поверхности целевой функции в точке минимума: все верно — минимум найден: он окружен линиями одного уровня и расположен в точках минимума двух кривых сечений по двум переменным оптимизации. Кривые сечения тут лишние, но они будут необходимы, когда переменных оптимизации будет больше двух: человек, например, бежит по газону, пашне,

болоту и потом уже по асфальту (три, а не две границы раздела фаз, три переменные оптимизации). Эта задача хороша тем, что в ней легко можно увеличивать число переменных оптимизации.

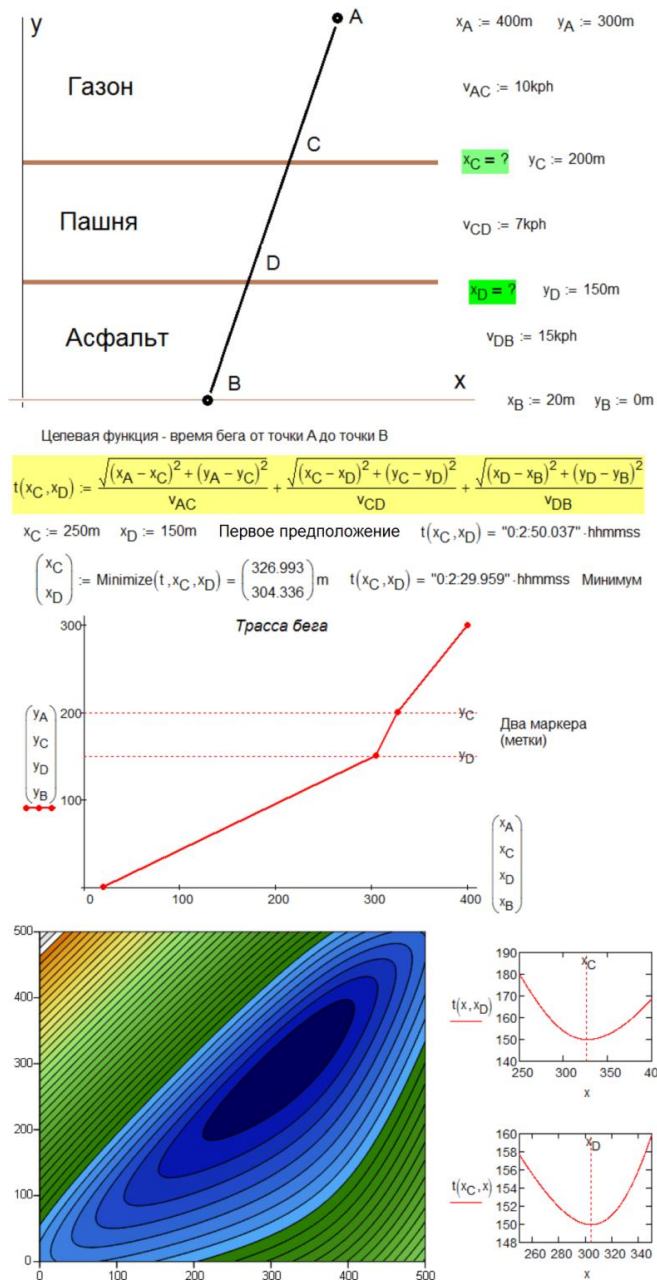


Рисунок 1. Задача о беге по газону, пашне и асфальту: оптимизация



*Примечание.* Пакет Mathcad — это не просто математический, а физико-математический пакет. При решении задач он оперирует не просто величинами, а физическими величинами — расстоянием, скоростью, временем и т. д. [2], что очень удобно при решении математических задач с физическим содержанием (задач математической физики). Пакет Mathcad, кстати, умеет оперировать величинами, имеющими десятичные единицы измерения, что показано на рис. 1, где значение времени выдается в часах, минутах, секундах и тысячных долях секунд. Мелочь, но приятно! Более существенная и уникальная возможность Mathcad — это решение дифференциальных уравнений (обыкновенных и в частных производных) с физическими величинами, и мы этим воспользуемся ниже.

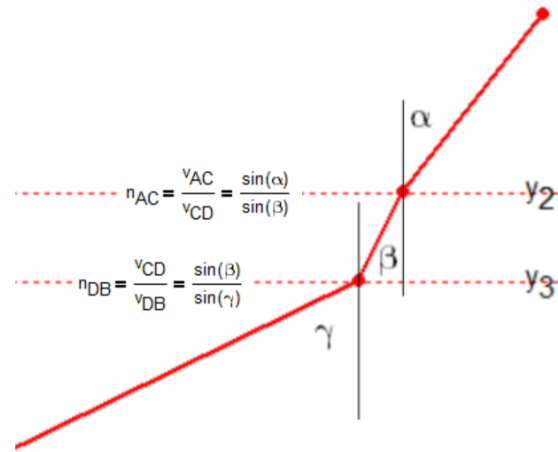
График в центре рис. 1 с ломаной кривой напоминает... «луч света в темном царстве» и заставляет вспомнить о знаменитом принципе геометрической оптики, сформулированном в 1662 г. великим Ферма: свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время. Этот путь называется оптическим путем. Отсюда и изломы прямых линий, определяемые скоростями света в разных средах на границе раздела. Если одну скорость поделить на другую (смежную), то мы получим так называемый относительный коэффициент преломления  $n$ , численно равный отношению синуса угла падения к синусу угла преломления (закон Снеллиуса) [3, 4].

На рис. 2 показан другой подход решению задачи о беге по газону, пашне и асфальту, сводящийся к поиску не минимума функции двух аргументов, а корня системы двух нелинейных алгебраических уравнений<sup>2</sup>: отношение синусов углов на двух границах раздела равно отношению значений скоростей бега по обе стороны от границы. А синус угла — это, как известно, отношение длины противолежащего катета к гипотенузе, высчитываемой по теореме Пифагора.

Функция **Find**, задействованная в решении на рис. 2, опять же особым численным алгоритмом [1] с опорой на первое предположение так будет менять значения своих аргументов, чтобы система уравнений, записанная после ключевого слова **Given** (дано), превратилась в систему тождеств. Проверка правильности решения, как и на рис. 1, ведется графически: две кривые, соответствующие двум уравнениям системы, пересекаются в искомой точке (см. нижний график на рис. 2). И еще одна дополнительная проверка — сравнение ответов на рис. 1 и 2.

<sup>2</sup> Под алгебраическими уравнениями сейчас все чаще и чаще подразумевают не только собственно уравнения, куда входят полиномы, но и трансцендентные (показательные, логарифмические, тригонометрические) уравнения, отделяя их тем самым (словом «алгебраические») от дифференциальных, интегральных, интегродифференциальных и прочих экзотических уравнений. Такие уравнения сейчас решают в основном численно, а не аналитически, применяя один и тот же алгоритм для разных систем уравнений. Это еще одна причина такой терминологической неточности.





$x_A := 400\text{m}$	$y_A := 300\text{m}$	$v_{AC} := 10\text{kph}$
$x_C = ?$	$y_C := 200\text{m}$	$v_{CD} := 7\text{kph}$
$x_D = ?$	$y_D := 150\text{m}$	$v_{DB} := 15\text{kph}$
$x_B := 20\text{m}$	$y_B := 0\text{m}$	

$$n_{AC} := \frac{v_{AC}}{v_{CD}} = 1.429 \qquad n_{DB} := \frac{v_{CD}}{v_{DB}} = 0.467$$

$x_C := 200\text{m}$      $x_D := 150\text{m}$     Первое предположение

Given

$$\frac{\frac{x_A - x_C}{\sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2}}}{\frac{x_C - x_D}{\sqrt{(x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2}}} = n_{AC} \qquad \frac{\frac{x_C - x_D}{\sqrt{(x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2}}}{\frac{x_D - x_B}{\sqrt{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2}}} = n_{DB}$$

$$\begin{pmatrix} x_C \\ x_D \end{pmatrix} := \text{Find}(x_C, x_D) = \begin{pmatrix} 326.993 \\ 304.336 \end{pmatrix} \text{m}$$

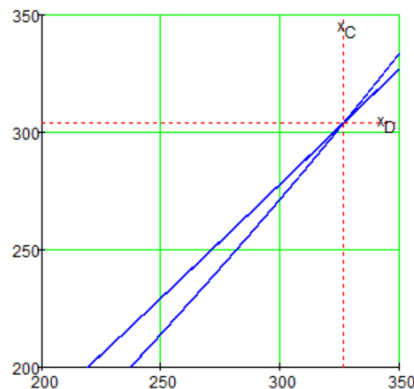


Рисунок 2. Задача о беге по газону, пашне и асфальту:  
решение системы двух «оптических» уравнений

*Примечание.* Скорость света в атмосфере и, следовательно, коэффициент преломления зависит от плотности воздуха, его температуры, влажности и других факторов. Из-за этого лучи света на небе могут как школьники «путешествовать» по весьма замысловатым маршрутам. Отсюда и миражи, какие можно видеть в пустыне или над гладью моря (см. рис. 3), где наблюдатель на берегу видит корабль («Летучий голландец») не на поверхности воды, а высоко в небе, да еще и перевернутым.

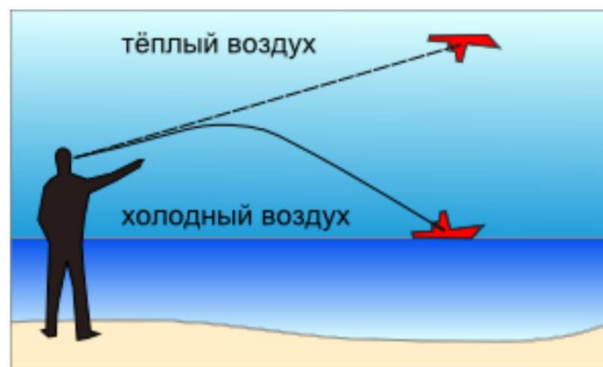


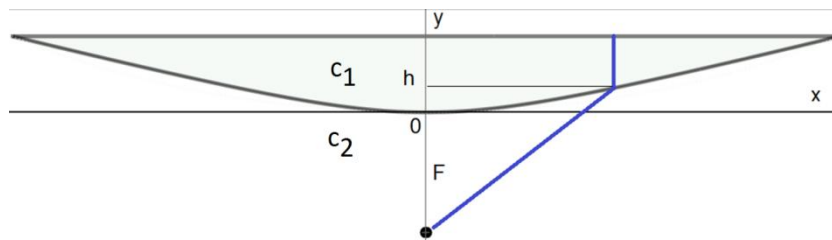
Рисунок 3. Физическое объяснение миража (взято из Интернета)

Рассмотрим финальный момент путешествия из дома в школу.

Школьники входят в ворота школы и направляются к ее дверям, что напоминает явление... фокусирования света линзой. Давайте смоделируем этот оптический прибор, опираясь еще на один важный принцип геометрической оптики, непосредственно вытекающий из принципа Ферма, — на принцип таутохронизма: оптические пути лучей света от точечного источника до его изображения одинаковы и свет затрачивает одно и то же время на прохождение этих оптических путей [3]. Пакет Mathcad элегантно и просто может решить и такую более сложную задачу о линзе (см. рис. 4).

Плоско-выпуклая линза (см. схему на рис. 4) имеет в центре толщину  $h$  и фокусное расстояние  $F$ . Линза сделана из прозрачного материала с относительным коэффициентом преломления  $n$ . Спрашивается: какую форму должна иметь нижняя поверхность линзы, чтобы параллельный пучок света, сошелся в фокусе? Левая часть уравнения на рис. 4 под схемой линзы, которое решается относительно переменной  $F$ , — это время прохождения света по оси  $X$  через стекло со скоростью  $c_1$  (первое слагаемое) и через воздух со скоростью  $c_2$  (второе слагаемое). Правая же часть — это время прохождения света уже не через центр линзы, а в произвольном месте, отстоящем от центра на расстоянии  $x$ . Тут также два слагаемых для стекла и

воздуха. Решение преобразуется так, чтобы можно было вычленить коэффициенты  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_0$ , формирующие выражение для уравнения второго порядка. По этим коэффициентам высчитывается инварианта  $D$  и определитель  $\Delta$ , значения которых указывают на то, что мы получили гиперболу, а не параболу или эллипс: значение  $F$  больше нуля (равно единице), а значение  $n$  больше единицы (равно двум).



$$\frac{h}{c_1} + \frac{F}{c_2} = \frac{h-y}{c_1} + \frac{\sqrt{(F+y)^2 + x^2}}{c_2} \xrightarrow[\text{solve, } F]{\text{substitute, } c_2 = n \cdot c_1} \frac{x^2 - n^2 \cdot y^2 + y^2}{2 \cdot y - 2 \cdot n \cdot y}$$

$$F = \frac{x^2 - n^2 \cdot y^2 + y^2}{2 \cdot n \cdot y - 2 \cdot y} \quad \text{или} \quad F \cdot (2 \cdot n \cdot y - 2 \cdot y) = x^2 - n^2 \cdot y^2 + y^2$$

$$2 F \cdot (n-1) \cdot y - x^2 + (n^2 - 1) \cdot y^2 = 0$$

$$a_{11} \cdot x^2 + a_{12} \cdot x \cdot y + a_{22} \cdot y^2 + 2 a_1 \cdot x + 2 a_2 \cdot y + a_0 = 0$$

$$n := 2 \quad F := 1$$

$$a_{11} := -1 \quad a_{12} := 0 \quad a_{22} := n^2 - 1 \quad a_1 := 0 \quad a_2 := F \cdot (n-1) \quad a_0 := 0$$

$$D := \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix} = -3 \quad D < 0 \quad \Delta := \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_1 \\ a_{12} & a_{22} & a_2 \\ a_1 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = 1 \quad \Delta \neq 0 \quad \text{Hyperbola}$$

Рисунок 4. Вывод выражения для линзы с опорой на принцип таутохронизма

В задаче на рис. 4 пакет Mathcad помог нам решить исходное уравнение линзы относительно переменной  $F$  и рассчитать инварианту  $D$  и определитель  $\Delta$ . Остальное (преобразование уравнения к стандартному виду плоской кривой второго порядка) делалось вручную. Это обычная практика работы в среде математических программ, позволяющая оптимальным образом решать задачи, сочетая скорость и быстродействие компьютера со смекалкой человека.

Известно, что гипербола обладает таким «отражательным» оптическим свойством: луч, исходящий из источника света, находящегося в фокусе  $F_1$  первой ветви гиперболы, после отражения от второй ветви гиперболы направлен так, как будто он исходит из фокуса  $F_2$  второй ветви гиперболы — см. рис 5, поясняющий это. (На этом рисунке изображение гиперболы повернуто на  $90^\circ$  и сдвинуто начало ко-

ординат. Это требует каноническая форма записи уравнения гиперболы. К закону отражения света мы вернемся чуть ниже.)

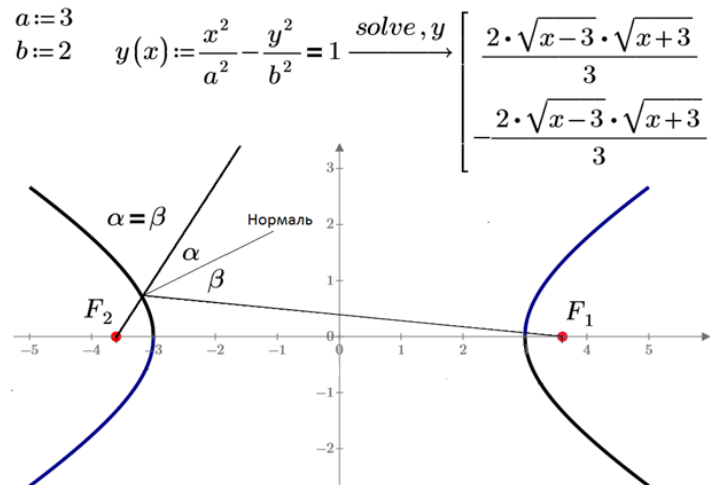


Рисунок 5. Отражательное свойство гиперболы

Выкладки на рис. 4 дают основание говорить и о «преломляющем» оптическом свойстве гиперболы: параллельный пучок света, пройдя через плоско-выпуклую линзу, сойдется в одной точке, если в выпуклой поверхности линзы «сидит» гипербола (см. рис. 5). Наша линза не просто плоско-выпуклая, а плоскогиперболическая [4].

*Примечание.* «Отражательное» свойство гиперболы (рис. 5) прописано почти во всех справочниках (бумажных и электронных), где дается информация об этой кривой второго порядка. А вот об «преломляющем» свойстве гиперболы (см. рис. 4) эти справочники молчат. Это можно объяснить тем, что закон отражения света прост и понятен — угол падения равен углу отражения (см. ниже) без особых оговорок. С преломлением же света не все так просто. Коэффициент преломления света  $n$  мы рассматривали как константу, не зависящую ни от длины волны луча света (явление хроматической аберрации), ни от интенсивности светового потока, ни от положения луча в преломляющей субстанции. Но тут впору вспомнить стеклянную призму, которая разлагает белый свет на цветные составляющие и помогает, например, определять состав вещества методами спектроскопии. Это позволило, например, найти гелий сначала на Солнце, а только потом в атмосфере Земли. Нужно всегда помнить о том, что реальные линзы сводят пучок света не в точку, а в некий радужный сгусток световой энергии, с которым играют солнечными днями мальчишки,

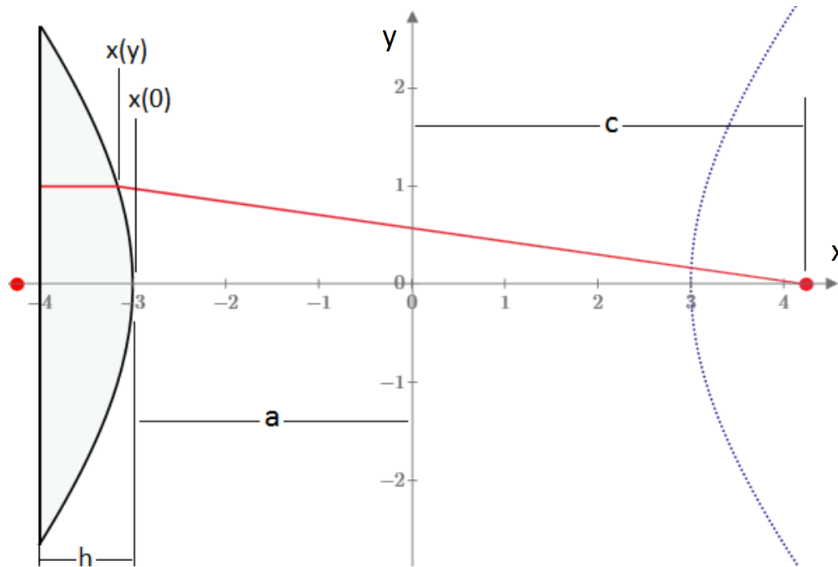
выжигая на дереве всякие фигурки. Герои романа Жюль Верна «Таинственный остров», например, добыли огонь с помощью двух стекол, снятых с часов (см. сноску 3). Эту импровизированную линзу они наполнили водой и скрепили ее края глиной. Так было сделано настоящее зажигательное стекло, которое сосредоточило лучи солнца на охапке сухого мха и воспламенило его. Почему мало упоминаются гиперболы в их связи с линзами? Дело тут в значительных несферических абберациях (хроматическая абберация, коматическая абберация) несферических линз при больших диаметрах («апертурах»). При малых же диаметрах линз их гиперболическая поверхность аппроксимируется первым квадратичным членом и превращается в сферическую.

Итак, у гиперболы есть два фокуса, а у плоскогиперболической линзы — свой оптический фокус. Как они соотносятся. При каком значении коэффициента преломления материала такой линзы два эти фокуса совпадут?

На рис. 6 показана попытка решения этой новой задачи с опорой на тот же принцип таутохронизма. Уравнение времени на прохождение светом двух оптических путей взято из рис. 4, но линза, как и на рис. 5, повернута на  $90^\circ$ . Кроме того, начало координат на рис. 4 и 6 разное. Это сделано опять же для того, чтобы можно было работать с канонической формой записи гиперболы:  $x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$ . В уравнение на рис. 6 вставлено фокусное расстояние, равное сумме двух важных параметров гиперболы  $a + c$ . Уравнение после соответствующих замен переменных решается относительно переменной  $n$  — коэффициента преломления материала линзы. Получена формула, в которую входит переменная  $y$ , которая в принципе не должна влиять на значение  $n$ . Численное исследование функции  $n(a, b)$  показывает, что коэффициент преломления материала нашей линзы не зависит от значения переменной  $y$ , а у линзы, образованной равнобочной гиперболой, где  $a = b$ , этот коэффициент равен квадратному корню из двух. При расчетах по формуле для  $n(a, b)$  значение  $y$  можно принимать за единицу или за единичный метр, если учитываются единицы измерения в формуле. Но дальнейший анализ формулы на рис. 6 показал, что она численно совпадает с формулой для еще одной важной характеристики гиперболы — эксцентриситет ( $\epsilon$ ). В расчете на рис. 7 показаны две поверхности, построенные по двум функциям двух аргументов, которые совпали.

Строгое аналитическое доказательство того, что коэффициент преломления линзы равен эксцентриситету соответствующей гиперболы, показано на рис. 8. Для этого пришлось ввести в схему линзы некоторые дополнительные обозначения:  $d_1$  и  $d_2$  — директрисы гиперболы;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — расстояния от произвольной точки гиперболы до директрисы;  $r_1$  и  $r_2$  — так называемый фокальный радиус (расстояние от произвольной точки гиперболы до фокуса). По одному из свойств гиперболы,

для любой точки гиперболы отношение ее фокального радиуса к расстоянию до соответствующей директрисы есть величина постоянная, равная эксцентриситету. Но суть решения осталась прежней: поиск корня уравнения оптических путей лучей света.



$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \xrightarrow{\text{solve, } x} \begin{bmatrix} \frac{a \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}{b} \\ \frac{a \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}{b} \end{bmatrix} \quad x(y) = -\frac{a \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}{b} \quad x(0) = -a \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

*substitute,  $c_2 = n \cdot c_1$*

$$\frac{h}{c_1} + \frac{a+c}{c_2} = \frac{h - \left(-a + \frac{a \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}{b}\right)}{c_1} + \frac{\sqrt{y^2 + \left(a+c + \left(-a + \frac{a \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}{b}\right)\right)^2}}{c_2} \xrightarrow{\text{substitute, } c = \sqrt{a^2 + b^2}} \dots$$

*solve, n*  
*simplify, max*

$$\dots \rightarrow \frac{b \cdot \left(a + \sqrt{a^2 + b^2} - \sqrt{2 \cdot a^2 + b^2 + y^2 + \frac{a^2}{b^2} \cdot y^2 + \frac{2 \cdot a}{b} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}\right)}{a \cdot (b - \sqrt{b^2 + y^2})}$$

$$y := \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

$$n(a, b) := \frac{b \cdot \left(a + \sqrt{a^2 + b^2} - \sqrt{2 \cdot a^2 + b^2 + y^2 + \frac{a^2}{b^2} \cdot y^2 + \frac{2 \cdot a}{b} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{b^2 + y^2}}\right)}{a \cdot (b - \sqrt{b^2 + y^2})}$$

$$n(4, 4) = \begin{bmatrix} 1.414 \\ 1.414 \\ 1.414 \end{bmatrix} \quad n(2, 3) = \begin{bmatrix} 1.803 \\ 1.803 \\ 1.803 \end{bmatrix} \quad n(3, 2) = \begin{bmatrix} 1.202 \\ 1.202 \\ 1.202 \end{bmatrix}$$

Рисунок 6. Расчет плоскогиперболической линзы с совпадающим оптическим и геометрическим фокусами

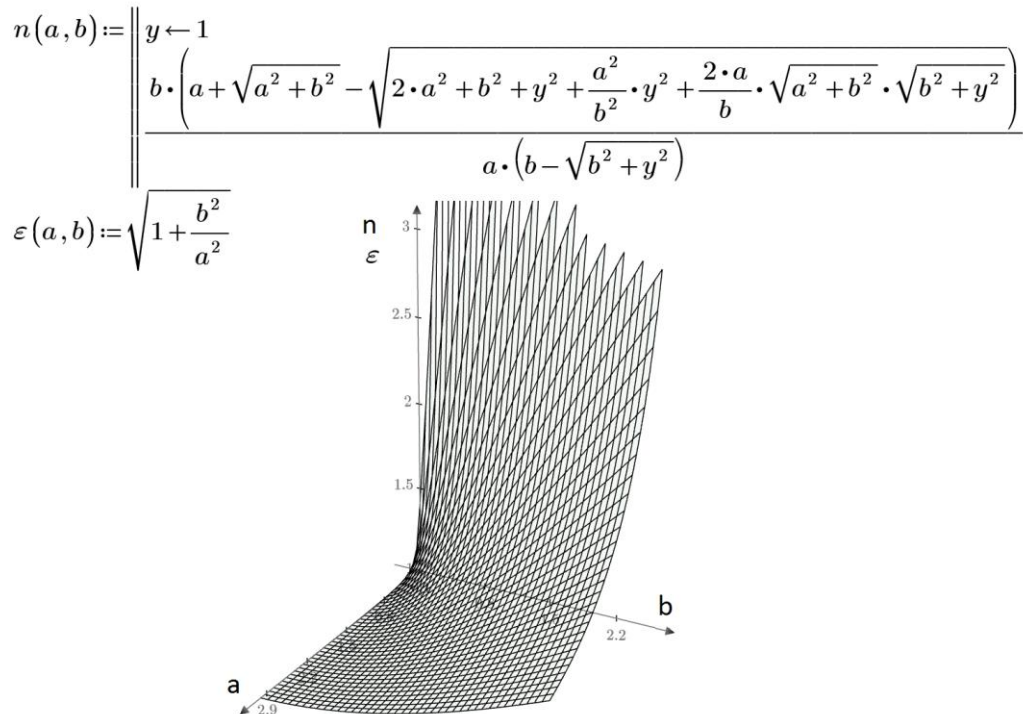


Рисунок 7. Коэффициент преломления и эксцентриситет гиперболы

Исходя из расчетов на рис. 6–8, можно еще раз и более точно сформулировать второе оптическое свойство гиперболы. Параллельный пучок света, пройдя через плоско-выпуклую линзу, сойдется в одной точке, если выпуклую поверхность линзы определяет одна из ветвей гиперболы. Если при этом коэффициент преломления материала линзы численно совпадает с эксцентриситетом гиперболы, то оптический фокус такой плоскогиперболической линзы совпадет с геометрическим фокусом второй ветви гиперболы.

Рис. 9 поясняет это новое второе «преломляющее» свойство гиперболы.

Идея для сувенира с математическим смыслом. Можно изготовить плоскогиперболическую линзу с эксцентриситетом гиперболы, равным показателю преломления стекла. Эту линзу нужно вставить в оправу, на футляре которой выгравированы вышеприведенные выкладки и пояснения к ним. Получится лупа для математика, (физика, оптика...), который будет ею пользоваться при чтении математических и физических справочников с мелким шрифтом. Практической пользы от такой линзы никакой, но такой «артобъект» будет очень занимательным для интересующихся физикой и математикой. А в комнате повесить картину в цвете из рис. 1 (контурный график), назвав ее «Супрематическая линза». Еще лучше подобрать



(«сварить») для такой линзы оптическое стекло с коэффициентом преломления, равным квадратному корню их двух (1.414...). В этом случае поверхность линзы будет определять равнобочная гипербола.

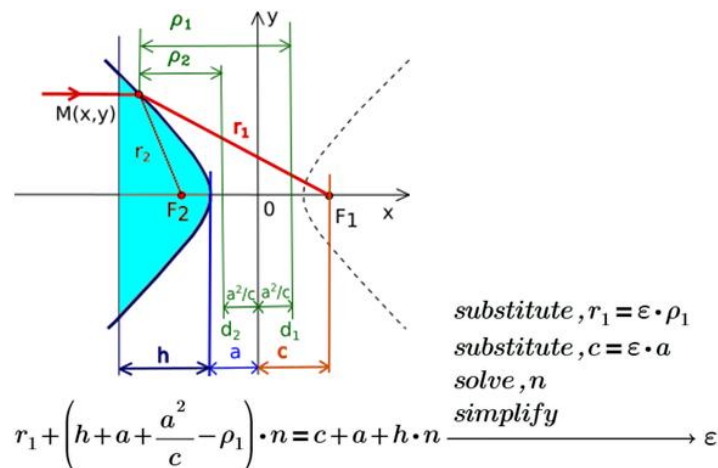


Рисунок 8. Строгое доказательство верности второго оптического свойства гиперболы

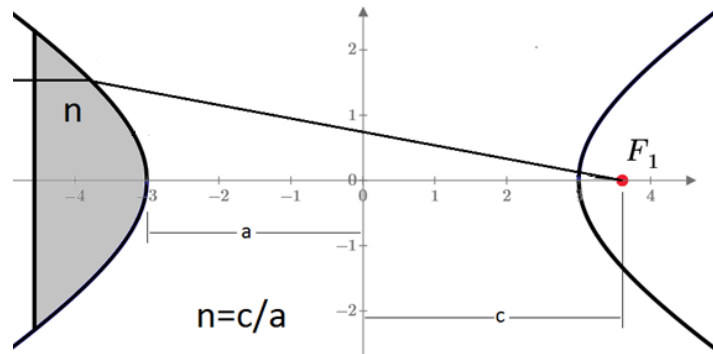


Рисунок 9. Второе оптическое свойство гиперболы

Пакет Mathcad может решать не только алгебраические (см. рис. 2, 4 и 8), но и дифференциальные уравнения. Правда, не аналитически, а только численно. На рис. 10 показано решение нашей задачи о плоско-выпуклой линзе через составление системы уравнений — одного дифференциального и двух алгебраических.

Первое алгебраическое уравнение на рис. 10 — это математическая запись закона Снеллиуса с коэффициентом преломления  $n$ , который мы уже задействовали в решении на рис. 4, а второе выражает тангенс «нижнего» угла  $\beta - \alpha$  через отношения длины противолежащего катета  $x$  к длине прилежащего катета  $F + y(x)$ . Диф-

дифференциальное же уравнение — это геометрическая интерпретация производной функции одного аргумента.

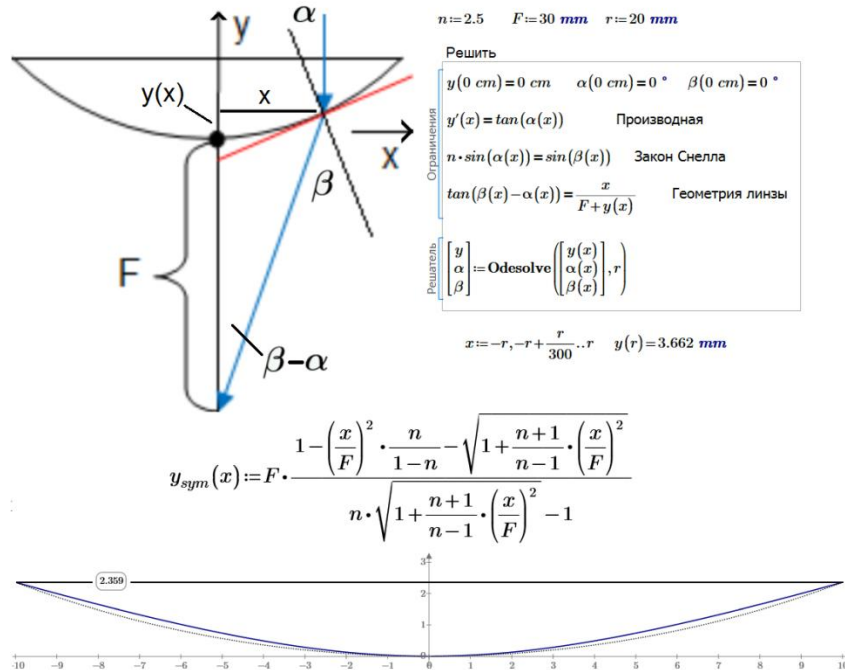


Рисунок 10. Решение дифференциального уравнения линзы

*Примечание.* Мы плоскую сторону линзы на рис. 10 намеренно повернули вверх (см. также рис. 4) для упрощения задачи. На сайте с файлами статьи читатель найдет решение и для линзы, повернутой выпуклой стороной вверх — к параллельному пучку лучей света. Так обычно и поступают, выжигая, например, в солнечный день на дереве с помощью плоско-выпуклой линзы [5]. При таком положении линзы нужно будет рассматривать преломление луча света не один, а два раза — на границах «воздух-стекло» и «стекло-воздух»<sup>3</sup>. В случае, показанном на рис. 4 и 10, преломление света происходит только на нижней поверхности.

<sup>3</sup> В прошлом веке во многих семьях были линзы с четырьмя границами раздела сред «воздух-стекло (вернее, оргстекло)», «воздух-жидкость», «жидкость-стекло» и «стекло-воздух». Их ставили перед телевизорами, экраны которых в те времена были чуть больше почтовой открытки (см. <https://www.ptcusercommunity.com/thread/130193>). Наполняли же эти линзы водой или глицерином, у которого коэффициент преломления выше.

И еще один уточняющий момент. Мы рассматриваем не объемную, а плоскую задачу. Форма линзы — это поверхность, полученная вращением найденной плоской кривой вокруг оси ординат, что часто забывают отметить.

Линза, которая должна собрать параллельный пучок света в фокусе, не имеет сферической формы, она, как говорят оптики, асферическая (асфера — это несфера): см. график на рис. 10, где под найденной кривой линзы  $y(x)$  дополнительно пунктиром прорисована дуга окружности, проходящая через нижнюю точку линзы и ее края. Асферические линзы обычно изготавливаются так: вращающуюся сферическую заготовку (см. пунктирную линию на рис. 10) шлифуют до получения нужной асферической формы (см. сплошную линию на рис. 10). Но тем не менее почти вся школьная и вузовская оптика, как часть учебной дисциплины «Физика», пользуется допущением, что линзы имеют сферические поверхности, а сам процесс обучения направлен не на освоение базовых понятий оптики, основанных на общих физических законах, а на вывод или заучивание готовых формул для расчета фокусных расстояний, диоптрий, коэффициентов увеличения/уменьшения, аберраций и прочих сугубо профессиональных оптических характеристик и явлений. Вернее, так. Школьная физика просто рассматривает априори такую поверхность линз, которая обеспечивает схождение парааксиального пучка в точке, называемой фокусом. Задача нахождения формы этой поверхности для широкого пучка просто не ставится. И это понятно: когда развивалась наука «Геометрическая оптика» и создавались соответствующие учебные курсы, не было удобных, простых и доступных средств решения уравнений — алгебраических и дифференциальных. Теперь же они есть и это позволяет менять методику и содержание учебной дисциплины «Оптика».

Сплошная кривая на графике рис. 10 — это не одна кривая, а целых три, которые слились в одну. Первая кривая  $y(x)$  отображает численное решение задачи посредством встроенной в Mathcad функции **Odesolve**, вторая — формулу (гиперболлу), найденную решением на рис. 4, а третья  $y_{sym}(x)$  — аналитическое (символьное) решение системы дифференциально-алгебраических уравнений, показанной на рис. 10. Эту «страшную» формулу для функции  $y_{sum}(x)$  вывел соавтор статьи из Голландии — родины великого Христиана Гюйгенса, внесшего большой вклад и в развитие оптики. У этого соавтора была старая добрая 11-я версия Mathcad с символьным движком от Maple, а не от MuPAD, что и позволило решить задачу. Ну и, конечно, помог тут интеллект и сноровка голландца. А дело было так. Необходимо было найти асимптоты сплошной, «численной» кривой на рис. 10, т. е. найти конус, в который будет вписываться линза при бесконечном увеличении ее диаметра при фиксированном фокусе. Еще, кстати, не было известно, что это гипербола. Нахождение предела выражения  $y(x)/x$  оказалось невозможным, так как «численная» функция  $y(x)$  определена только в оговоренном диапазоне от центра линзы до ее

края. Да и вообще, функция  $y(x)$  — это не «настоящая» функция, а некая псевдо-функция, созданная интерполяцией табличных значений, сгенерированных численным методом решения обыкновенного дифференциального уравнения. Задача о конусе линзы была вывешена на форуме пользователей Mathcad. На запрос и откликнулся Лук Мекес, который решил задачу кардинально — нашел аналитическое решение, а у полученного выражения определил требуемые асимптоты: см. <https://www.ptcusercommunity.com/thread/130129>. Формулы на рис. 4 и 8 отличаются видом, но это одна и та же зависимость, в чем мы уже убедились, построив совпадающие графики.

Если при решении оптических задач с линзами допустить, что синус и тангенс угла равны самому углу (а это, как известно, можно делать при малых значениях углов<sup>4</sup>), то решение существенно упрощается<sup>5</sup> и, главное, становятся доступными многие аналитические и матричные решения, на которых базируются большинство оптических формул и которыми «мучают бедных школьников и студентов». Замена синусов углов в уравнении Снеллиуса на сами углы позволит свести три уравнения на рис. 10 к одному дифференциальному уравнению

$$y'(x)(n-1) = \frac{x}{F+y(x)};$$
$$y(0) = 0,$$

которое несложно решить аналитически (например, через разделение переменных или непосредственно через сайт Интернета), а также, конечно, и численно (в среде Mathcad). Эти решения размещены на сайте с файлами статьи.

Оптический принцип Ферма можно приложить и к другому важному закону — закону отражения света. На рис. 11 показано аналитическое решение задачи о минимуме времени прохождения луча света от точки 1 к отражающей поверхности (точка 2) и далее к точке 3. Создается целевая функция  $t$  с аргументом  $x$  (горизонтальный отступ точки 2 от точки 1), у которой ищется значение аргумента, при котором производная равна нулю. Ведь, если функция гладкая и непрерывная, то в точке ее минимума производная равна нулю. Выкладки на рис. 11 показывают, что минимум функции  $t(x)$  имеет место тогда, когда тангенс угла падения  $\alpha$  равен тангенсу угла отражения  $\beta$ . Следовательно, и угол  $\alpha$  равен углу  $\beta$ . Кстати, отражение и преломление «идут рука об руку»: свет, падая, например, на стеклянную поверх-

<sup>4</sup> Такое допущение, кстати говоря, делается и при рассмотрении математического маятника, нить которого отклоняется от горизонтали на угол, значение которого не превышает 5–7 градусов. Многие помнят формулу периода колебания маятника, но мало кто знает, что она относится к математическому, а не физическому маятнику.

<sup>5</sup> В задачах на рис. 2 и 4, кстати говоря, такое упрощение усложнит решение — придется вводить в расчет арксинус.

ность частично отражается, а частично уходит с преломлением вглубь стекла и соотношение этих частей зависит от угла падения.

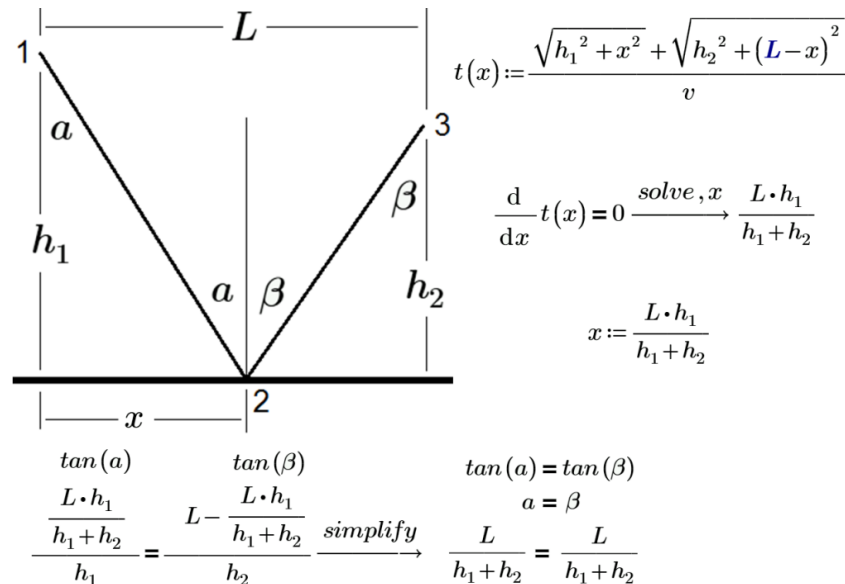


Рисунок 11. Доказательство закона отражения света

Есть такой роман Алексея Толстого «Гиперболоид инженера Гарина». Один из изобретателей лазера, Нобелевский лауреат Чарльз Таунс признался, что на создание этого устройства его вдохновил английский перевод этого романа «The Garin Death Ray». В Википедии можно прочесть, что «более правильное название устройства Гарина — параболоид. Толстой знал об этом, однако выбрал слово «гиперболоид» из-за более внушительного звучания». Но в этом устройстве могли быть не только зеркала, но и линзы — плоскогиперболические, например. Тогда название романа вполне оправдано.

Гиперболоид, вернее, гиперболу, обрисовывающую нижний край линзы, мы уже смоделировали. Давайте смоделируем и параболоид — параболическое вогнутое зеркало (см. рис. 12).

На рис. 12 фактически повторены выкладки, показанные на рис. 4, но не для фокусирующей плоско-выпуклой линзы, а для фокусирующего вогнутого зеркала. Выкладки на рис. 12 выдали не гиперболу, а параболу, у которой есть и другое неоптическое геометрическое толкование. Если на плоскости нарисовать прямую и поставить возле нее точку, то парабола — это геометрическое место точек, равноудаленных от заданной прямой (ее называют директрисой параболы) и заданной точкой (ее называют фокусом параболы). Если же не будет равноудаленности (от-

ношение расстояния от точек кривой до фокуса и от точек кривой до директрисы не будет равно единице), то мы получим другие две плоские кривые второго порядка: эллипс (эксцентриситет меньше единицы) или наш случай – две ветви гиперболы (эксцентриситет больше единицы). Интересно будет поработать с «линзами», материал которых имеет коэффициент преломления меньше единицы: в массиве стекла находится пузырек воздуха в виде эллипсоида, шара или какого-то другого тела. Гиперболу, параболу и не рассмотренный в этой статье эллипс называют коническими кривыми так как они получаются при рассечении прямого кругового конуса плоскостью. По эллиптическим, параболическим и гиперболическим орбитам, кстати, движутся небесные тела, за которыми мы следим с помощью зеркальных и линзовых телескопов [6]. Преобразованию этих кривых к каноническому виду, у которого не шесть (см. выше рис. 4 и 12), всего лишь два (гипербола и эллипс) или даже один (парабола, окружность как частный случай эллипса) коэффициент, уделяется много внимания в вузовской математике.

$$F+h = \sqrt{(F-y)^2 + x^2} + h-y \xrightarrow{\text{solve, } y} \frac{x^2}{4 \cdot F}$$

$$y - \frac{1}{4F} \cdot x^2 = 0 \quad F := 1$$

$$a_{11} := -\frac{1}{4F} \quad a_{12} := 0 \quad a_{22} := 0 \quad a_1 := 0 \quad a_2 := \frac{1}{2} \quad a_0 := 0$$

$$D := \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix} = 0 \quad D = 0 \quad \Delta := \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_1 \\ a_{12} & a_{22} & a_2 \\ a_1 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = 0.063 \quad \Delta \neq 0$$

$$f(x, y) := a_{11} \cdot x^2 + a_{12} \cdot x \cdot y + a_{22} \cdot y^2 + 2 a_1 \cdot x + 2 a_2 \cdot y + a_0$$

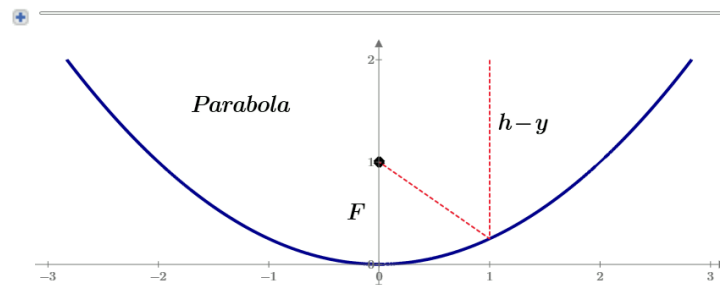


Рисунок 12. Вывод уравнения параболического зеркала

*Примечание.* Параболу, вернее, параболоид (поверхность, полученную вращением параболы вокруг оси, перпендикулярной директрисе и проходящей через фокус) можно увидеть не только на стенах домов, где смотрят спутниковое TV, но и... зимой на ледяных горках. Дело в том, что когда-то давно одному заводу, выпускающему такие антенны для нужд военных, поручили изготавливать

и конверсионную продукцию. Руководство завода недолго думая решило прикрепить к этой тарелке две кожаные петли. Получилась отличная ледянка. А вот еще один возможный товар народного потребления с «параболой внутри», идея еще одного «артобъекта»: стеклянная или фарфоровая ваза для фруктов в виде параболоида, с круглой подставкой-директрисой и ножкой, пронизывающей в центре параболоид и заканчивающейся в фокусе ручкой. Такая ваза будет хорошо смотреться в доме математика — будет о чем поговорить с гостями за столом. Ее можно расписать не традиционными узорами, а математическими выкладками, связанными с параболой или гиперболой [7]. А сами узоры можно рассматривать с помощью вышеописанной «математической» лупы.

Форму фокусирующего зеркала, как и форму линзы, можно найти через решение не алгебраического, а дифференциального уравнения — см. рис. 13–16.

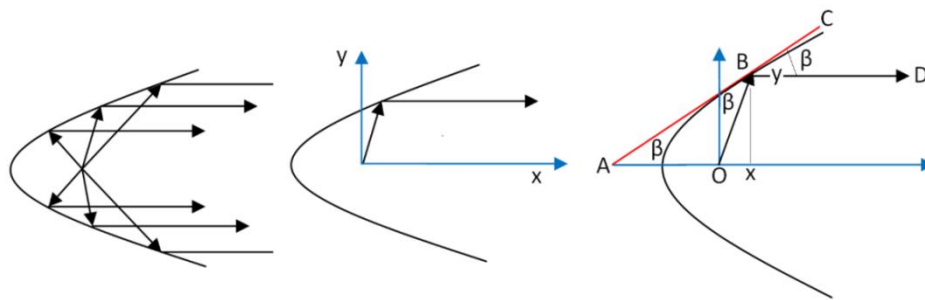


Рисунок 13. Схема зеркала прожектора

В приближении геометрической оптики, т. е. пренебрегая всеми волновыми световыми явлениями и заменяя реальный световой поток с его корпускулярно-волновым дуализмом большим количеством лучей (см. левую схему на рис. 13), выведем форму отражающей поверхности зеркала, при которой лучи, исходящие из одной точки (из фокуса), после отражения от зеркала превратятся в параллельный пучок лучей. Рассмотрим один из таких лучей (средняя схема). Введем оси координат  $x$  (горизонталь) и  $y$  (вертикаль). Определим, какой функции  $y(x)$  должна отвечать поверхность зеркала, вернее, одна линия (сечение) на этой поверхности в указанных осях координат. Это можно сделать, если на правой схеме рис. 13 выделить два треугольника — один с вершинами  $ABO$ , а второй с вершинами  $OBx$ , у которых одна общая сторона  $OB$ . Эта «общность сторон» и позволит нам вывести дифференциальное уравнение фокусирующего вогнутого зеркала.

На поверхности зеркала выполняется закон отражения (см. рис. 8 и правую схему на рис. 13): угол  $ABO$  равен углу  $CBD$  (обозначим эти углы как  $\beta$ ). С другой стороны, угол  $CBD$  равен углу  $BAO$ , так как луч  $BD$  параллелен оси  $x$ . Следова-



тельно, треугольник АВО равнобедренный: длина его стороны АО равна длине стороны ОВ (следствие закона отражения лучей). Поскольку точка В имеет координаты  $x$  и  $y$ , то исходя из определения тангенса (отношение катета противолежащего к катету прилежащему):  $\operatorname{tg} \beta = \frac{y}{AO+x}$ , следовательно  $AO = \frac{y}{\operatorname{tg} \beta} - x$ , но (вспомним о геометрической сути производной)  $\operatorname{tg} \beta = \frac{dy}{dx}$ , поэтому  $AO = \frac{y}{dy/dx} - x$ . С другой стороны из теоремы Пифагора следует, что  $OB = \sqrt{y^2 + x^2}$ . Получаем уравнение, в котором присутствует производная функции, т. е. дифференциальное уравнение:

$$\frac{y}{dy/dx} - x = \sqrt{y^2 + x^2}.$$

Введем дополнительное обозначение для значения  $x$  при  $y$  равном нулю:  $y(F) = 0$ . Решим полученное дифференциальное уравнение аналитически (рис. 14 — сайт wolframalpha.com) и численно (рис. 15 — Mathcad).

На графике рис. 16 прорисованы две совпадающие кривые — одна толстая  $y(x)$  и другая тонкая  $y_{\text{sym}}(x)$  внутри толстой для визуальной проверки правильности численного решения. Такой прием мы уже использовали в решении на рис. 10. Если на рис. 16 дорисовать нижнюю половинку кривой и поменять местами оси, то и получится искомая парабола вида  $x^2/(4F) - F$ : будет доказано еще раз (см. рис. 12), что наше вогнутое фокусирующее зеркало — это параболоид, а не гиперболоид.

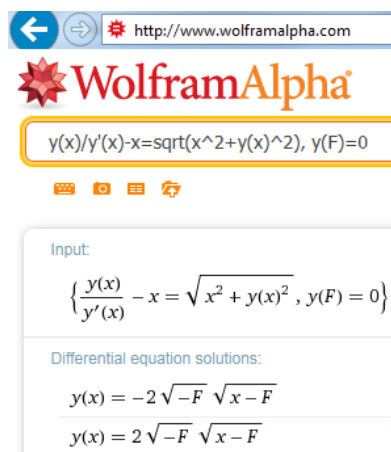


Рисунок 14. Аналитическое сетевое решение дифференциального уравнения вогнутого зеркала

$$F := 1 \text{ cm} \quad x_{end} := -0.07 F = -0.07 \text{ cm} \quad x := -F, -F + \frac{F + x_{end}}{1000} \dots x_{end}$$

$$\left[ \begin{array}{l} y(-F) = 0 \text{ cm} \quad R(-F) = F \quad \alpha(-F) = 0^\circ \quad \beta(-F) = 0^\circ \\ y'(x) = \tan(90^\circ - \beta(x)) \quad R(x)^2 = x^2 + y(x)^2 \\ \beta(x) = \frac{\alpha(x)}{2} \quad \sin(\alpha(x)) = \frac{y(x)}{R(x)} \\ \left[ \begin{array}{l} y \\ R \\ \alpha \\ \beta \end{array} \right] := \text{odesolve} \left( \left[ \begin{array}{l} y(x) \\ R(x) \\ \alpha(x) \\ \beta(x) \end{array} \right], x_{end} \right) \end{array} \right.$$

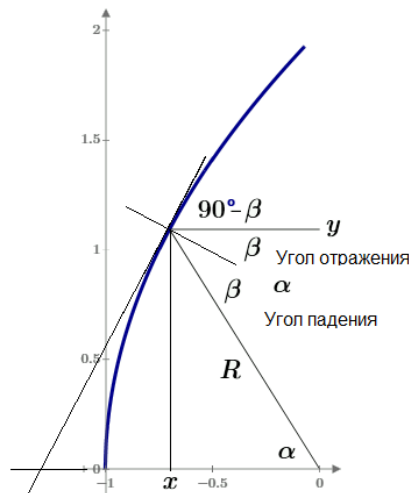


Рисунок 15. Численное решение в среде Mathcad системы одного дифференциального и четырех алгебраических уравнений

*Примечание.* Начальным условием численного решения задачи о вогнутом зеркале на рис. 16 стоит не  $y(F) = 0$  см (нулевая длина), а  $y(F) = 1$  нм (один нанометр). Если бы там стоял нуль, а не величина близкая к нулю, то задача не решалась бы численно из-за того, что производная в этой точке равна бесконечности. Пришлось чуть-чуть схитрить и обмануть компьютер. Можно сказать, что нанотехнологии помогли нам решить эту задачу! Шутки шутками, но полировка с ювелирной точностью линз и зеркал для телескопов, покрытие поверхности линз ровным слоем светоотражающего материала — это настоящая нанотехнология, возникшая задолго до появления этого слова. Можно было «схитрить» и по-иному — поменять оси. Тогда производная функции в нулевой точке была бы равна нулю, а не бесконечности.

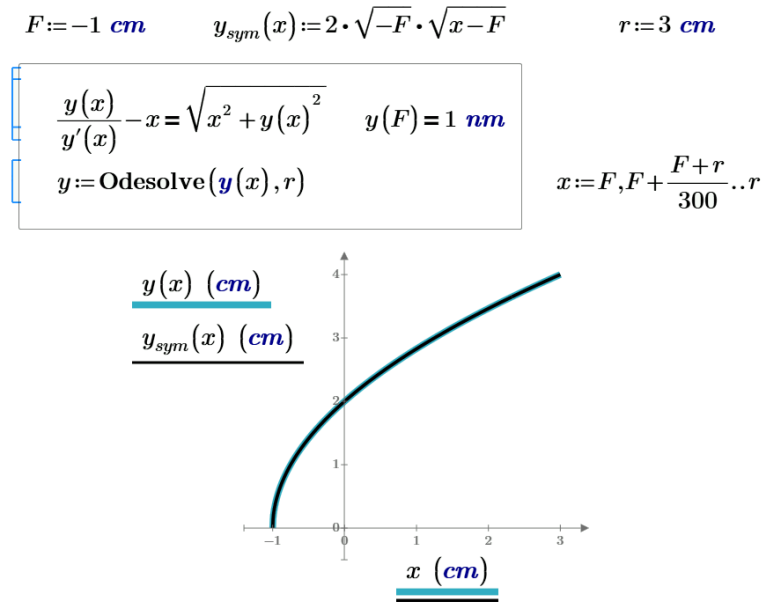


Рисунок 16. Численное решение уравнения вогнутого зеркала и сравнение его с аналитическим

Пакет Mathcad, повторяем, может численно решать не только одиночные дифференциальные уравнения (см. пример на рис. 16), которые еще нужно уметь вывести, но и системы, в которые входят и дифференциальные и алгебраические уравнения. Это в ряде случаев упрощает составление математических моделей. Так на рис. 16 показано численное решение задачи о форме вогнутого зеркала, в математическую модель которого вложены следующие наши элементарные знания предмета: производная функции равна тангенсу наклона касательной (первое уравнение), квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов (2), угол падения равен углу отражения (3) и, наконец, синус — это отношение противолежащего катета к гипотенузе (4). Все эти четыре уравнения при желании можно собрать в одно и получить уравнение, показанное на рис. 14 и 16, выведенное анализом правой схемы на рис. 13. Но лучше поручить эту возню с отдельными уравнениями компьютеру — см. рис. 15. Лучше и в том плане, что развернутая модель открыта для возможных изменений. Можно, например, в третьем уравнении двойку в знаменателе заменить на... тройку и сказать, что поверхность зеркала обладает таким необычным свойством: угол падения в два раза больше угла отражения или наоборот. Ведь есть и необычные зеркала — такие, которые, например, отбрасывают лучи света строго в сторону источника. Такое «зеркало» получается, если обычные плоские

зеркала расположить друг к другу под прямым углом<sup>6</sup>. Этим свойством обладают так называемые уголковые отражатели и катафоты, которые устанавливают на автомобилях и велосипедах. Можно также представить себе зеркало, у которого синус угла падения равен... косинусу угла отражения, и поиграть с этой моделью — найти форму фокусирующего зеркала с такой полуфантастической отражающей поверхностью...

*Примечание.* В схемах, показанных на рис. 15 и 16, оси абсцисс проходят через разные точки — через фокус (рис. 16) или через нулевую точку (рис. 15). Выбор системы координат (декартова, полярная, цилиндрическая, сферическая и проч.), начальной точки расположения осей — это важный этап решения задачи, часто определяющий успех этого дела.

**Выводы.** Оптика присутствует не только в учебниках и задачниках по физике, но и художественной литературе. Вспомним не только Жюль Верна (см. выше), но пушкинское «Все хлопает. Онегин входит, / Идет меж кресел по ногам, / Двойной лорнет скосясь наводит / На ложи незнакомых дам.». Или рассказ Василия Шукшина «Микроскоп», а также басню Крылова «Мартышка и очки». Да что там далеко ходить! Глаза, через которые человек получает основную долю информации об окружающем мире (читает, например, эту статью), это ни что иное, как совершеннейшие оптические приборы, которые мы часто подправляем и усиливаем рукотворными оптическими устройствами: моноклем, лорнетом, пенсне, очками, подзорной трубой, биноклем, перископом, микроскопом, телескопом и т. д. Сочетая математику, физику и литературу (базовые школьные предметы) с современными информационными технологиями, можно успешно и, главное, с интересом решать довольно сложные оптические задачи, попутно изучая законы физики.

Современные компьютерные средства позволяют отказаться от многих допущений и упрощений и более точно рассчитывать оптические приборы. Это можно делать не только с помощью специализированных программ для расчета оптических систем (TracePro, OPTIS, LightTools и др.), но и в среде универсальной математической программы Mathcad, а также с помощью сайтов Интернета и специалистов, работающих на профессиональных форумах. А начинать изучение оптики можно и нужно не с заучивания готовых формул, зачастую малопонятных из-за принятых в них допущений и упрощений, о которых умалчивают, а с генерирования на компьютере базовых положений оптики, переходя затем к упрощенным формулам. Что мы и попытались сделать в этой статье.

---

<sup>6</sup> Есть полотна, персонажи которых смотрят на вас, где бы вы не находились. Одно из них красочно и «страшно» описано Гоголем в повести «Портрет». Другой пример: два плоских зеркала, расположенные вертикально под прямым углом друг к другу (два зеркала трюмо, например), будут показывать вам ваше изображение при любом вашем расположении относительно такого «вогнутого» зеркала. При этом вы будете видеть себя с разворотом по горизонтали.

## Литература

- [1] Очков В. Ф., Богомолова Е. П., Иванов Д. А. Физико-математические этюды с Mathcad и Интернет. — СПб. : Лань, 2016 (<https://www.ptcusercommunity.com/groups/etudes>)
- [2] Степин Б. Д. Применение системы единиц физических величин в химии. — М. : Высшая школа, 1990.
- [3] Сивухин Д. В. Общий курс физики. — Изд. 3-е, стереотипное. Т. IV. Оптика. — М. : Физматлит, МФТИ, 2002 ([https://mipt.ru/dasr/upload/89a/f\\_3kf3p7-arphh81ii9w.pdf](https://mipt.ru/dasr/upload/89a/f_3kf3p7-arphh81ii9w.pdf))
- [4] Русинов М. М. Техническая оптика : учеб. пособие для вузов. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979 ([http://know.sernam.ru/book\\_to.php](http://know.sernam.ru/book_to.php))
- [5] Очков В. Ф., Калова Я., Соколов А. В., Чудова Ю. В. Литературно-физическая композиция «Истории о зеркале и линзе» // *Открытое образование*. 2016. № 1. С. 34–42.
- [6] Очков В. Ф., Богомолова Е. П., Иванов Д. А., Писачич К. Движения планет: расчет и визуализация в среде Mathcad или Часы Кеплера // *Cloud of Science*. 2015. Т. 2, № 2. С. 177–215.
- [7] Бронштейн И. Гипербола // *Квант*. 1975. № 3.

### **Авторы:**

Валерий Федорович Очков — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тепловых электрических станций, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Алексей Викторович Соколов — учитель физики ГБОУ Лицей № 1502 при МЭИ

Сергей Дмитриевич Федорович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Лук Мекес (Luc Meekes) — инженер, компания «Медтроник», Нидерланды

## Journey From Home to School Along the Route Pierre Fermat or the Second Optical Property of Hyperbole

V. F. Ochkov<sup>\*</sup>, A. V. Sokolov<sup>\*\*</sup>, S. D. Fedorovich<sup>\*</sup>, Luk Mekes<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
111250 Moscow, Russia

<sup>\*\*</sup>Lyceum 1502 at MEI  
111555 Moscow, Russia

<sup>\*\*\*</sup>Medtronic, Netherlands  
e-mail: ochkov@twf.mpei.ac.ru

*Abstract.* The article considers the the solution of optimization problems as applied problems of reflection and refraction of light ray. Presented numerical and analytical solution of algebraic and differential equations lens and a focusing mirror in Mathcad. It is shown how modern software tools can easily and gracefully solve optical problems. Analytically solved ordinary differential equation of a plano-convex lens. It is emphasized that hyperbolic optical property, is not based on the laws of reflection, and on the law of light refraction. Formula was deduced for material of refractive index of a plano-convex lens with the same optical and geometrical focuses.

*Key words:* reflection and refraction of light, optical path, Fermat's principle, tautochronism principle, Snellius law, Mathcad package, hyperbole, parabole.

### References

- [1] Ochkov V. F., Bogomolova E. P., Ivanov D. A. (2016) Fiziko-matematicheskie jetjudy s Mathcad i Internet. Saint-Petesburg [In Rus]
- [2] Stepin B. D. (1990) Primenenie sistemy edinic fizicheskikh velichin v himii. Moscow, Vysshaja shkola [In Rus]
- [3] Sivuhin D. V. (2002) Obshhij kurs fiziki. IV. Optika. Moscow [In Rus]
- [4] Rusinov M. M. (1979) Tehnicheskaja optika. Leningrad [In Rus]
- [5] Ochkov V. F., Kalova Y., Sokolov A. V., Chudova Y. V. (2016) *Otkrytoe obrazovanie*, 1:34–42 [In Rus]
- [6] Ochkov V. F., Bogomolova E. P., Ivanov D. A., Pisachich K. (2015) *Cloud of Sci.*, 2(2)177 [In Rus]
- [7] Bronshteyin I. (1975) *Kvant*, 3 [In Rus]

## О некоторых свойствах сопряженных круговых дуг

*В. Н. Агеев*

*Московский государственный технический университет гражданской авиации  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, 20*

*e-mail: rv3bd@mail.ru*

*Аннотация.* В работе обсуждаются свойства сопряженных круговых дуг, соединяющих две точки на плоскости, в которых заданы направления касательных векторов. Предлагается метод построения, в основе которого лежит применение вспомогательной окружности. Радиус окружности зависит от направления касательных векторов. Доказано, что любая точка этой окружности является точкой сопряжения пары круговых дуг.

*Ключевые слова:* гладкая кривая, круговые дуги, точка сопряжения.

### 1. Введение

В системах автоматизированного проектирования для описания контуров сложной формы широко применяются так называемые кусочно-непрерывные методы аппроксимации, суть которых состоит в том, что криволинейный контур представляется в виде последовательности сопряженных между собой дуг каких-либо кривых (например, парабол второго, третьего или более высокого порядка). В зависимости от решаемой задачи на проектируемый контур накладываются определенные условия гладкости. В простейшем случае это условие непрерывности изменения угла наклона касательной при переходе через точку сопряжения, более жесткие требования включают непрерывность изменения кривизны кривой. На эту тему имеется множество публикаций, в качестве примера можно привести статьи [1–4], в которых приведены многочисленные ссылки на работы, освещающие различные стороны проблемы.

Выбор круговых дуг в качестве аппроксимирующих кривых обусловлен тем, что в устройствах машинной графики (графопостроителях, плоттерах) а также в применяемых в машиностроении металлообрабатывающих станках с ЧПУ для перемещения рабочего органа используется два типа интерполяторов: линейный и круговой. Описание контура с помощью таких графических примитивов, как отрезки прямых и круговые дуги позволяет получить управляющую программу для станка с ЧПУ без дополнительных преобразований, в результате чего уменьшаются погрешности при воспроизведении контура.



Обзор публикаций на эту тему позволяет сделать вывод о том, что авторы в основном уделяют внимание методам минимизации погрешности при аппроксимации, а также проблемам устойчивости. При этом на второй план отходят вопросы, связанные с практическим построением пары сопряженных дуг, поскольку эта задача представляется достаточно простой. Тем не менее необходимость исследований в этом направлении очевидна. Свидетельством этому может служить статья [5], в которой автор описывает достаточно сложную процедуру сопряжения при аппроксимации круговыми дугами швейных лекал. Возможно, что подобная проблема возникает и при решении других практических задач.

В работе описан метод построения пары сопряженных круговых дуг, соединяющих две точки на плоскости с заданными в них направлениями касательных векторов. Он достаточно прост с вычислительной точки зрения, более того, он может быть применен для вычерчивания сопряженных дуг «вручную», с использованием только циркуля и линейки.

## 2. Вспомогательная окружность и ее свойства

Пусть на концах отрезка  $AB$  заданы направления векторами  $\vec{\tau}_A$  и  $\vec{\tau}_B$ . Первый под углом  $\alpha$  (отсчитывается против часовой стрелки), второй — под углом  $\beta$  (по часовой стрелке). Требуется построить пару сопряженных дуг, первая из которых выходит из  $A$  в направлении  $\vec{\tau}_A$ , а вторая приходит в  $B$  по направлению  $\vec{\tau}_B$  (рис. 1а).

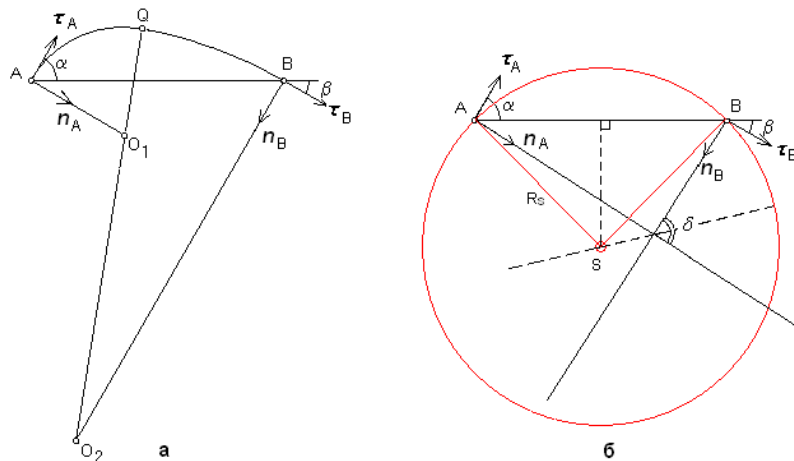


Рисунок 1. Построение пары сопряженных круговых дуг:

а — пример построения; б — вспомогательная окружность с центром в точке пересечения серединного перпендикуляра к отрезку  $AB$  и линии биссектрисы угла  $\delta$

Точки  $O_1$  и  $O_2$  лежат на линиях возможных центров, определяемых векторами  $\vec{n}_A$  и  $\vec{n}_B$ , ортогональных векторам  $\vec{\tau}_A$  и  $\vec{\tau}_B$  соответственно. Через точку пересечения этих линий проведем линию, являющуюся биссектрисой угла  $\delta$  (см. рис. 1б). Точку пересечения этой линии со срединным перпендикуляром к отрезку АВ обозначим  $S$ . Из этой точки, как из центра, проведем окружность, проходящую через концы отрезка.

Нетрудно показать, что  $\angle ASB = \alpha + \beta$  и что радиус этой окружности равен

$$R_s = \frac{d}{2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2}}, \quad (1)$$

где  $d$  — длина отрезка АВ.

Данная окружность обладает весьма интересными свойствами. В работе [6] она была названа вспомогательной, поскольку с ее помощью выполняются все необходимые построения. Покажем, что любая точка  $Q$  вспомогательной окружности является точкой сопряжения двух круговых дуг, первая из которых выходит из точки  $A$  в направлении  $\vec{\tau}_A$ , а вторая приходит в точку  $B$  в направлении  $\vec{\tau}_B$ .

Возьмем произвольную точку  $Q$  на вспомогательной окружности и соединим ее с концами отрезка АВ (рис. 2).

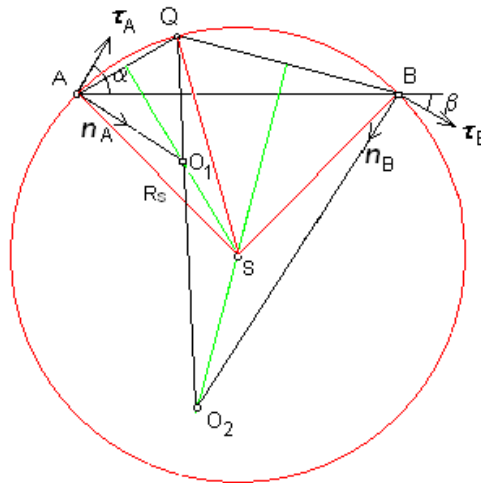


Рисунок 2. Нахождение центров  $O_1$  и  $O_2$  по заданной точке  $Q$  на вспомогательной окружности

Проведем срединные перпендикуляры к отрезкам АQ и QB до пересечения с линиями возможных центров. Точки пересечения обозначим  $O_1$  и  $O_2$ . Нетрудно видеть, что это искомые центры первой и второй дуги. Действительно,

$|O_1A| = |O_1Q|$  и  $|O_2Q| = |O_2B|$  по построению. Кроме того, из равенства углов  $\angle SAO_1$ ,  $\angle O_1QS$  и  $\angle SBO_2$  следует, что центры дуг и  $Q$  лежат на одной прямой, а значит, в точке сопряжения дуги имеют общую касательную. Таким образом, выбор точки на вспомогательной окружности однозначно определяет пару сопряженных в этой точке круговых дуг.

### 3. Свойства семейства кривых, представленных парой сопряженных дуг

Выше был рассмотрен частный случай положения точки  $Q$  на вспомогательной окружности. Однако нетрудно убедиться в том, что любой другой выбор  $Q$  приводит к тем же результатам.

Из сказанного следует, что на плоскости можно построить бесконечно много пар сопряженных между собой круговых дуг, соединяющих две точки, в которых заданы направления касательных векторов. Они образуют однопараметрическое семейство гладких кривых. В качестве параметра, характеризующего положение точки сопряжения, можно взять длину дуги вспомогательной окружности  $AQ$  или величину центрального угла  $\gamma = \angle ASQ$ ,  $0 < \gamma < 2\pi$ . В этом случае радиусы сопряженных в точке  $Q$  дуг вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} R_1 &= R_s \frac{\sin(\gamma/2)}{\sin((\alpha - \beta + \gamma)/2)}, \\ R_2 &= R_s \frac{\sin((\alpha - \beta + \gamma)/2)}{\sin(\beta - \gamma/2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из этих формул следует, что при  $\gamma = 2\beta$  радиус второй дуги  $R_2$  становится бесконечно большим. При этом точка сопряжения лежит на пересечении линии второй касательной со вспомогательной окружностью. Обозначим эту точку  $Q^*$ . Вторая дуга при этом становится отрезком прямой  $Q^*B$ .

При  $\gamma = 2\pi - \alpha + \beta$  бесконечно большим становится радиус первой дуги  $R_1$ . В этом случае точка сопряжения лежит на пересечении линии первой касательной со вспомогательной окружностью. Обозначим эту точку  $Q^*$ . Первая дуга так же, как и в предыдущем случае, вырождается в линию с нулевой кривизной и центр ее перемещается в бесконечно удаленную точку. Эти две возможные ситуации показаны на рис. 3.

В системе координат, начало которой совпадает с точкой  $A$ , а ось  $Ox$  направлена вдоль отрезка  $AB$ , координаты центров дуг  $O_1, O_2$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} x_1 &= R_1 \sin a, \\ y_1 &= -R_1 \cos a, \\ x_2 &= d - R_2 \sin b, \\ y_2 &= -R_2 \cos b. \end{aligned} \quad (3)$$

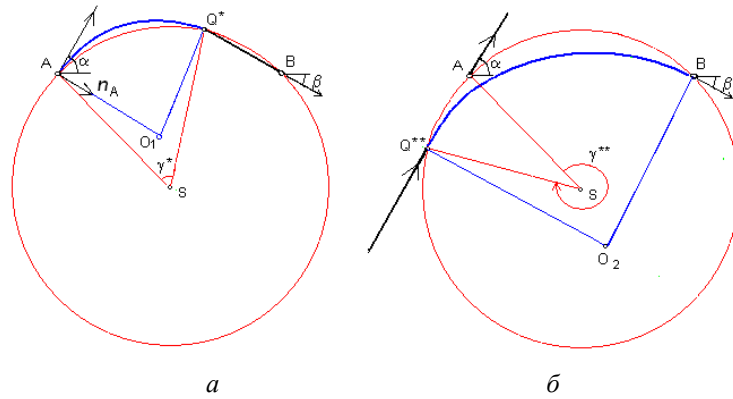


Рисунок 3. Примеры построения дуг для случаев: а)  $\gamma = 2\beta$ ; б)  $\gamma = 2\pi - \alpha + \beta$

На рис. 4 показано семейство гладких кривых, представляющих собой пары сопряженных круговых дуг, соединяющих две точки с заданными в них направлениями касательных. Дуги окрашены в разные цвета.

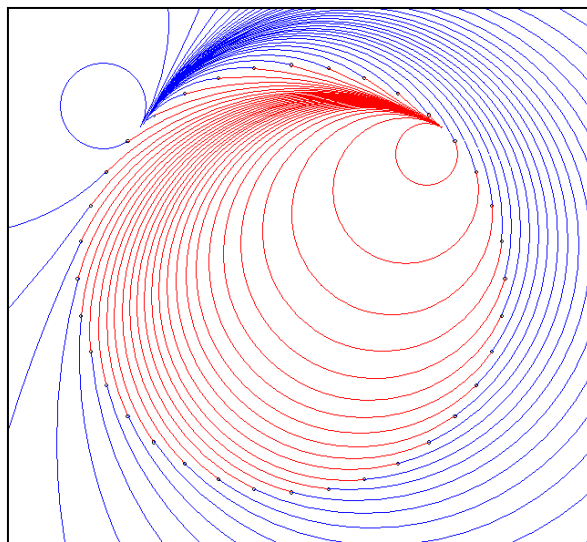


Рисунок 4. Множество пар сопряженных дуг, построенных с шагом  $\Delta\gamma = 10^\circ$ ; углы наклона касательных:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\beta = 30^\circ$ .

Обращает на себя внимание тот факт, что все дуги, выходящие из первой точки, лежат вне круга, границей которого является множество точек сопряжения, а все дуги, приходящие во вторую точку лежат внутри круга.

Численные эксперименты показывают, что с уменьшением шага изменения параметра  $\gamma$  количество кривых растет и они начинают заполнять собой всю плоскость. Можно предположить, что через любую точку на плоскости можно провести пару сопряженных дуг, удовлетворяющих поставленным условиям.

#### 4. Построение кривой, проходящей через заданную точку

Пусть на плоскости заданы направления касательных  $\vec{\tau}_A$  и  $\vec{\tau}_B$  в точках А и В соответственно. Требуется построить пару сопряженных дуг, первая из которых выходит из А по направлению  $\vec{\tau}_A$ , а вторая приходит в В по направлению  $\vec{\tau}_B$ , при этом дополнительным условием является требование прохождения кривой через произвольную точку Р.

Рассмотрим две случая, связанных с положением точки Р относительно круга, граница которого является вспомогательной окружностью, т. е. множеством возможных центров сопряжения дуг.

##### **1. Точка находится вне круга.**

В этом случае, как это следует из результатов, полученных в предыдущем разделе, через точку Р проходит первая дуга, выходящая из точки А (см. рис. 4). Построим отрезок АР и проведем к нему срединный перпендикуляр до пересечения с линией возможных центров первой дуги. Обозначим ее  $O_1$ . Окружность с радиусом  $R_1 = |O_1A|$  и центром  $O_1$  пересекает вспомогательную окружность в некоторой точке Q. Из результатов п. 2 следует, что точка Q однозначно определяет центр и радиус второй дуги.

##### **2. Точка находится внутри круга.**

В этом случае через точку Р проходит вторая дуга, приходящая в точку В. Построим отрезок ВР и проведем к нему срединный перпендикуляр до пересечения с линией возможных центров второй дуги. Обозначим ее  $O_2$ . Окружность с радиусом  $R_1 = |O_2B|$  и центром  $O_2$  пересекает вспомогательную окружность в некоторой точке Q. Из результатов п. 2 следует, что точка Q однозначно определяет центр и радиус первой дуги.

Примеры построений приведены на рис. 5.

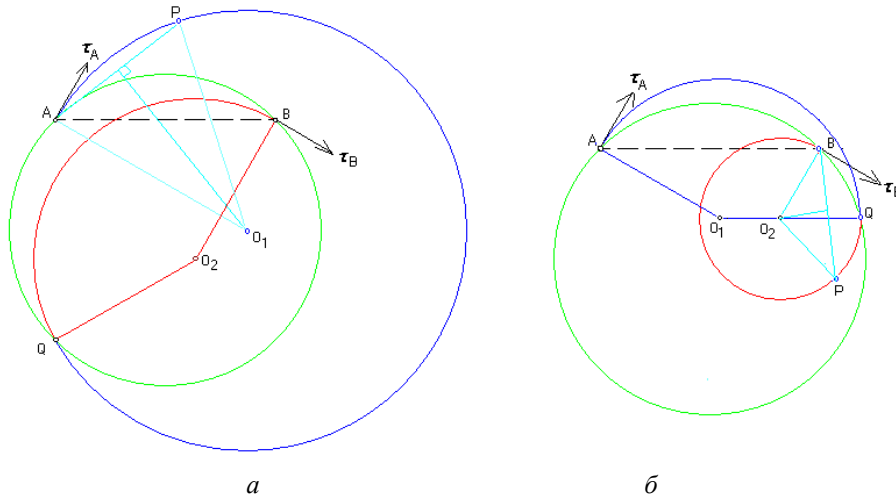


Рисунок 5. Примеры построения кривых, проходящих через заданную точку:  
а) точка Р лежит вне круга, ограниченного вспомогательной окружностью;  
б) точка Р лежит внутри круга

### 5. Построение сопряженных дуг с минимальным скачком кривизны

Кривая, составленная из пары сопряженных круговых дуг, является гладкой, поскольку обеспечивается непрерывность первой производной, т. е. изменения угла наклона касательной при переходе через точку сопряжения. Однако вторая производная изменяется скачкообразно, поскольку имеет место скачок кривизны, равный

$$\Delta k = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}. \tag{4}$$

Подставляя сюда выражения для  $R_1$  и  $R_2$  из (2), получим

$$\Delta k = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_s} \left( \frac{\sin \frac{\alpha - \beta + \gamma}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}} - \frac{\sin \left( \beta - \frac{\gamma}{2} \right)}{\sin \frac{\alpha - \beta + \gamma}{2}} \right). \tag{5}$$

Минимум этой величины для различных значений  $\alpha$  и  $\beta$  получается при  $\gamma = (\alpha + \beta)/2$ .

Чтобы убедиться в том, что функция  $\Delta k(\gamma)$  имеет локальный минимум в точке  $\gamma = (\alpha + \beta)/2$ , представим  $\gamma$  в виде  $\gamma = (\alpha + \beta)/2 + 2\epsilon$ , где  $\epsilon$  — малый параметр.

Подставляя это выражение в (5) и раскладывая в ряд по степеням  $\epsilon$  до второго порядка малости включительно, получим [7]:

$$\Delta k = \Delta k_0 + \frac{4 \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha + \beta}{4} \frac{\alpha + \beta}{4}}{d \cdot \sin^2 \frac{\alpha + \beta}{2}} \cdot \varepsilon^2, \quad (6)$$

где  $\Delta k_0$  — значение (5) при  $\gamma = (\alpha + \beta)/2$ .

При  $\alpha > \beta$  коэффициент при  $\varepsilon^2$  положителен. Отсюда следует, что  $\gamma = (\alpha + \beta)/2$  является точкой локального минимума функции  $\Delta k(\gamma)$ .

Подставляя значение  $\gamma = (\alpha + \beta)/2$  в формулы (2), получим следующие значения радиусов сопряженных дуг, при которых скачок кривизны при переходе через точку сопряжения минимален:

$$R_1 = R_s \frac{\sin \frac{\alpha + \beta}{4}}{\sin \frac{3\alpha - \beta}{4}}, \quad R_2 = R_s \frac{\sin \frac{\alpha + \beta}{4}}{\sin \frac{3\beta - \alpha}{4}}. \quad (7)$$

Точка сопряжения Q при этом будет иметь координаты

$$x_Q = \frac{d}{2}, \quad y_Q = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha + \beta}{4}. \quad (8)$$

Если обратиться к рис. 1б, где изображена вспомогательная окружность, то точка Q, соответствующая значению параметра  $\gamma = (\alpha + \beta)/2$ , находится на пересечении окружности и продолжением пунктирной линии (серединного перпендикуляра к отрезку AB). Это следует из того, что  $\angle ASB = \alpha + \beta$ .

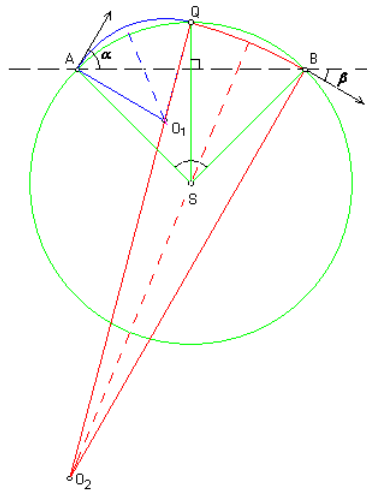


Рисунок 6. Построение сопряженных дуг с минимальным скачком кривизны: углы наклона касательных  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\beta = 30^\circ$ ; S — центр вспомогательной окружности, SQ — биссектриса угла ASB



Таким образом, можно предложить следующий простой алгоритм построения пары сопряженных круговых дуг с минимальным скачком кривизны в точке сопряжения.

1. По заданным на концах отрезка АВ углам наклона касательных  $\alpha$  и  $\beta$  проводятся линии возможных центров до их пересечения и методом, описанным в п. 1, строится вспомогательная окружность с центром в точке S.

3. Определяется точка сопряжения Q как точка пересечения срединного перпендикуляра к отрезку АВ со вспомогательной окружностью. Линия SQ при этом является биссектрисой угла ASB.

4. К отрезкам AQ и QB проводятся срединные перпендикуляры (на рис. 6 показаны пунктиром) до их пересечения с линиями возможных центров первой и второй дуг соответственно. Точки пересечения и являются искомыми центрами дуг  $O_1$  и  $O_2$ .

## Литература

- [1] Yang X., Wang G. Planar point set fairing and fitting by arc splines // *Computer-Aided Design*. 2002. Vol. 34, No. 13. P. 35–43.
- [2] Park H. Error-bounded biarc approximation of planar curves // *Computer-Aided Design*. 2004. Vol. 36, No. 12. P. 1241–1251.
- [3] Сабитов И. Х., Словеснов А. В. Приближение плоских кривых круговыми дугами // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2010. Т. 50, № 8. С. 1347–1356.
- [4] Курносенко А. И. Интерполяционные свойства плоских спиральных кривых // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2001. Т. 7, № 2. С. 441–463.
- [5] Сайфуллаева Д. А. Методы математического описания контуров лекал швейных изделий, методы линейно-круговой аппроксимации // *Молодой ученый*. 2016. № 11. С. 459–461.
- [6] Агеев В. Н. О геометрических свойствах одного семейства плоских кривых // *Геометрия, топология и приложения: межвуз. сб. научных тр.* — М. : МИП, 1990. С. 41–45.
- [7] Агеев В. Н. Аппроксимация линий и контуров круговыми дугами // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2012. № 1. С. 3–10.

### Автор:

Владимир Николаевич Агеев, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики; Московский государственный технический университет гражданской авиации

## On Some Properties of Conjugate Circular Arcs

V. N. Ageyev

Moscow State Technical University of Civil Aviation  
20 Kronshtadtsky blvd, Moscow, Russia 125993

e-mail: rv3bd@mail.ru

*Abstract.* Methods for constructing conjugated circular arcs connecting two points on the plane, which sets the direction of the tangent vectors are discussed. A method, which is based on an auxiliary circle passing through the given points. The radius of the circle depends on the direction of the tangent vectors. It is proved that any point of the circle is the point of mating pairs of circular arcs.

*Keywords:* smooth curve, circular arc coupling point, the tangent vectors.

### References

- [1] Yang X., Wang G. (2002) *Computer-Aided Design*, **34**(13):35–43.
- [2] Park H. (2004) *Computer-Aided Design*, **36**(12):1241–1251.
- [3] Sabitov I. K., Slovesnov A. V. (2010) *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, **50**(8):1279–1288.
- [4] Kurnosenko A. I. (2001) *Fundamental'naja i prikladnaja matematika*, **7**(2):441–463. [In Rus]
- [5] Sayfullaeva D. A. (2016) *Molodoy ucheny*, 11:459–461. [In Rus]
- [6] Ageev V. N. (1990) O geometricheskikh svojstvah odnogo semejstva ploskih krivyh. In Book *Geometrija, topologija i prilozhenija*. Moscow, pp. 41–45. [In Rus]
- [7] Ageev V. N. (2012) *Izvestija vysov. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela*. 1:3–10. [In Rus]

## Разработка SVM-классификатора с применением гибридных версий алгоритма роя частиц на основе поиска по сетке

Л. А. Демидова, И. А. Ключева

Рязанский государственный радиотехнический университет  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1

e-mail: liliya.demidova@rambler.ru, i.aleschenko@yandex.ru

*Аннотация.* Рассматриваются подходы к решению задачи поиска параметров SVM-классификатора на основе гибридизации алгоритма роя частиц (PSO-алгоритм) и алгоритмов поиска по сетке с целью обеспечения высокого качества классификационных решений. В работе представлены две гибридные версии базового PSO-алгоритма, предполагающие использование соответственно классического алгоритма Grid Search (GS-алгоритм) и алгоритма Design of Experiment (DOE-алгоритм). При этом в качестве базового используется канонический PSO-алгоритм. Результаты проведенных исследований демонстрируют целесообразность применения гибридных версий базового PSO-алгоритма с целью сокращения временных затрат на поиск оптимальных значений параметров SVM-классификатора при сохранении высокого качества его классификационных решений.

*Ключевые слова:* классификация, показатели качества классификации, гибридизация, алгоритм роя частиц, алгоритм поиска по сетке, SVM-классификатор, параметр регуляризации, радиально базисная функция ядра.

### 1. Введение

Классификация данных — одна из наиболее распространенных задач машинного обучения (*machine learning*) [1–9]. Для решения этой задачи требуется создание классифицирующей функции, которая присваивает каждому набору входных данных значение метки одного из классов. Классификация новых данных производится после прохождения этапа «обучения», в процессе которого на вход обучающего алгоритма подаются данные с уже приписанными им метками классов.

В настоящее время для решения широкого спектра классификационных задач в различных прикладных областях успешно применяется SVM-алгоритм (*Support Vector Machine, SVM*) [1–9], являющийся алгоритмом машинного обучения по прецедентам. SVM-алгоритм реализует построение бинарного SVM-классификатора.

SVM-алгоритм реализует построение разделяющей гиперплоскости, которая разделяет объекты с разной классовой принадлежностью. При этом по обеим сто-

ронам разделяющей гиперплоскости строятся две параллельные гиперплоскости, задающие границы классов и находящиеся на максимально возможном расстоянии друг от друга. Предполагается, что чем больше расстояние между этими параллельными гиперплоскостями, тем меньше средняя ошибка SVM-классификатора. Векторы характеристик классифицируемых данных, ближайшие к параллельным гиперплоскостям, называются опорными векторами.

При классификации реальных наборов данных в большинстве случаев отсутствует возможность линейной делимости объектов на классы. В связи с этим главной особенностью SVM-классификатора в случае нелинейной делимости объектов является применение специальной функции, называемой ядром, используемой для перевода экспериментального набора данных из исходного пространства характеристик в пространство более высокой размерности, в котором строится гиперплоскость, разделяющая классы. В процессе обучения SVM-алгоритма одной из приоритетных задач является настройка параметров SVM-классификатора, наиболее важными из которых являются тип функции ядра, значения параметров ядра и значение параметра регуляризации.

В качестве функции ядра, позволяющей разделить объекты разных классов, обычно используется одна из следующих функций [1, 3]: линейная, полиномиальная, радиальная базисная, сигмоидная.

Параметр регуляризации  $C$  позволяет найти компромисс между максимизацией ширины полосы, разделяющей классы, и минимизацией суммарной ошибки. Другими словами, параметр регуляризации контролирует соотношение между гладкой границей и корректной классификацией рассматриваемых данных.

В случае применения радиальной базисной функции ядра (*Radial Basis Function*, RBF) [3] необходимо определить значение коэффициента данной функции  $\sigma$ .

Простейший подход к настройке параметров SVM-классификатора основан на простом переборе различных комбинаций значений параметров. Наиболее часто с целью настройки параметров SVM-классификатора применяются алгоритмы поиска по сетке, в частности алгоритм *Grid Search* (GS-алгоритм) [5]. При этом для каждой комбинации параметров, соответствующей определенному узлу сетки, осуществляется перекрестная проверка (кросс-валидация, *Cross-validation*) [5] на обучающем наборе данных. В результате выбирается комбинация значений параметров, определяющая некоторый узел сетки и характеризующаяся лучшим значением показателя кросс-проверки.

Нахождение оптимального набора значений параметров SVM-классификатора позволяет избежать проблемы переобучения (маленькая ошибка обучающей выборке, большая ошибка на тестовой выборке) или проблемы недообучения (ошибки

на обучающей и тестовой выборках близки между собой и являются большими по величине) классификатора. Если ошибки на обучающей и тестовой выборках близки между собой и невелики по значению, то такой SVM-классификатор признается искомым для решения задачи классификации.

Поскольку при построении классификаторов используется сложная, многоэкстремальная и многопараметрическая целевая функция, целесообразно применять поиск ее оптимума сразу по всему пространству возможных решений.

В настоящее время широкое применение находят алгоритмы оптимизации, созданные по образу существующих в природе биологических систем. К таким алгоритмам относятся биоинспирированные алгоритмы стохастической оптимизации: генетический алгоритм, алгоритм роя частиц, муравьиный алгоритм, пчелиный алгоритм [8]. Данные алгоритмы оперируют множествами простых существ на всем пространстве поиска, моделируя интеллектуальное поведение популяции, в которой каждая особь представляет некоторое альтернативное приближенное решение.

В последние годы все большее применение при решении различных прикладных задач оптимизации находит алгоритм роя частиц (*Particle Swarm Optimization*, PSO-алгоритм) [1–3, 7–16], основанный на идее о возможности решения задач оптимизации посредством моделирования поведения групп животных.

PSO-алгоритм характеризуется простотой реализации и, вследствие этого, низкой алгоритмической сложностью, поскольку для его реализации достаточно определить только значение оптимизируемой функции. В связи с этим можно сделать вывод о целесообразности применения PSO-алгоритма к решению задачи поиска оптимальных значений параметров SVM-классификатора.

В настоящее время известны различные способы повышения эффективности базового PSO-алгоритма, которые можно разделить на метаоптимизационные и комбинационные [8].

В данной работе предлагается реализовать комбинационный способ повышения эффективности базового PSO-алгоритма посредством разработки его гибридных версий с применением того или иного алгоритма поиска по сетке. Предполагается использовать два алгоритма поиска по сетке: классический алгоритм *Grid Search* (GS-алгоритм) и алгоритм *Design of Experiment* (DOE-алгоритм) [3, 5, 8].

Цель работы заключается в разработке гибридных версий базового PSO-алгоритма на основе алгоритмов поиска по сетке и сравнение их поисковых характеристик. В рамках решения задачи поиска оптимальных значений параметров SVM-классификатора планируется выполнить тестирование разработанных гибридных версий PSO-алгоритма на реальных наборах данных. Основными показателями оценки эффективности реализованных алгоритмов являются время поиска оптимальных значений параметров SVM-классификатора, показатели качества

классификации данных (общая точность, чувствительность, специфичность, количество опорных векторов). При этом рассматривается задача бинарной классификации.

## 2. Принципы реализации SVM-алгоритма

В результате обучения SVM-классификатора определяется разделяющая гиперплоскость (рис. 1) [3], которая может быть задана уравнением  $\langle w, z \rangle + b = 0$ , где  $w$  — вектор-перпендикуляр к разделяющей гиперплоскости;  $b$  — параметр, соответствующий кратчайшему расстоянию от начала координат до гиперплоскости;  $\langle w, z \rangle$  — скалярное произведение векторов  $w$  и  $z$ . Условие  $-1 < \langle w, z \rangle + b < 1$  задает полосу, которая разделяет классы. Чем шире эта полоса, тем увереннее можно классифицировать объекты. Объекты, ближайšie к разделяющей гиперплоскости и расположенные на границах полосы, разделяющей классы, называются опорными векторами. Они несут основную информацию о разделении классов.

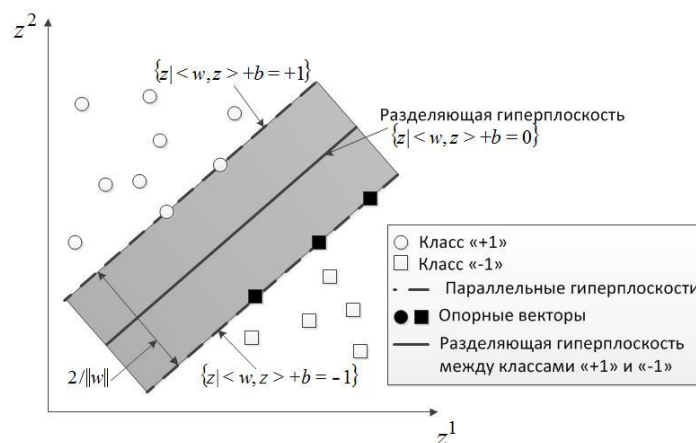


Рисунок 1. Построение разделяющей гиперплоскости в пространстве  $D=2$

В SVM-алгоритме в случае нелинейной разделимости объектов одной из основных задач является определение типа спрямляющей функции ядра (kernel function) и подбор оптимальных значений для некоторого набора параметров с целью построения эффективного SVM-классификатора.

Классификация некоторого объекта  $z$  может быть выполнена с использованием следующего правила [3]:

$$F(z) = \text{sign} \left( \sum_{i=1}^L \lambda_i y_i \kappa(z_i, z) + b \right), \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  — двойственная переменная функции Лагранжа;  $z_i$  — объект из обучающей выборки;  $y_i \in Y = \{-1; +1\}$  — число, характеризующее классовую принадлежность объекта  $z_i$  из обучающей выборки;  $\kappa(z_i, z)$  — функция ядра;  $C$  — параметр регуляризации ( $C > 0$ );  $L$  — количество объектов в обучающей выборке;  $i = \overline{1, L}$ .

Наиболее полное математическое описание SVM-алгоритма приведено в [1, 3].

Основная проблема, возникающая при обучении SVM-классификатора, связана с отсутствием рекомендаций по выбору значения параметра регуляризации  $C$ , функции, описывающей ядро  $\kappa(z_i, z)$ , а также значений параметров самой функции ядра, при которых обеспечивается высокая точность классификации данных. Эта проблема может быть решена с применением тех или иных оптимизационных алгоритмов, в частности с использованием PSO-алгоритма [1].

Для построения SVM-классификатора в случае нелинейной разделимости данных на классы часто применяется радиальная базисная функция ядра (Radial Basis Function, RBF) [3]:

$$\kappa(z_i, z) = \exp\left[-\|z_i - z\|^2 / (2\sigma^2)\right], \quad (2)$$

где параметр  $\sigma > 0$ .

В этом случае при разработке SVM-классификатора, наряду со значением параметра регуляризации  $C$ , необходимо определить значение параметра  $\sigma$  радиальной базисной функции ядра.

### 3. Принципы реализации алгоритма роя частиц и его гибридных версий

В PSO-алгоритме пространство поиска заполняется популяцией частиц, каждая из которых характеризуется своим положением (координатами) в пространстве поиска и скоростью. Кроме того, каждая частица способна запоминать свое лучшее положение в рое, а также обмениваться с другими частицами информацией о глобально «лучшей» позиции среди всех частиц.

Для каждого положения частицы роя вычисляется соответствующее значение целевой функции, на основе которого по определенным правилам [8] вычисляют новое положение (координаты) и новую скорость частицы в пространстве поиска.

С учетом информации, хранящейся в памяти частицы, на каждой итерации рассчитывается ее новая скорость, посредством которой частица изменяет свое положение в пространстве поиска.

Основные принципы организации расчетов по вычислению нового положения и новой скорости частиц приведены в [8].



В настоящее время известны различные версии PSO-алгоритма. Традиционное применение получила одна из самых распространенных версий — каноническая, в которой предлагается выполнять нормировку коэффициентов ускорения, чтобы сходимость алгоритма не так сильно зависела от выбора их значений [8].

В последние годы все большее применение находят подходы, реализующие гибридизацию PSO-алгоритма с другими алгоритмами оптимизации с целью повышения эффективности классического PSO-алгоритма [8].

В данной работе представляется реализация двух гибридных версий PSO-алгоритма с применением двух алгоритмов поиска по сетке: классического GS-алгоритма и DOE-алгоритма [3, 5, 8].

Предлагаемые гибридные версии PSO-алгоритма разрабатывались в первую очередь для решения задачи поиска оптимальных значений параметров SVM-классификатора на основе радиальной базисной функции ядра. Данные алгоритмы, оперирующие набором частиц в пространстве поиска D-2, могут быть применены и для решения других оптимизационных задач соответствующей размерности, а также могут быть адаптированы на случай большей размерности пространства поиска.

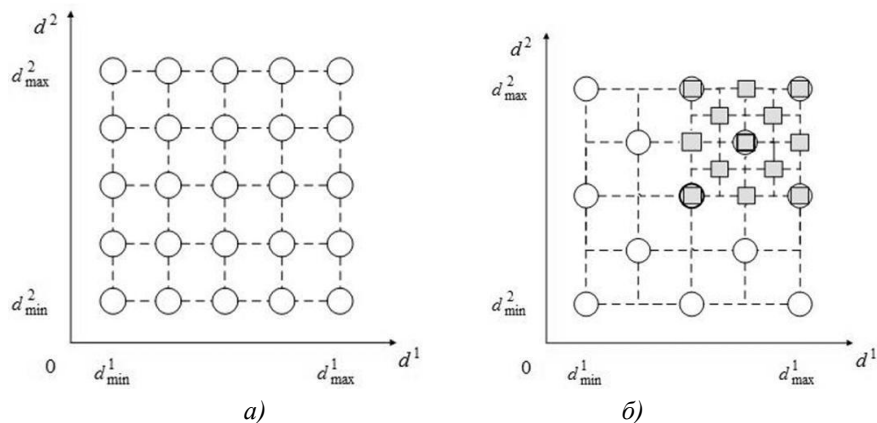


Рисунок 2. Формирование сетки в пространстве D-2:

а) в GS-алгоритме; б) в DOE-алгоритме

При создании гибридной версии PSO-алгоритма предлагается на каждой итерации PSO-алгоритма выполнять уточнение положения (т. е. координат) глобально «лучшей» частицы в рое с использованием того или иного алгоритма поиска по сетке с последующим обновлением текущей популяции частиц роя. При этом из роя должна быть удалена «худшая» частица, т. е. частица с «худшим» значением оптимизируемой (целевой) функции, и вместо нее должна быть добавлена «лучшая» частица, найденная алгоритмом поиска по сетке.



В результате в гибридной версии PSO-алгоритма ускорение поиска глобально-оптимального решения может быть достигнуто благодаря:

- дополнительному поиску по сетке в области потенциального глобально «лучшего» положения частиц в рое;
- обновлению популяции роя частиц и удалению «худших» частиц.

Поскольку в GS-алгоритме (рис. 2а) исследуются все узлы сетки, каждый из которых соответствует конкретной комбинации значений параметров оптимизации, преимущество данного алгоритма заключается в скрупулезности нахождения глобально-оптимального решения.

Достоинства альтернативного алгоритма поиска по сетке — DOE-алгоритма (рис. 2б), заключаются в следующем.

Границы поиска многократно совершенствуются, пока условия остановки поиска не удовлетворены. После каждой итерации DOE-алгоритма область поиска сужается и уточняется так, чтобы ее центром был «лучший» найденный узел, которому соответствует лучшее значение целевой функции.

Если процесс поиска выходит за пределы изначально заданных (допустимых) границ диапазонов поиска, то новые границы диапазонов поиска будут определены таким образом, чтобы новое пространство поиска в DOE-алгоритме содержалось в пределах допустимых границ диапазонов поиска.

Гибридная версия PSO-алгоритма может быть реализована в соответствии со следующей последовательностью шагов.

*Шаг 1.* Определить начальные характеристики частиц в рое (т. е. координаты и скорости частиц); инициализировать значения настраиваемых параметров PSO-алгоритма (число частиц в рое, количество итераций PSO-алгоритма, границы диапазонов поиска и др).

*Шаг 2.* Реализовать один шаг PSO-алгоритма. Скорректировать для каждой  $i$ -й частицы ( $i = \overline{1, m}$ ); скорость  $\vec{v}_i(t)$ :  $\vec{v}_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^n)$ , и текущее положение (координаты)  $\vec{x}_i(t)$ :  $\vec{x}_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n)$ , где  $n$  — размерность пространства поиска (т. е.  $n$  — количество параметров оптимизации), а  $m$  — количество частиц в рое. Найти координаты глобально «лучшей» частицы в рое (с лучшим значением целевой функции) и записать их в вектор  $\vec{g}(t)$ , предназначенный для хранения координат глобально «лучшей» частицы в рое, достигнутых популяцией частиц к текущему поколению. При условии, что целевая функция представляется как  $f(x) = f(x^1, x^2, \dots, x^n)$ , под положением (координатами) глобально «лучшей» частицы в рое будем понимать точку пространства поиска, в которой по результатам всех итераций PSO-алгоритма, начиная с первой итерации до текущей, достигнуто

минимальное значение целевой функции в задаче поиска минимума функции:

$$f(x) \rightarrow \min_{x \in R^n}.$$

*Шаг 3.* Определить границы диапазонов поиска для одного из алгоритмов поиска по сетке (GS-алгоритма или DOE-алгоритма). При этом определить диапазоны  $[d_{\min}^j, d_{\max}^j]$  ( $j = \overline{1, n}$ ) с учетом диапазонов  $[r_{\min}^j, r_{\max}^j]$  разброса частиц в рое на текущей итерации PSO-алгоритма. В качестве значений координат  $\chi^j$  ( $j = \overline{1, n}$ ) «главного» (центрального) узла сетки использовать значения координат глобально «лучшей» частицы в рое, хранящиеся в векторе  $\vec{g}(t)$ . Такой узел рассматривается в качестве центроида, вокруг которого строится сетка. Минимальное расстояние от лучшей частицы роя (центроида сетки) до границ диапазонов разброса находится как

$$l^j = \min\{\chi^j - r_{\min}^j, r_{\max}^j - \chi^j\}, \quad (3)$$

а границы диапазонов поиска по сетке определяются как:

$$d_{\min}^j = \chi^j - l^j, \quad (4)$$

$$d_{\max}^j = \chi^j + l^j. \quad (5)$$

*Шаг 4.* Уточнить координаты глобально «лучшей» частицы в рое посредством выполнения одного из алгоритмов поиска по сетке (GS-алгоритма или DOE-алгоритма). Проверить, достигнуто ли реально уточнение координат глобально «лучшей» частицы роя. Если уточнение достигнуто (новое решение получено), то перейти к шагу 5, иначе — перейти к шагу 6.

*Шаг 5.* Переопределить вектор  $\vec{g}(t)$ , приняв в качестве нового глобально-оптимального решения на текущей итерации PSO-алгоритма решение, полученное при реализации алгоритма поиска по сетке на шаге 4. Выполнить обновление популяции частиц в рое: удалить «худшую» частицу роя и вместо нее добавить «лучшую» частицу, найденную на шаге 4.

*Шаг 6.* Выполнить переход к шагу 7, если выполнены условия останова PSO-алгоритма (достигнуто максимальное количество итераций PSO-алгоритма или найден глобальный оптимум с заданной точностью), иначе — перейти к шагу 2.

*Шаг 7.* Принять значения координат «лучшей» частицы роя в качестве искомого глобально-оптимального решения и завершить работу гибридной версии PSO-алгоритма.

Ниже рассмотрены особенности реализации алгоритмов поиска по сетке, использующихся на шаге 4 предложенной гибридной версии PSO-алгоритма.

В GS-алгоритме диапазоны поиска  $[d_{\min}^j, d_{\max}^j]$  ( $j = \overline{1, n}$ ), найденные на основе формул (4) и (5) на шаге 3 гибридной версии PSO-алгоритма, разбиваются на за-

данное количество интервалов, в результате чего определяются узлы сетки. Затем в каждом узле сетки вычисляется значение оптимизируемой (целевой) функции. В результате реализации GS-алгоритма будет определен «лучший» узел с «лучшим» значением целевой функции. Координаты этого узла в дальнейшем могут быть использованы в качестве координат новой глобально «лучшей» частицы в рое.

DOE-алгоритм обычно используется для решения задач оптимизации в пространстве поиска D-2, однако легко может быть адаптирован для выполнения расчетов в пространстве произвольной размерности  $n$ . Поскольку в дальнейшем планируется использовать гибридную версию PSO-алгоритма с применением DOE-алгоритма именно для решения задач оптимизации в пространстве поиска D-2 (т. е. при  $n = 2$ ), а также по причине хорошей наглядности реализации DOE-алгоритма в этом пространстве, дальнейшее описание реализации DOE-алгоритма на шаге 4 гибридной версии PSO-алгоритма приведено для частного случая в пространстве поиска D-2.

*Шаг 1.* Определить в границах диапазонов  $[d_{\min}^j, d_{\max}^j]$  ( $j = 1, 2$ ) 13 узлов сетки (на рис. 2б узлы первой итерации DOE-алгоритма помечены маркерами круглой формы белого цвета, а узлы второй итерации — маркерами квадратной формы серого цвета, при этом узлы, участвующие на нескольких итерациях, помечены дважды маркерами круглой и квадратной формы). При этом центральный узел (центр оид сетки) с координатами  $\chi^j$  ( $j = 1, 2$ ) (пример на рис. 2б — маркер круглой формы с выделенным контуром) соответствует глобально «лучшей» частице роя, а ширина диапазонов поиска на текущей итерации DOE-алгоритма определяется как  $S^j = d_{\max}^j - d_{\min}^j$  ( $j = 1, 2$ ).

Координаты узлов такой сетки определяются следующим образом (при движении по сетке из нижнего левого узла снизу вверх слева направо):

$$\begin{aligned} & [\chi^1 - S^1 / 2, \chi^2 - S^2 / 2], [\chi^1 - S^1 / 2, \chi^2 + S^2 / 2], [\chi^1 + S^1 / 2, \chi^2 + S^2 / 2], \\ & [\chi^1 + S^1 / 2, \chi^2 - S^2 / 2], [\chi^1 - S^1 / 2, \chi^2], [\chi^1, \chi^2 + S^2 / 2], [\chi^1 + S^1 / 2, \chi^2], \\ & [\chi^1, \chi^2 - S^2 / 2], [\chi^1 - S^1 / 4, \chi^2 - S^2 / 4], [\chi^1 - S^1 / 4, \chi^2 + S^2 / 4], \\ & [\chi^1 + S^1 / 4, \chi^2 + S^2 / 4], [\chi^1 + S^1 / 4, \chi^2 - S^2 / 4], [\chi^1, \chi^2]. \end{aligned}$$

*Шаг 2.* Вычислить значение целевой функции в каждом узле сетки и найти координаты  $\varphi^j$  ( $j = 1, 2$ ) узла с «лучшим» значением целевой функции.

*Шаг 3.* Переопределить ширину диапазонов поиска как  $S^j / 2$  ( $j = 1, 2$ ) и использовать вычисленные таким образом значения в качестве новых значений  $S^j$  ( $j = 1, 2$ ) для следующей итерации DOE-алгоритма.

При этом новые границы диапазонов поиска по сетке для следующего шага переопределяются как:

$$d_{\min}^j = \varphi^j - S^j/2, \quad (6)$$

$$d_{\max}^j = \varphi^j + S^j/2. \quad (7)$$

*Шаг 4.* Перейти к шагу 1, если не исчерпано количество итераций DOE-алгоритма, иначе — завершить работу алгоритма. При этом в качестве новых координат центрального узла сетки  $\chi^j$  ( $j=1, 2$ ) (пример на рис. 2б — маркер квадратной формы с выделенным контуром) принимаются значения координат «лучшего» узла  $\varphi^j$  ( $j=1, 2$ ), найденного на текущей итерации DOE-алгоритма.

Следует отметить, что границы диапазонов  $[d_{\min}^j, d_{\max}^j]$  ( $j=1, 2$ ) для первой итерации DOE-алгоритма вычисляются на основе формул (4) и (5) на шаге 3 гибридной версии PSO-алгоритма, а для всех остальных итераций DOE-алгоритма — на основе формул (6) и (7) на шаге 3 самого DOE-алгоритма.

При реализации DOE-алгоритма выполняется контроль за допустимостью вновь вычисленных границ диапазонов поиска. Если на некоторой текущей итерации DOE-алгоритма координаты «лучшего» найденного узла оказались вблизи текущих границ диапазонов поиска по сетке, то при построении сетки на следующей итерации DOE-алгоритма возможен выход за пределы изначально заданных (допустимых) в гибридной версии PSO-алгоритма границ диапазонов поиска  $[range_{\min}^j, range_{\max}^j]$  ( $j=1, 2$ ). В случае если после вычисления по формулам (6) и (7) новых границ диапазонов поиска по сетке  $[d_{\min}^j, d_{\max}^j]$  ( $j=1, 2$ ) оказалось, что выполняется одно из условий  $d_{\min}^j < range_{\min}^j$  при некотором  $j = j^* \in \{1, 2\}$  или  $d_{\max}^j > range_{\max}^j$  при некотором  $j = j^* \in \{1, 2\}$ , т. е. произошел выход за пределы изначально заданных (допустимых) в гибридной версии PSO-алгоритма границ диапазонов поиска, сетка сужается до новых границ диапазонов поиска по формулам если  $d_{\max}^j > range_{\max}^j$  при некотором  $j = j^* \in \{1, 2\}$ , то

$$d_{\min}^{j^*} = \varphi^{j^*} - (\varphi^{j^*} - range_{\min}^{j^*}), \quad (8)$$

$$d_{\max}^{j^*} = \varphi^{j^*} + (\varphi^{j^*} - range_{\min}^{j^*}); \quad (9)$$

если  $d_{\max}^j > range_{\max}^j$  при некотором  $j = j^* \in \{1, 2\}$ , то

$$d_{\min}^{j^*} = \varphi^{j^*} - (range_{\max}^{j^*} - \varphi^{j^*}), \quad (10)$$

$$d_{\max}^{j^*} = \varphi^{j^*} + (range_{\max}^{j^*} - \varphi^{j^*}). \quad (11)$$

В результате реализации данной гибридной версии PSO-алгоритма производится поиск решения той или иной оптимизационной задачи.

#### 4. Результаты экспериментальных исследований

Целесообразность использования предлагаемых гибридных алгоритмов подтверждается результатами решения нескольких оптимизационных задач. В частности, были рассмотрены такие задачи, как задача поиска оптимального глобального решения ряда тестовых функций и задача поиска оптимальных значений параметров SVM-классификатора.

При выполнении экспериментальных исследований были использованы:

- канонический PSO-алгоритм (далее базовый PSO-алгоритм);
- гибридная версия базового PSO-алгоритма на основе классического GS-алгоритма поиска по сетке (далее PSO-GS-алгоритм);
- гибридная версия базового PSO-алгоритма на основе DOE-алгоритма поиска по сетке (далее PSO-DOE-алгоритм).

Программная реализация алгоритмов проводилась с помощью высокоуровневого языка программирования Python (среда программирования Python 3.5). При этом использовался SVM-алгоритм из библиотеки машинного обучения Scikit-Learn. Реализация оптимизационных алгоритмов для тестовых функций. Сравнительный анализ указанных выше трех оптимизационных алгоритмов был выполнен в рамках решения задачи поиска глобального оптимума ряда тестовых функций. В частности, результаты экспериментальных исследований для целевых функций Растригина, Розенброка и функции сферы приведены в [8].

Полученные результаты [8] позволяют сделать вывод, что базовый PSO-алгоритм характеризуется худшими значениями показателей качества [8], такими как среднее время сходимости, средняя скорость сходимости, среднее значение целевой функции, доля успешных запусков, по сравнению с PSO-GS-алгоритмом и PSO-DOE-алгоритмом. При этом PSO-DOE-алгоритм по сравнению с PSO-GS-алгоритмом позволяет находить глобальный оптимум тестовых функций в среднем за меньшее время, а также при его реализации обеспечивается большая доля успешных запусков и достигается меньшая погрешность вычисления значений глобального оптимума тестовых функций [8]. Реализация оптимизационных алгоритмов для настройки параметров SVM-классификатора. Экспериментальным путем была подтверждена перспективность применения PSO-GS-алгоритма и PSO-DOE-алгоритма для решения задачи подбора оптимальных значений параметров SVM-классификатора.

Исследования проводились на наборах данных, заимствованных из проекта Statlog и библиотеки машинного обучения UCI. Для всех наборов данных выполнялась бинарная классификация. В настоящей работе использовались следующие наборы данных (см. табл. 1):

- набор данных для медицинской диагностики болезни сердца – Heart (270 объектов, 13 характеристик; источник [http:// archive.ics.uci.edu/ml/machine-learning-databases/statlog/heart/](http://archive.ics.uci.edu/ml/machine-learning-databases/statlog/heart/));
- набор данных для кредитного скоринга о заявках на потребительские кредиты — Australian (690 объектов, 14 характеристик; источник <http://archive.ics.uci.edu/ml/machine-learning-databases/statlog/australian/>);
- набор тестовых данных — МОТП12 (400 объектов, 2 характеристики; источник [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Изображение:МОТП12\\_svm\\_example.rar](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Изображение:МОТП12_svm_example.rar)).

Расчеты с использованием гибридных версий PSO-алгоритма выполнялись при разном суммарном количестве  $\gamma$  узлов поиска по сетке (т. е. при разном суммарном количестве вычислений значений целевой функции в узлах сетки), которое вычислялось для PSO-GS-алгоритма и PSO-DOE-алгоритма соответственно по формулам

$$\gamma = (r + 1)^2, \quad (12)$$

$$\gamma = 13 \cdot h, \quad (13)$$

где  $r$  — количество интервалов разбиений на каждом  $j$ -м диапазоне поиска по сетке  $[d_{\min}^j, d_{\max}^j]$  ( $j = 1, 2$ );  $h$  — количество итераций DOE-алгоритма.

Выбор оптимальных значений параметров SVM-классификатора производился по результатам нескольких экспериментов для разных значений параметров  $r$  и  $h$  (рис. 3, частный случай для выборки МОТП12). На основе критерия минимального значения времени первого нахождения оптимума в качестве оптимальных в настоящей работе выбраны следующие значения:  $r = 5$  и  $h = 5$ .

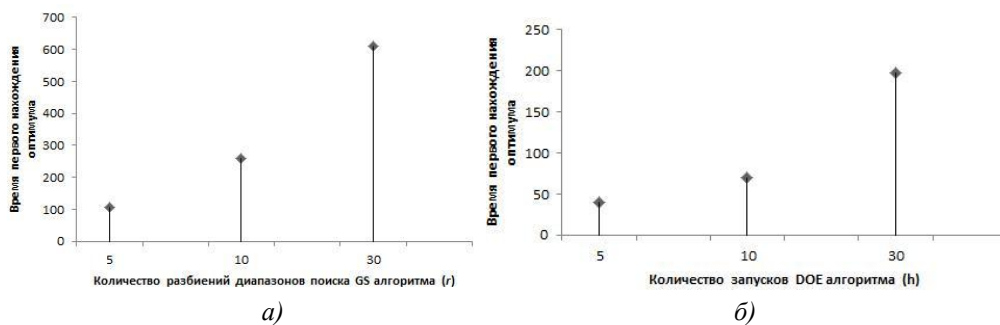


Рисунок 3. Определение оптимального количества вычислений по сетке при реализации гибридных версий PSO-алгоритма на основе: а) GS-алгоритма; б) DOE-алгоритма

При разработке SVM-классификатора использовалась радиальная базисная функция ядра (2). Вследствие чего PSO-алгоритм и его гибридные версии применялись для поиска оптимальных значений двух параметров SVM-классификатора: параметра регуляризации  $C$  и коэффициента функции ядра  $\sigma$  (т. е. расчеты выполнялись в пространстве поиска D-2). При этом изначально полагалось, что радиально базисная функция является априори оптимальной функцией ядра в контексте решаемой задачи классификации.

Значения параметров SVM-классификатора полагались оптимальными, если они обеспечивали высокую точность классификации и минимальное количество опорных векторов на обучающей выборке. Оценка качества классификации может быть выполнена с применением различных показателей качества классификации, среди которых следует выделить: показатель общей точности (Accuracy, Acc), называемый также показателем общего успеха (Overall Success Rate, OSR); показатель чувствительности (Sensitivity, Se), называемый также показателем полноты (Recall, Re); показатель специфичности (Specificity, Sp); показатель точности (Precision, Pr); а также показатель сбалансированной F-меры (F-measure, F1), которые вычисляются в соответствии с формулами

$$OSR = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (14)$$

$$Se = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (15)$$

$$Sp = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (16)$$

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (17)$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Pr \cdot Re}{Pr + Re}, \quad (18)$$

где  $TP$  — количество истинно положительных наблюдений;  $TN$  — количество истинно отрицательных наблюдений;  $FP$  — количество ложноположительных наблюдений («ложных обнаружений», ошибка II рода);  $FN$  — количество ложноотрицательных наблюдений («ложных пропусков», ошибка I рода);  $Re = Se$ .

Показатель общей точности OSR показывает долю истинно предсказанных наблюдений по отношению к общему числу наблюдений классификатора.

Показатель чувствительности  $Se$  показывает, какая доля от общего числа реальных положительных наблюдений предсказана в качестве положительных, т. е. говорит о том, насколько классификатор «пессимистичен» в своих оценках или как часто он «отбрасывает» (а это происходит при низком значении показателя  $Se$ )



наблюдения нужного класса. Этот показатель также называют показателем полноты  $Re$ .

Показатель специфичности  $Sr$  показывает, какая доля от общего числа реальных отрицательных наблюдений предсказана в качестве отрицательных.

Показатель точности  $Pr$  показывает, сколько из предсказанных положительных наблюдений являются действительно положительными, т. е. говорит о том, насколько классификатор оптимистичен в своих оценках или как часто он «предпочитает» (а это происходит при низком значении показателя  $Pr$ ) присоединять наблюдения других классов к заданному.

Показатель сбалансированной F-меры ( $F1$ ) вычисляет гармоническое среднее между показателем точности  $Pr$  и показателем полноты  $Re$ . При этом в формуле (18) этим показателям приписан одинаковый вес.

Во избежание недообучения и переобучения SVM-классификатора полагалось, что высокая точность классификации достигается в случае, если количество ошибок на обучающей и тестовой выборках данных минимально, при этом количество ошибок SVM-классификатора на обучающей и тестовой выборках данных практически не отличается [1, 8].

Для всех запусков алгоритмов оптимизации были установлены одинаковые значения параметров PSO-алгоритма и одинаковые диапазоны поиска значений искомым параметров SVM-классификатора.

С целью обеспечения объективного сравнения результатов экспериментов запуск базового PSO-алгоритма и предлагаемых PSO-GS-алгоритма и PSO-DOE-алгоритма для конкретного набора данных инициализировался идентичными случайно сгенерированными начальными популяциями частиц. Кроме того, использовались идентичные случайные разбиения исходного набора данных на обучающую и тестовую выборки данных. При этом в процессе построения SVM-классификатора размер тестовой выборки составлял 20% от размера исходной выборки.

Для оценки качества бинарной классификации использовался ROC-анализ [3]. ROC-кривая, также известная как кривая ошибок, отображает соотношение между долей верных положительных классификаций от общего числа положительных классификаций (true positive rate — TPR) и долей ошибочных положительных классификаций от общего числа отрицательных классификаций (false positive rate — FPR). Показатель  $AUC$  (площадь под ROC-кривой) дает количественную интерпретацию ROC-кривой. Считается, что чем выше показатель  $AUC$ , тем качественнее классификатор.

На рис. 4 изображены ROC-кривые для SVM-классификаторов, построенные по данным тестовых выборок для трех описанных выше исходных наборов данных,



а также показатель  $AUC$  для каждого SVM-классификатора. Настройка параметров SVM-классификаторов производилась с использованием базового PSO-алгоритма и его гибридных версий.

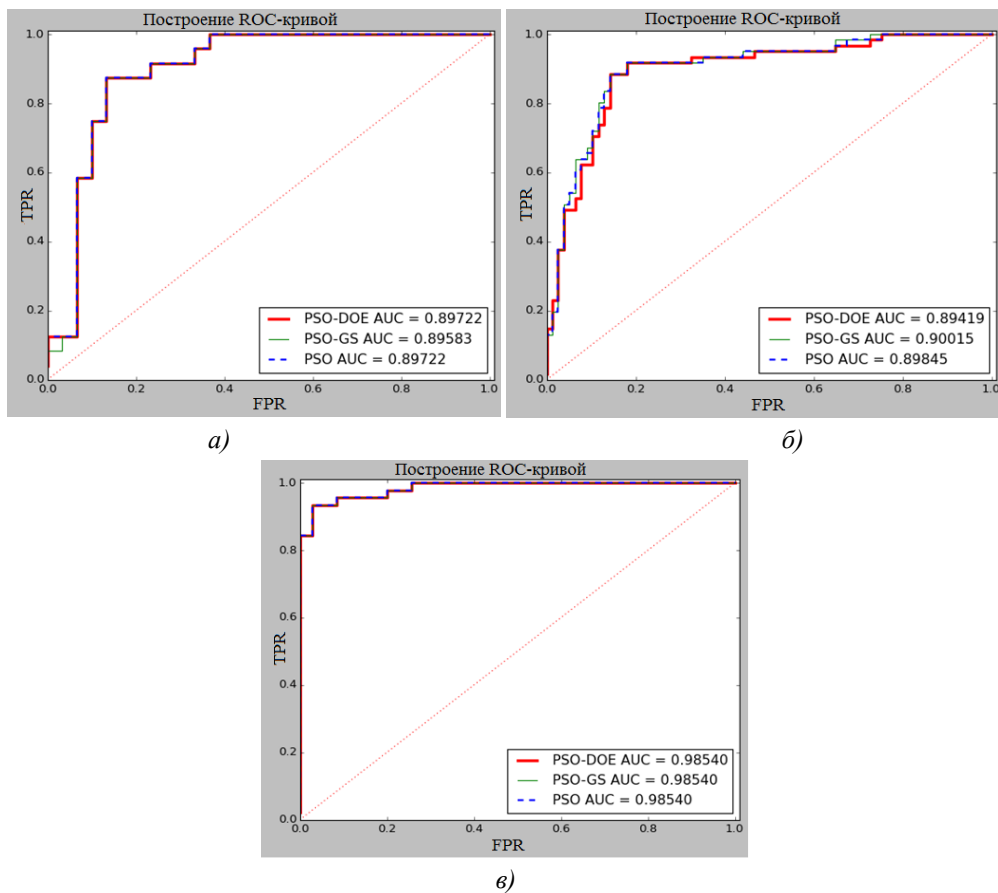


Рисунок 4. ROC-кривые для SVM-классификаторов, построенных с использованием базового PSO-алгоритма и его гибридных версий: а) для выборки Heart; б) для выборки Australian; в) для выборки MOTSI2

Результаты ROC-анализа, в том числе и результаты сравнительного анализа значений показателя  $AUC$  показывают, что, на первый взгляд, расхождения SVM-классификаторов совершенно незначительны и сложно определить качество классификации. Однако при представлении результатов классификации наборов данных в виде таблицы 1, в которой отражено количество верно и ошибочно классифицируемых объектов, преимущество по качеству классификации следует отдать гибридным версиям базового PSO-алгоритма.

Таблица 1. Результаты реализации алгоритмов

Набор данных	Количество объектов	Количество признаков	Версия PSO алгоритма	Найденные параметры		Количество ошибок (класс «1»/класс «-1»)		Количество опорных векторов	Точность (%)	Чувствительность (%)	Специфичность (%)	F-мера (F1)	Номер итерации первого нахождения оптимума	Время первого нахождения оптимума (сек.)	Время (общее) (сек.)
				C	$\sigma$	На обучающей выборке	На тестовой выборке								
Heart	270	13	Базов. PSO	8.87	0.05	6 (2/4)	7 (3/4)	108	95.19	96.67	93.33	0.9571	17	523	642
			PSO-GS	9.82	0.05	5 (1/4)	7 (3/4)	107	95.56	97.33	93.33	0.9605	9	362	714
			<b>PSO-DOE</b>	<b>9.98</b>	<b>0.05</b>	<b>5 (1/4)</b>	<b>7 (3/4)</b>	<b>107</b>	<b>95.56</b>	<b>97.33</b>	<b>93.33</b>	<b>0.9605</b>	<b>6</b>	<b>243</b>	<b>712</b>
Australian	690	14	Базов. PSO	9.48	0.13	11 (5/6)	18 (7/11)	276	95.80	96.09	95.56	0.9532	12	1546	2872
			PSO-GS	9.73	0.13	12 (5/7)	18 (7/11)	273	95.65	96.09	95.30	0.9516	5	1031	3481
			<b>PSO-DOE</b>	<b>9.99</b>	<b>0.13</b>	<b>10 (5/5)</b>	<b>18 (7/11)</b>	<b>273</b>	<b>95.95</b>	<b>96.09</b>	<b>95.82</b>	<b>0.9547</b>	<b>4</b>	<b>789</b>	<b>3292</b>
MOT12	400	2	Базов. PSO	9.89	9.45	12 (5/7)	4 (3/1)	122	96.00	96.10	95.90	0.9610	8	171	441
			PSO-GS	9.89	9.49	12 (5/7)	4 (3/1)	121	96.00	96.10	95.90	0.9610	4	107	653
			<b>PSO-DOE</b>	<b>10</b>	<b>9.47</b>	<b>12 (5/7)</b>	<b>4 (3/1)</b>	<b>121</b>	<b>96.00</b>	<b>96.10</b>	<b>95.90</b>	<b>0.9610</b>	<b>1</b>	<b>40</b>	<b>509</b>

На основе данных таблицы 1 можно сделать вывод, что PSO-GS-алгоритм и PSO-DOE-алгоритм решают задачу поиска оптимальных значений параметров SVM-классификатора эффективнее, чем базовый PSO-алгоритм. В частности, сокращается время поиска оптимального решения приблизительно в 3–5 раз, и достигаются лучшие значения показателей качества SVM-классификатора, т. е. наиболее высокие значения показателей общей точности  $OSR$ , чувствительности  $Se$  и специфичности  $Sp$ , а также меньшие значения количества опорных векторов.

При этом именно использование PSO-DOE-алгоритма в большинстве случаев обеспечивает лучшую скорость сходимости к оптимальному решению (т. е. меньшее время первого обнаружения оптимального решения).

## 5. Заключение

Результаты экспериментальных исследований подтверждают целесообразность использования предлагаемых гибридных версий PSO-алгоритма в рамках решения задачи построения эффективного SVM-классификатора. Достоинство гибридизации базового PSO-алгоритма с алгоритмами поиска по сетке заключается в сокращении

временных затрат на поиск оптимальных значений параметров SVM-классификатора при сохранении, а в некоторых случаях — и улучшении качества классификационных решений.

Полученные результаты были достигнуты благодаря объединению возможностей PSO-алгоритма с положительными чертами алгоритмов поиска по сетке. В частности, был реализован дополнительный поиск по сетке в области потенциального глобально «лучшего» положения частиц в рое с целью дополнительного обновления популяции роя частиц и удаления «худших» частиц.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с разработкой рекомендаций по применению гибридных оптимизационных алгоритмов в рамках решения задачи построения SVM-классификаторов для несбалансированных наборов данных.

## Литература

- [1] Демидова Л. А., Соколова Ю. С. Аспекты применения алгоритма роя частиц в задаче разработки SVM-классификатора // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2015. № 53. С. 84–92.
- [2] Клюева И. А. Гибридный алгоритм настройки параметров интеллектуального классификатора данных // *Математические методы в технике и технологиях*. 2015. Т. 7. С. 234–238.
- [3] Demidova L., Sokolova Yu., Klyueva I., Stepanov N., Tyart N. Intellectual Approaches to Improvement of the Classification Decisions Quality On the Base Of the SVM Classifier // XII International Symposium «Intelligent Systems-2016» (INTELS'2016). 2016. P. 156–161.
- [4] Joachims T. A support vector method for multivariate performance measures // In Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML). — 2005. P. 377–384.
- [5] Yu L., Wang S., Lai K. K., Zhou L. Bio-Inspired Credit Risk Analysis. Computational Intelligence with Support Vector Machines — Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008.
- [6] Vapnik V. Statistical Learning Theory. — New York : John Wiley & Sons, 1998.
- [7] Ren Y., Bai G. Determination of optimal SVM parameters by using GA/PSO // *Journal of Computers*. 2010. Vol. 5. No. 8. P. 1160–1168.
- [8] Демидова Л. А., Клюева И. А. Разработка и исследование гибридных версий алгоритма роя частиц на основе алгоритмов поиска по сетке // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2016. № 3 (57). С. 107–117.
- [9] Демидова Л. А., Никульчев Е. В., Соколова Ю. С. Классификация больших данных: использование SVM-ансамблей и SVM-классификаторов с модифицированным роевым алгоритмом // *Cloud of Science*. 2016. Т. 3, № 1. С. 5–42.
- [10] Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

- [11] Ключева И. А. Исследование характеристик сходимости алгоритма роя частиц и его модификации в решении задачи глобальной оптимизации // *Современные технологии в науке и образовании*. 2016. Т. 2. С. 46–50.
- [12] Ключева И. А. Подходы к модификации алгоритма роя частиц // *Информационные технологии в процессе подготовки современного специалиста*. 2015. Вып. 19. С. 40–46.
- [13] Курейчик В. М., Кажаров А. А. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2011. № 7 (120). С. 30–36.
- [14] Demidova L., Klyueva I., Pylkin A. The Study of Characteristics of the Hybrid Particle Swarm Algorithm in Solution of the Global Optimization Problem // 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). — IEEE, 2016. P. 322–325.
- [15] Sun J., Lai C. H., Wu X. J. Particle Swarm Optimisation: Classical and Quantum Perspectives. CRC Press, 2011.
- [16] Hu X., Eberhart R. C., Shi Y. Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization // 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium Proceedings. — IEEE Service Center : Indianapolis, 2003. P. 193–197.

**Авторы:**

Лилия Анатольевна Демидова — доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета

Ирина Алексеевна Ключева — аспирант кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета

## Development of the SVM Classifier by means of the Hybrid Versions of the Particle Swarm Optimization Algorithm Based on the Grid Search

Liliya Demidova, Irina Klyueva

Ryazan State Radio Engineering University  
Gagarin Str., 59/1, Ryazan, Russian Federation, 390005

e-mail: liliya.demidova@rambler.ru, i.aleschenko@yandex.ru

*Abstract.* The approaches to the problem solving of searching of the parameters of the SVM classifier based on the hybridization of the particle swarm optimization algorithm (PSO algorithm) and the grid search algorithms with the aim of providing of high quality classification decisions have been considered. The paper presents two hybrid versions of the basic PSO algorithm, involving the use of the classical Grid Search (GS) algorithm and Design of Experiment (DOE) algorithm correspondingly. It is proposed to use the canonical PSO-algorithm as the basic algorithm. The results of experimental studies confirm the application efficiency of the hybrid versions of the basic PSO-algorithm with the aim of reducing of the time expenditures for searching the optimum parameters of the SVM classifier while maintaining of high quality of its classification decisions.

*Keywords:* classification, classification quality indicator, hybridization, particle swarm optimization algorithm, grid search algorithm, SVM classifier, regularization parameter, radial basis kernel function.

### References

- [1] Demidova L. A., Sokolova Y. S. (2015) *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 53:84–92. [In Rus]
- [2] Klyueva I. A. (2015) Gibridnyj algoritm nastrojki parametrov intellektual'nogo klassifikatora dannyh. In Book *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah*, vol. 7, pp. 234–238. [In Rus]
- [3] Demidova L., Sokolova Yu., Klyueva I., Stepanov N., Tyart N. (2016) Intellectual Approaches to Improvement of the Classification Decisions Quality On the Base Of the SVM Classifier. In Proc. XII International Symposium “Intelligent Systems-2016” (INTELS’2016), pp. 156–161.
- [4] Joachims T. (2005) A support vector method for multivariate performance measures. In Proc. of the International Conference on Machine Learning (ICML), pp. 377–384.
- [5] Yu L., Wang S., Lai K. K., Zhou L. (2008) *Bio-Inspired Credit Risk Analysis. Computational Intelligence with Support Vector Machines*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- [6] Vapnik V. (1998) *Statistical Learning Theory*. New York, John Wiley & Sons.

- [7] Ren Y., Bai G. (2010) *Journal of Computers*, 5(8):1160–1168.
- [8] Demidova L. A., Klyueva I. A. (2016) *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 57:107–117. [In Rus]
- [9] Demidova L. A., Nikulchev E. V., Sokolova Yu. S. (2016) *Cloud of Science*, 3(1):5–42. [In Rus]
- [10] Karpenko A. P. (2014) *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj*. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana. [In Rus]
- [11] Klyueva I. A. (2016) *Sovremennye tehnologii v nauke i obrazovanii*, 2:46–50. [In Rus]
- [12] Klyueva I. A. (2015) *Informacionnye tehnologii v processe podgotovki sovremennogo specialista*, 19:40–46. [In Rus]
- [13] Kurejchik V. M., Kazharov A. A. (2011) *Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 120:30–36. (In Rus)
- [14] Demidova L., Klyueva I., Pylkin A. (2016) The Study of Characteristics of the Hybrid Particle Swarm Algorithm in Solution of the Global Optimization Problem. In Proc 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), pp. 322–325.
- [15] Sun J., Lai C. H., Wu X. J. (2011) *Particle Swarm Optimisation: Classical and Quantum Perspectives*. CRC Press.
- [16] Hu X., Eberhart R. C., Shi Y. (2003) Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization. In Proc. 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium, pp. 193–197.

## Метод объектно-ориентированного представления многоуровневых семантических моделей

С. Э. Греггер\*, С. В. Поршнева\*\*

*\*Нижнетагильский технологический институт (филиал)  
ГОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина»  
622013 Свердловская обл., Нижний Тагил, Красногвардейская, 59,*

*\*\*ГОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина», Екатеринбург.  
620000, г. Екатеринбург, ул. Ленина, 51  
e-mail: segreger@gmail.com s.v.porshnev@urfu.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются особенности описания семантики и разработки программной реализации компонента для представления элементов многоуровневых семантических моделей при использовании объектно-ориентированного подхода. Обсуждается применение понятий *power type*, *slabject* и метода многоуровневого объектно-ориентированного отображения при многоуровневом семантическом моделировании.

*Ключевые слова:* многоуровневых семантические модели, объектно-ориентированные отображения, объектно-ориентированные системы.

### 1. Введение

При разработке моделей предметной области, обладающей сложной структурой, состоящей из нескольких логических уровней, традиционно руководствуются стандартом MOF (Mega-Object Facility) и используют языки моделирования, основанные на метамоделях и поддерживающие ограниченное количество уровней моделирования. Известные технологии метамоделирования, например EMF, предоставляют возможность использования двух уровней классификации: метамодель, предоставляющую классы, и модель, содержащую объекты классов метамодели. При этом для изменения доступен, как правило, только уровень модели. В то же время мультиуровневый подход к проектированию не ограничивает число уровней, однако при наличии нескольких уровней требуется уточнение характера соотношений между классами и объектами, а также способ объектно-ориентированного представления, не зависящий от числа уровней. В этой связи рассмотрение вопросов, связанных с семантической интероперабельностью многомерных моделей и их объектно-ориентированного представления, является актуальным.

## 2. Существующие подходы к решению проблемы

В [1] была предложена методология разработки программного обеспечения, для практического использования которой была создана метамодель ISO24744, содержащая понятия *power type* и *clabject*. Цель разработки данной методологии состояла в обеспечении возможности построения множества классификационных уровней, объединенных в мультиуровневую модель. Основная проблема, решенная в обсуждаемой методологии, состояла в построении унифицированного и адаптируемого метода классификации элементов предметной области. (Здесь под унификацией понимается наличие возможности отображения всех моделей всех уровней моделирования через ограниченный набор концепций и символов.) Адаптируемость обеспечивается тем, что все концепты моделей каждого из уровней представляются в виде редактируемых данных, которые могут быть изменены в процессе взаимодействия. Изменение элемента на любом уровне немедленно отражается на всех связанных с ним элементах. В методологии введены три уровня моделирования – метамодели, метода и проекта. Структурная схема данной многоуровневой модели представлена на рис. 1.

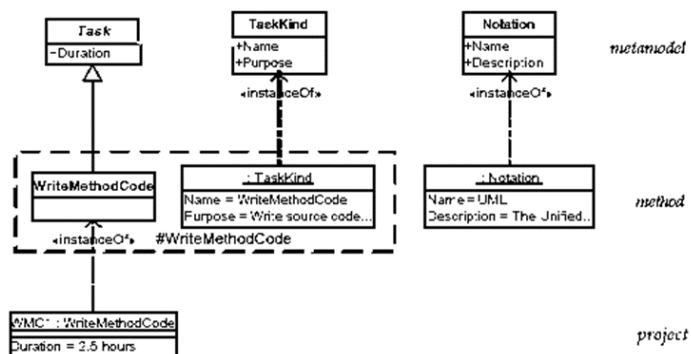


Рисунок 1. Многоуровневая модель

Из рис. 1 видно, что между элементами *power type* *Task/\*Task* и *clabject* *#WriteMethodCode* установлено отношение *instanceOf* и, тем самым, определен класс *Task/\*Task*, специализирующий класс «паттерн *power type*», который на уровне проекта представлен объектом WMC1. Важно, что атрибуты объекта зеркально не отражают атрибуты *clabject*.

Проводя исследование особенностей процесса метамоделирования, авторы отмечают, что, следуя концепции «строгого метамоделирования», в большинстве ме-



тодологий классы метамодели используются для построения классов уровня методов путем их специализации, проводимой через установление отношения реализации (*instanceOf*). Классы уровня метода реализуются через объекты уровня проекта. Это создает противоречие: методология представляется коллекцией классов, а проект — коллекцией объектов. В то время как способы «волшебного» превращения классов в объекты в методологиях не определены, так как методология позволяет только осуществлять контроль над преобразованием, проводимым на границе между уровнем метода и уровнем проекта.

Классы уровня метамодели рассматриваются здесь как «сильные типы» (*power type*) для классов слоя метода. Каждому объекту *power type* класса ставится в соответствие группа объектов класса слоя метода, наследующего *power type* класс. При этом классы уровня метода становятся *partitioned* и определяют разделение на группы объекты в слое проекта. Таким образом, в то время как *power types* задают разделение объектов в слое метода, *partitioned*-типы задают разбиение объектов в слое проекта. Авторы назвали такое представление двойным представлением. Строгое наследование частично подменяется прототипированием — следованием некоторому образцу, при котором наличие связи между объектами *power type* классов на уровне метамодели, задающих классификацию, определяет необходимость установления связи такого же типа между классами уровня метода, классифицированными этими объектами. Каждому классу и его объекту уровня проекта ставится *partitioned* класс уровня метода и объект *power type* класса уровня метамодели. Такая композиция и получила название *clabject*. Моделирование в понятиях *clabject* обеспечивает возможность определения в метамодели характеристик элементов и правил их организации как уровня метода, так и уровня проекта, и их передачу на необходимые уровни вниз через специализацию и классификацию, вверх — через создание иерархий.

Atkinson и Kühne [2] ввели понятие *potency* и метод *deep instantiation* порождения объектов между уровнями иерархии специализации, основанный на понятии возможностей (*features*). При этом «традиционный» метод порождения объектов из классов, присущий объектно-ориентированному подходу, рассматривается как частный случай более общего механизма, названного «*deep instantiation*», при котором производится специализация между *clabjects*, а не между классами и объектами. При специализации *clabject A* на основе некоторого *clabject B* каждой возможности (*feature*) элемента, представленной его атрибутами и связями, приписывается числовой атрибут *potency*, значение которого определяет способ трансформации возможности элемента. Для каждой возможности элемента *A* со значением *potency*  $> 0$  в элементе *B* определяется возможность со значением *potency*, уменьшенным на 1. При нулевом значении *potency* возможность атрибута элемента *A* представля-

ется в элементе В как атрибут простого типа, а ассоциация элемента А представляется в элементе В ссылкой на элемент с  $potency = 0$ . На всех уровнях моделирования элементы уровней характеризуются атрибутами двух типов — с  $potency > 0$  и с  $potency = 0$ . Проектный уровень представлен элементами, с атрибутами у которых  $potency = 0$ . Введение понятия “*potency*” позволило избавиться от отношения *power type* и определить способ образования объектов проектного уровня из классов уровня метода с учетом спецификаций, задаваемых уровнем метамодели. Таким образом было показано существование унифицированного концепта (*clabject*), позволяющего проводить многоуровневое моделирование для различных предметных областей. Для обеспечения многоуровневого моделирования была предложена архитектура ортогональной классификации ОСА (Orthogonal Classification Architecture), основанной на применении принципов строгого метамоделирования и *deep instantiation*. Между уровнями в многоуровневой модели устанавливаются отношения классификации, когда класс более высокого уровня рассматривается как классификатор классов нижних уровней [3].

### 3. Постановка задачи

С точки зрения многоуровневого семантического моделирования существуют семантические сети, связывающие классы *C* и индивидуалы этих классов *O* посредством связей *R*. В качестве атомарного элемента обычно используют так называемый RDF-триплет (RDF — Resource Description Framework) — набор информационных сущностей «объект-предикат-субъект». Предметная область, описанная таким способом, обладает компьютерной семантикой, т. е. имеется возможность устанавливать и обрабатывать смысловые отношения между понятиями с помощью программных алгоритмов.

Семантическое или онтологическое моделирование рассматривается как способ использования гетерогенных информационных ресурсов с целью организации их в рамках единого информационного пространства и как способ организации взаимодействия разнородных информационных и инструментальных систем.

Решение проблемы семантической интероперабельности видится в создании универсальных, кросс-платформенных информационных структур, использующих семантические метаописания данных, аннотирующих как собственные, так и внешние разнородные информационные массивы. Процесс описания предметной области сопровождается привязкой к ней спецификаций, выраженной в концептах некоторой онтологии, согласованием понимания предметных областей взаимодействующих ресурсов и построения их взаимодействия, основываясь на согласованной семантике предметной области. Унификация информационных моделей является необходимым шагом при работе с неоднородными онтологическими спецификаци-

ями. Модели приводятся к некоему каноническому однородному представлению, в котором будут производиться все дальнейшие манипуляции спецификациями. Модели онтологий называются исходными, а каноническая модель — целевой. Задача унификации множества исходных информационных моделей становится актуальной при необходимости масштабирования по количеству неоднородных моделей. При унификации моделей должно быть построено отображение исходных моделей в целевую. При отображении моделей производится поиск близких конструкций моделей и их выражение друг через друга [4].

Существует необходимость в декомпозиции семантической модели на атомарные более крупные элементы — триплеты. Частично эта проблема была решена в языке OWL введением понятий онтологических классов и онтологических связей в версии языка OWL 2, позволяющей наследовать онтологические классы от индивидуальных онтологических классов. Стало возможным использование конструкций, в которых онтологический класс имеет фреймы, связанные как с другими онтологическими классами, так и с индивидуалами онтологических классов. Структурно такие конструкции подобны *clabjects*. Но новые возможности онтологического моделирования практически не поддерживают существующие инструменты онтологического моделирования. С другой стороны, при разработке инструментария для семантического моделирования в основном используются объектно-ориентированные методологии и технологии. При этом обычно создается некоторая семантическая модель в рамках некоторой онтологии, примитивы и результаты моделирования представлены в виде RDF-триплетов, хранимых в реляционной базе данных. В соответствии с традиционной технологией объектно-реляционного отображения каждому онтологическому классу, представленному набором триплетов, ставится в соответствие объектно-ориентированный класс [5], что связано с высокой трудоемкостью разработки, все еще плохо поддающейся автоматизации. Для повышения эффективности необходимо, чтобы каждой семантической конструкции когнитивного уровня рассуждения был сопоставлен набор унифицированных объектов, размещенный в памяти соответствующего инструмента, автоматически создаваемого в соответствии с моделью, также представленной в виде семантической сети. В этом случае появляются следующие возможности:

- проектирование компьютерных систем можно осуществлять на основе унифицированных логико-семантических моделей, рассматривая разработку логико-семантической модели проектируемой системы как первый этап ее проектирования;
- обеспечить модульную (компонентную, крупноблочную) разработку логико-семантических моделей компьютерных систем на основе биб-

лиотек совместимых типовых многократно используемых компонентов (онтологий, логических операций и т. д.);

- рассматривать различные варианты технической реализации компьютерных систем как различные способы интерпретации унифицированных логико-семантических моделей компьютерных систем, что дает возможность разрабатывать такие интерпретаторы независимо от проектирования конкретных систем и включать эти интерпретаторы в состав среды проектирования;
- обеспечить полную совместимость средств проектирования с проектируемыми системами — среда проектирования строится как интеллектуальная система на основе унифицированных логико-семантических моделей;
- включить в состав среды проектирования компьютерных систем комплекс интеллектуальных help-систем, ориентированных на повышение квалификации разработчиков;
- ориентироваться на методику поэтапного эволюционного проектирования компьютерных систем на основе быстрого создания прототипов [6].

#### 4. Компоненты хранения объектной семантической сети

Для реализации подхода, описанного в предыдущем разделе, необходимо принять решение о объектной модели унифицированного элемента, используемого для представления крупных элементов семантической сети как в оперативной, так и в долговременной памяти программного инструмента. Для построения систем проектирования, реализующих данный подход, необходимы программные компоненты и сервисы, обеспечивающие создание, хранение и управление унифицированными семантическими сетями, представленными в виде сетей унифицированных элементов.

В [7] на основе объектно-ориентированной модели семантической сети [8] нами был предложен набор компонентов  $CADT = \{Ontology, OntoClass, DatProperty, ObjectProp, ClsDataProperty, ClsObjectProperty, OntoIndividual, IndDataProperty, IndObjectProperty\}$ . Диаграмма классов набора представлена на рис. 2. Компоненты предназначены для представления семантической сети в объектно-ориентированной среде и хранения представления в объектно-ориентированной базе данных [9]. Было показано, что набор компонентов обеспечивает отображение высказываний языка абстрактной семантической сети в сеть объектов и позволяет создавать и сопровождать базы знаний через интерфейс пользователя веб-приложения. В настоящее время этот набор компонентов изменен.

Семантическая сеть  $G = \{\{Ci\}, \{Rj\}\}$  рассматривалась нами как множество узлов  $C$  и связей  $R$ , причем узел имеет тип из множества типов узлов  $TC = \{Onto, OCls, OntoInd\}$ , а связь — тип из множества типов связей  $TR = \{DatProp, ObjProp, ClsDatProp, ClsObjProp, IndDatProp, IndObjProp\}$ . В настоящий момент этот набор компонентов подвергся изменению с целью введения возможности взаимного семантического аннотирования элементов семантической сети. Эта возможность позволяет строить многоуровневую семантическую сеть, представляя ее в памяти как многоуровневую объектную модель, в соответствии с архитектурой ОСА.

Определим семантику узлов и связей:

- *Onto* — множество онтологических модулей  $O$ ;
- *DP* — множество элементов типа *DatProp*, определяющих сорта описания данных;
- *P* — множество элементов типа *ObjProp*, определяющих сорта связей;
- *OCls* — множество элементов типа *OntoCls*;
- *OI* — множество элементов типа *OntoInd*;
- $O = \langle title, id, OC, DP, OP, OI \rangle$  — онтологический модуль, представляющий сеть более низкого уровня, *title* — наименование узла, *id* — идентификатор узла;
- $OntoCls = \langle title, id, subClassOf, hasKindOf, rootclass, ClsDP, ClsOP \rangle$  — элемент сети, представляющий класс онтологии, *subClassOf* — множество классов, являющихся родительскими, *hasKindOf* — множество классов и объектов, аннотирующих класс семантическим описанием, *rootclass* — атрибут, указывающий на уровень в иерархии классов в модуле;
- $DatProp = \langle title, id, range:XMLSchemeDatetype \rangle$  — тип связи, определяющий характер представления элемента сети простым типом данных, где *range* — множество классов, наследующих класс *XMLSchemeDatetype*, представляющий семейство простых типов, определяет верхний уровень в иерархии элементов типа *ClsDP*;
- $ObjProp = \langle title, id, range:NotXMLSchemeDatetype \rangle$  — тип связи, определяющий характер связи элемента сети с элементами, не принадлежащими множеству простых типов данных, определяет верхний уровень в иерархии элементов типа *ClsOP*;
- $ClsDP = \langle title, id, parent, dataProperty:DPprop, range \rangle$  — элемент, представляющий множество значений атрибута класса *parent*, *dataProperty*, указывает на элемент в частной иерархии элементов *ClsDP*, *range* — ограничение, дополнительно накладываемое на множество ограничений на тип простых значений, определяемое иерархией *dataProperty*;

- $ClsOP = \langle title, id, parent, SubPropertyOf, range \rangle$  — элемент, представляющий множество допустимых связей атрибута с именем *title* класса *parent*, *SubPropertyOf* указывает на элемент в частной иерархии элементов *ClsOP*, *range* — ограничение, дополнительно накладываемое на множество ограничений, на тип связываемых элементов, определяемое иерархией *SubPropertyOf*;
- $OntoInd = \langle title, id, sourceClass, IndDP, IndOP \rangle$  — экземпляр класса онтологии, где *sourceClass* — родительский класс для экземпляра;
- $IndDP = \langle title, id, parent, dataProperty, range \rangle$  — элемент, представляющий множество значений атрибута класса *parent*, *dataProperty* указывает на элемент в частной иерархии элементов *ClsDP*, *range* — ограничение, дополнительно накладываемое на множество ограничений, на тип простых значений, определяемое иерархией *dataProperty*;
- $IndOP = \langle title, id, parent, SubPropertyOf, range \rangle$  — элемент, представляющий множество допустимых связей атрибута с именем *title* класса *parent*, *SubPropertyOf* указывает на элемент в частной иерархии элементов *ClsOP*, *range* — ограничение, дополнительно накладываемое на множество ограничений, на тип связываемых элементов, определяемое иерархией *SubPropertyOf*.

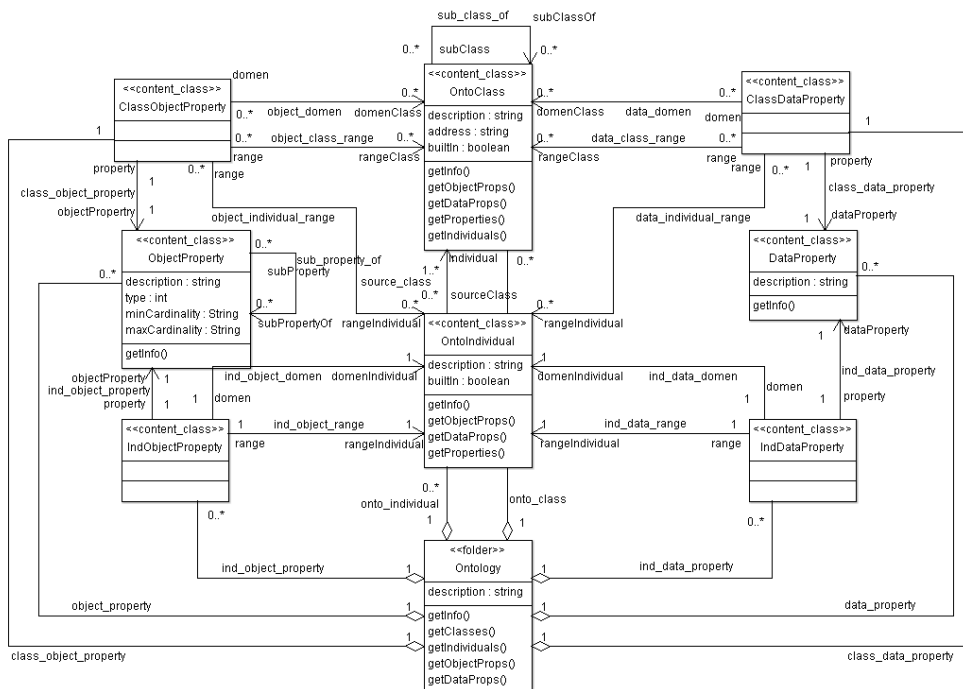


Рисунок 2. Диаграмма классов набора компонентов

Связи классов различных уровней моделирования с использованием разработанного отображения и классов для компонента, отображающего элемент, представляющий *clabject*, представлены на рис. 3. Для упрощения изображения классы, представляющие связи, изображены линиями. В архитектуре ОСА каждому атрибуту и связи приписывалось значение числового атрибута *potency*. При этом максимальное значение *potency* имели атрибуты и связи самого верхнего уровня моделирования.

## 5. Алгоритм многоуровневого моделирования

При создании модели в разработанном нами редакторе производится последовательное создание экземпляров компонентов. В соответствии с предложенным подходом отношение онтологической классификации *power type* реализуется атрибутом *hasKindOf* класса *OntoClass*. Экземпляр класса *OntoClass* является контейнером для набора экземпляров типа *ClassObjectProperty*, каждый из которых хранит информацию о связываемых элементах модели. В связи с тем, что во многих случаях число уровней моделирования не известно, начальное значение *potency* не определено. Для преодоления этого недостатка мы ввели иерархию классификации между связями, определяемую атрибутом *SubPropertyOf*.

Рассмотрим последовательность  $[C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{im}]$  классов, наследующих друг друга и расположенных различных уровнях моделирования, т. е.  $C_{ik}.SubClassOf \rightarrow C_{i(k-1)}$ .

Для оптимизации программы мы ввели дополнительный атрибут *hasMetaClass*, определяющий наследование между классами, находящимися в разных онтологических модулях, т. е. атрибуты *SubClassOf* и *hasMetaClass* семантически эквивалентны, но не могут быть использованы одновременно. Классу  $C_{ik}$  сопоставлено множество  $\{R_{ij}\}_k$  связей, представленных элементами типа *ClassObjectProperty* и *ClassDataProperty*. При этом при наследовании классов устанавливается отношение  $R_{ijk}.SubPropertyOf \rightarrow R_{ij(k-1)}$ , а каждая связь определяет ограничения для области определения своих значений, ограничение может быть рассчитано как  $R_{ijk}(R_{ij(k-1)}(..R_{ij1}(R_{ij1}.range)))$ .

Ограничения связи может быть указано в атрибутах связи *R* или определено в классе или индивидуале класса классификатора, определяемого отношением *hasKindOf*.

При выборе элемента модели, определяющего связь, в памяти системы ищется объект типа *ClassObjectProperty* и строится иерархия объектов, связанных отношением *SubPropertyOf*. Характер связей определяется соответствующей моделью ограничений связей *M\_Constrain*, включающей в себя классы ограничений *C\_Constrain*. Класс ограничений *C\_Constrain* определяется для каждой связи узла *f*. Связь *f* и класс ограничений связаны отношением *SubPropertyOf*. Модель ограниче-



ний строится как объединение классов ограничений текущей связи и всех классов ограничений связей, входящих в иерархию связей, также определяемую отношением *SubPropertyOf*. Ограничения нижнего уровня перекрывают ограничения верхнего уровня. Правила согласования ограничений в настоящее время определены в коде редактора. Предполагается в дальнейшем правила интерпретации ограничений представить в виде соответствующей модели и редактировать их подобно другим моделям.

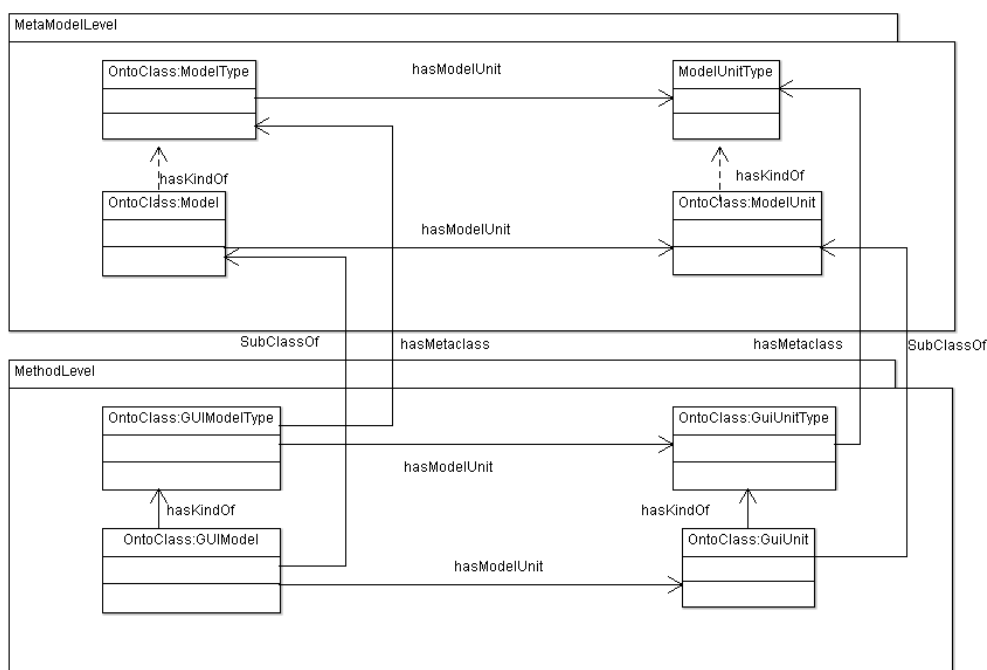


Рисунок 3. Связь классов различных уровней моделирования

Задание типа связи для верхнего уровня иерархии связей определяет поведение всех элементов иерархии. Так, в онтологии системы управления знаниями  $O_{KW}$ , включающей понятия **Метатип**, **Тип**, **Класс**, **Подкласс**, **Экземпляр** определим тип связи **Порождает**, модель ограничения которой определяет способ создания класса понятия на основе некоторого класса, определяющего метаинформацию понятия. Определим набор классов связей, расширяющих ее: *метатип порождает тип*, *класс порождает подкласс*, *класс порождает экземпляр*. Ограничения, накладываемые на связи, определяют правила создания, расширения и интерпретации класса на основе описания класса метаинформации. Окно разработанного нами редак-



тора концептуальных моделей в режиме редактирования класса *GUI Model*, наследующего класс *GUI Model*, представлено на рис. 4.

Связи объекта		
редактор модели	• Tool	NavTool ▾
использует язык описания	• Language	Gui DSL ▾
отображена в документе	• Document	документ суз ▾
использует примитив моделирования	• примитив моделирования	GUI примитив моделирования ▾
имеет язык моделирования	• Язык разметки TAL	Not found ▾
включает подмодель	• Модель	GuiModel ▾
включает примитив	• GUI примитив моделирования	AbstractInterfaceElement ▾

Рисунок 4. Окно редактора многоуровневой модели

При построении модели соответствующий редактор анализирует класс *Model* и создает копии всех принадлежащих ему элементов типа *ClassObjectProperty* и *ClassDataProperty*. Атрибуты *title* прототипа копируются в соответствующий атрибут *title* создаваемого элемента. В атрибут *SubPropertyOf* нового элемента записывается ссылка на прототип, добавляя новый элемент в иерархию связей. Тип элементов для области значений атрибута *range* получается из соответствующего атрибута прототипа, затем строится список наследующих его классов. Пользователю предоставляется возможность определить ограничение на тип связываемого элемента, выбрав его из списка.

## 6. Заключение

Предложенный способ представления позволяет на разных уровнях моделирования проводить фильтрацию типов элементов, которые могут быть использованы при разработке модели выбранного типа. Созданная нами система многоуровневого семантического моделирования использует разработанные компоненты.

Для выбранного типа модели в редакторе модели на основе информации о связях определяются типы примитивов моделирования и другие компоненты моделирования, например язык описания модели и тип редактора для управления моделью. При построении модели редактор анализирует класс *Model* и создает копии всех принадлежащих ему элементов типа *ClassObjectProperty* и *ClassDataProperty*. Атрибуты *title* прототипа копируются в соответствующий атрибут *title* создаваемого элемента. В атрибут *SubPropertyOf* нового элемента записывается ссылка на прототип, добавляя новый элемент в иерархию связей. Тип элементов для области значений атрибута *range* получается из соответствующего атрибута прототипа, затем строится список наследующих его классов. Пользователю предоставляется возможность определить ограничение на тип связываемого элемента, выбрав его из списка.

## Литература

- [1] *Henderson-Sellers B., Gonzalez-Perez C.* The rationale of powertype-based metamodelling to underpin software development methodologies // Proc. 2nd Asia-Pacific conference on Conceptual modeling. Vol. 43. — Australian Computer Society, Inc., 2005. P. 7–16.
- [2] *Atkinson C., Kühne T.* The essence of multilevel metamodeling // «UML»2001: Modeling Languages, Concepts and Tools / Eds. Gogolla M., Kobryn C. Vol. 2185. — Springer-Verlag, Berlin, 2001. P. 19–33.
- [3] *Atkinson C., Gerbig R., Tunjic C.* Towards multi-level aware model transformations // 5th International Conference on Theory and Practice of Model Transformations. — Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 208–223.
- [4] *Скворцов Н. А.* Вопросы согласования неоднородных онтологических моделей и онтологических контекстов // *Онтологическое моделирование: сб. тр.* — М. : ИПИ РАН, 2008 С. 149–166.
- [5] *Beck H., Pinto H. S.* Overview of approach, methodologies, standards, and tools for ontologies // The Agricultural Ontology Service. — UN FAO, Rome, 2002.
- [6] *Голенков В. В., Гулякина Н. А.* Принципы построения массовой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (OSTIS-2011). — Минск, 2011. С. 21–58.
- [7] *Греггер С. Э., Сквородин Е. Ю.* Построение онтологического портала с использованием объектной базы // Объектные системы – 2010: Материалы I Международной научно-практической конференции. — Ростов н/Д, 2010. С. 74–78.
- [8] *Загорюлько Ю. А.* Подход к построению интеллектуальных информационных систем на основе семантических сетей // Международная научно-техническая конференция «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (Open

Semantic Technologies for Intelligent Systems) — OSTIS-2011. — Минск : Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2011.

- [9] *Jean S., Ait-Ameur Y., Pierra G.* An object-oriented based algebra for ontologies and their instances // East European Conference on Advances in Databases and Information Systems. – Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 141–156. (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.82.68>).

**Авторы:**

*Сергей Эдуардович Грегер* — старший преподаватель кафедры информационных технологий; Нижнетагильский технологический институт (фил.), Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Нижний Тагил

*Сергей Владимирович Поршнев* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники информационных систем; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

## Method for Transformation of Multi-Level Semantic Models to Object-Oriented System

S. E. Greger\*, S. V. Porshnev\*\*

\* Nizhny Tagil Technological Institute

ul. Krasnogvardejskaja, 59, Nizhny Tagil, Russia, 622013

Ural Federal University,

Екатеринбург. Lenina ave., 51, Ekaterinburg, 620000

e-mail: segreger@gmail.com s.v.porshnev@urfu.ru

*Abstract.* The article discusses the development of semantics and program implementation of the component to represent elements of the multi-level semantic models in an object-oriented system. The application of the concepts of power type, clabject and multilevel method of object-oriented display with multi-level semantic modeling.

*Keywords:* multi-level semantic model, object-oriented mapping, object-oriented systems.

### References

- [1] *Henderson-Sellers B., Gonzalez-Perez C.* (2005) The rationale of powertype-based metamodelling to underpin software development methodologies. In Proc. 2nd Asia-Pacific conference on Conceptual modelling, vol. 43, pp. 7–16
- [2] *Atkinson C., Kühne T.* (2001) The essence of multilevel metamodeling. In International Conference on the Unified Modeling Language, pp. 19–33
- [3] *Atkinson C., Gerbig R., Tunjic C.* (2012) Towards multi-level aware model transformations. In International Conference on Theory and Practice of Model Transformations, pp. 208–223
- [4] *Skvorcov N. A.* (2008) Voprosy soglasovanija neodnorodnyh ontologicheskikh modelej i ontologicheskikh kontekstov. In book Ontologicheskoe modelirovanie. Moscow, pp. 149–166 [In Rus]
- [5] *Beck H., Pinto H. S.* (2002) Overview of approach, methodologies, standards, and tools for ontologies. The Agricultural Ontology Service. UN FAO, Rome
- [6] *Golenkov V. V., Gulykina N. A.* (2011) Principy postroenija massovoj semanticheskoy tehnologii komponentnogo proektirovanija intellektual'nyh system. In Conf. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011). Minsk, pp. 21–58 [In Rus]
- [7] *Greger S. E., Skovorodin E. Y.* (2010) Postroenie ontologicheskogo portala s ispol'zovaniem obektnoj bazy. In Conf. Obektnye sistemy – 2010. Rostov-na-Donu, pp. 74–78. [In Rus]
- [8] *Zagorulko Y. A.* (2011) Podhod k postroeniju intellektual'nyh informacionnyh sistem na osnove semanticheskikh setej. In Conf. OSTIS-2011. Minsk [In Rus]
- [9] *Jean S., Ait-Ameur Y., Pierra G.* (2007) An object-oriented based algebra for ontologies and their instances. In /East European Conference on Advances in Databases and Information Systems, pp. 141–156

## Методы и средства профилирования и управления распределенными системами

Р. Г. Сухарев\*, О. И. Лукьянчиков\*, Е. В. Плужник\*\*

\*Московский технологический университет (МИРЭА)  
119454, Москва, Проспект Вернадского, 78

\*\*Московский технологический институт  
119334, Москва, Ленинский проспект, 38а

e-mail: luk-it6@yandex.ru

*Аннотация.* Современные информационные системы имеют сложную архитектуру, приложения и данные распределены между различными вычислительными узлами, одновременно выполняется множество сетевых операций, поэтому актуальна разработка методов и инструментальных средств для профилирования распределенных систем. В статье проанализированы и унифицированы методы профилирования распределенных систем, которые ориентированы на имитационное моделирование для проведения экспериментов и построение графовой модели системы. Для имитационного моделирования используется теория сетей массового обслуживания. Для автоматизации приведенного метода профилирования распределенных систем разработано приложение типа SCADA-системы, имеющее модульную структуру.

*Ключевые слова:* распределенные системы, управление ресурсами, профилирование информационных систем, автоматизация управления.

### 1. Введение

Каждый разработанный программный модуль может включаться в состав разных программ, если выполнены условия его использования, декларированные в документации по этому модулю. Таким образом, программный модуль может рассматриваться и как средство борьбы со сложностью программ, и как средство борьбы с дублированием в программировании. Они сокращают время разработки программ, облегчают внедрение и обеспечивают гибкость. Но модульное программирование так и не смогло полностью реализовать все свои концепции в полной мере [1]. Поэтому с развитием сетей и распределенных систем модули стали отдельными сетевыми приложениями, которые образовали сервис-ориентированные системы Software-as-a-Service (SaaS) и более сложные облачные системы. Сервисы предоставляют приложениям или другим сервисам свои услуги, решая ряд интеграционных проблем. Однако выросла сложность анализа таких систем, так как операции выполняются на различных вычислительных узлах и на каждую службу

подается различная нагрузка. Поэтому сегодня является актуальной разработка методов и инструментальных средств для профилирования и управления распределенными системами.

Все существующие сегодня системы для анализа распределенных систем строятся на основе анализа журналов работы (логов) всех служб, например ELK [2, 3] (Elasticsearch — для перенаправления потоков логов; Logstash — для поиска в логах; Kibana — для отображения пользователю результатов) или Dapper [4] от Google. Данные средства позволяют по предусмотренным разработчиками логам найти ошибки или «узкие» места, но не позволяют эффективно предпринять меры по их исправлению, т. е. выполнить управляющие воздействия на систему. Поэтому для профилирования и управления распределенными системами предпочтительным являются системы типа SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Термин «SCADA-система» используется, когда речь идет об автоматизированных системах, т. е. системах контроля и управления, осуществляемого с участием человека, — диспетчера (оператора). В информационных системах производится огромное множество операций, за которыми оператор не в состоянии уследить, поэтому предпочтительным при профилировании и управлении показывать только ошибочные и трудозатратные, выходящие за норму, операции, что позволит найти узкие места в системе и переконфигурировать ее при необходимости.

## 2. Методы профилирования распределенных систем

Общепринятого метода и инструмента для профилирования распределенных систем сегодня нет, однако существует ряд предложенных методов в работах [5, 6]. Оба этих метода анализа и профилирования распределенных систем ориентированы на имитационное моделирование для проведения экспериментов и построение графовой модели системы. Проведя объединение и унификацию данных методов, можно выделить основные этапы профилирования распределенных систем:

- формирование графовой модели представления процесса решения функциональных задач как взаимосвязанной совокупности процессов обработки запросов;
- построение и настройка имитационной модели процесса обработки запросов на конкретный вариант компьютерной сети и размещения распределенного информационного хранилища;
- проведение эксперимента на имитационной модели для оценки времени выполнения запросов;
- определение узких мест в системе, кардинально влияющих на производительность распределенной системы.

В этих методах результаты профилирования зависят от имитационной модели, которая определяет нагрузку на систему с некой интенсивностью потока запросов. При профилировании распределенной системы с использованием расчетов показателей эффективности системы мониторинга необходимо учитывать:

- множественность накопителей в системах массового обслуживания (СМО). Данный фактор приводит к рассмотрению СМО как системы с совокупной очередью заявок, исключающей получение характеристик отдельных очередей;
- недетерминированное в общем случае время обслуживания единичной заявки; время, потраченное на обслуживание заявки зависит от общего объема пакета, в результате чего имеется взаимная зависимость среднего времени обслуживания заявки и количества заявок, ожидающих обслуживания;
- корреляционные связи между временами поступления заявок, поступающих от различных элементарных источников, приводящие к отсутствию стационарности потока.

При наличии рассчитанных показателей эффективности отдельных СМО можно провести расчет показателей эффективности стохастической сети массового обслуживания (СеМО), определяемой совокупностью характеристик [6]:

- 1) множеством СМО  $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ , образующих сеть;
- 2) числом каналов  $K_1, K_2, \dots, K_n$  в системах  $S_1, S_2, \dots, S_n$  соответственно;
- 3) матрицей траекторий движения заявок  $R = \|r_{ij}\|$ , где  $r_{ij}$  — номер СМО, на которую переходит заявка, продвигающаяся по  $i$ -му пути на  $j$ -й фазе обслуживания при детерминированной процедуре маршрутизации, или матрицей вероятностей перехода заявок из одной СМО в другую  $P = \|p_{ij}\|$ , где  $p_{ij}$  — вероятность того, что заявка, покидающая  $S_i$ , поступает в  $S_j$ ;
- 4) числом заявок, циркулирующих в замкнутой сети ( $Z$ );
- 5) интенсивностью источников заявок в разомкнутой сети  $\Lambda = \{\lambda_i(k)\}$ , где  $i$  — тип заявки;  $k$  — категория срочности;
- 6) законами распределения времени  $F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)$  и дисциплинами обслуживания заявок в системах  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Системы  $S_1, S_2, \dots, S_n$  и связи между ними определяют структуру сети. Интенсивность источников заявок  $\lambda_{ij}(k)$ , интенсивность обслуживания  $\mu_{ij}(k)$ , длины очередей и режим работы приборов характеризуют нагрузку и производительность СеМО.

Моделирование распределенной информационной системы на основе СеМО описано в работах [7, 8].

После построения имитационной модели для профилирования распределенной системы необходимо провести ряд экспериментов при различных архитектурах систем, в которых изменяется количество вычисляемых узлов, их расположение, потоки данных и прочие параметры. Автоматизировать построение данных систем и непосредственное проведение и сбор данных по результатам эксперимента позволят программные средства типа SCADA.

### **3. Инструментальные средства профилирования и управления распределенными системами**

Инструментальные средства, автоматизирующие профилирование распределенных систем, реализованы в системе hmiSCADA (<https://github.com/RSukharev/hmiSCADA>), написанной на языке C++ с использованием библиотеки Qt. В данном приложении использован принцип модульного построения. Система состоит из основного модуля, обеспечивающего полный набор базовых функций обработки и визуализации информации, а также дополнительных функциональных модулей-опций, реализующих функции сбора данных и необязательные в применении функции контроля и управления. Дополнительные модули сбора данных и управления включаются в исходный код профилируемой системы.

Функционал основного модуля включает:

- получение данных от внешних модулей;
- визуализацию данных;
- обеспечение возможности управления процессом профилирования;
- имитационное моделирование.

Функционал дополнительных модулей включает:

- сбор данных о времени начала и времени завершения тестируемого участка кода;
- отправку данных о профилировании по сети на основной модуль системы;
- выполнение команд, полученных от модуля визуализации и управления.

Принципиальное отличие данной системы от других систем типа SCADA заключается в том, что для визуализации полученных данных оператору не требуется заранее строить мнемосхему того, что должно быть отображено. Мнемосхема формируется автоматически на основании полученных данных. Однако благодаря модульному принципу построения системы существует возможность в дальнейшем



привести графический интерфейс пользователя к общепринятому стандарту. Также можно обеспечить совместимость со стандартами передачи данных в системах SCADA (OPC UA). Расширение функционала системы происходит по мере написания и подключения новых модулей.

Модули подключаются динамически и имеют интерфейсы:

- 1) request, предназначенный для отправки данных;
- 2) processData, предназначенный для выполнения команд и обработки полученных данных.

Работа системы построена на обмене сообщениями между модулями. Обмен сообщениями осуществляется при помощи структуры данных, состоящей из полей: senderID (идентификатор плагина-отправителя), receiverID (идентификатор плагина-получателя), command (команда для выполнения на стороне плагина-получателя) и value (пересылаемые данные).

Архитектура системы позволяет построить схему, при которой сообщения могут проходить через цепочку модулей, каждый из которых выполняет свою работу по обработке данных и пересылает результат дальше, изменяя и расширяя функционал системы в целом.

Компоненты системы отображены на рис. 1:

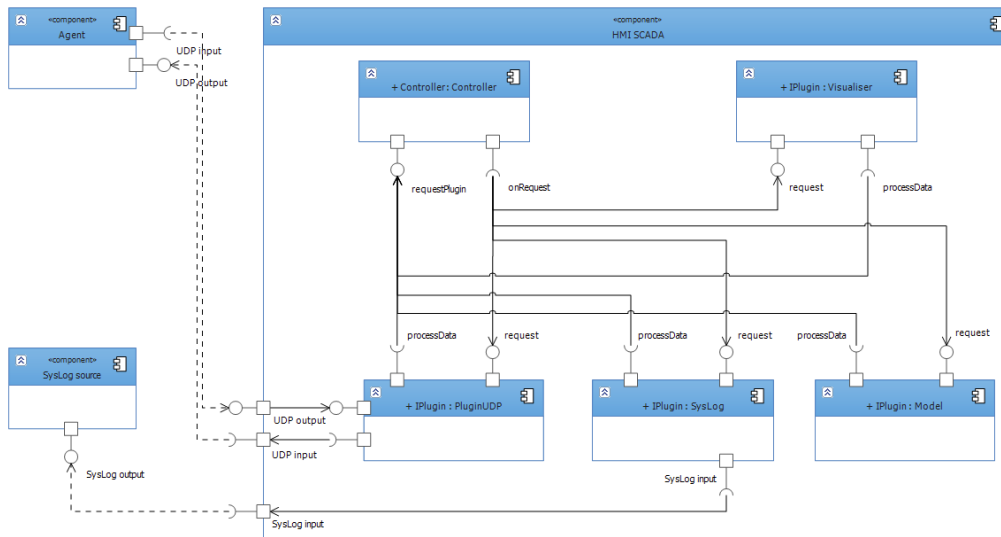


Рисунок 1. Диаграмма компонентов системы hmiSCADA

Основной компонент на диаграмме (HMI SCADA) состоит из элементов:

- Controller (является диспетчером сообщений и обеспечивает обмен данными между модулями системы);

- Visualiser (модуль визуализации, обеспечивает отображение полученных данных в виде мнемосхемы и предоставляет графический интерфейс пользователя для управления процессом профилирования);
  - PluginUDP (сетевой модуль, обеспечивает прием сообщений по сетевому протоколу UDP от модуля AgentUDP и перенаправление компонента Controller, а также отправку по сети управляющих команд от Controller-а модулю AgentUDP);
  - Syslog (модуль анализа логов, используется для получения данных о профилировании на основании анализа логов системы);
  - Model (модуль, предназначенный для имитационного моделирования).
- Дополнительные модули системы представлены на диаграмме компонентами:
- Agent (модуль сбора данных и управления профилируемой системой);
  - SysLog source (любой источник данных, совместимых с форматом SysLog).

Сбор информации обеспечен включением в исходный код профилируемой системы класса **Profiler** и осуществляется посредством макросов:

```
#define PROFILE_BEGIN(nodeinfo, moduleinfo)
    Profiler_profiler_(nodeinfo, moduleinfo, __FILE__);

#define PROFILE_START(...)
    _profiler_.start( __FILE__, __LINE__, ##__VA_ARGS__);

#define PROFILE_STOP()
    _profiler_.stop(profileBlock, __FILE__, __LINE__);
```

```
#define ON_EXIT(...) _profiler_.onExit();
```

Макросы вызывают функции класса Profiler со следующими параметрами: название файла с исходным кодом и номер строки профилируемого блока.

Пример использования:

```
#include "Profiler/profiler.h"
std::string appID = qPrintable(QString("mini") +
    QString::number(getTimeNS()));

#define PROFILE_ENABLE
#define PROFILE_BEGINNER PROFILE_BEGIN(appID, " ");
    PROFILE_START(Q_FUNC_INFO);
#define PROFILE_ENDER PROFILE_STOP();
void mini::on_pbSend_released() {
    PROFILE_BEGINNER;    // начало профилирования
```

```
    sendMessage();  
    PROFILE_ENDER;          // окончание профилирования  
}
```

Между макросами PROFILE\_BEGINNER и PROFILE\_ENDER может располагаться произвольное количество строк кода, главным требованием является лишь общий контекст исполнения (внутри одной функции или внутри одного блока). Модуль Agent является сетевым и одновременно управляющим модулем профилировщика.

AgentUDP отправляет по сети сообщение на адрес и порт основного модуля системы. Получателем в сообщении указан модуль Visualiser. PluginUDP отдает принятые по сети данные классу Controller, добавляя к ним свой идентификатор в виде параметра pluginID (идентификатор плагина-ретранслятора). Controller перенаправляет данные модулю, указанному в сообщении как получатель, т. е. Visualiser. В сообщении отправителем указан идентификатор модуля AgentUDP, поэтому при возникновении необходимости отправки ответа или управляющей команды модуль Visualiser сформирует сообщение с данным идентификатором в качестве получателя. Сообщение от Visualiser-а поступит диспетчеру сообщений Controller и затем перенаправится на модуль-ретранслятор (PluginUDP), который перешлет его по сети модулю AgentUDP с соответствующим идентификатором.

Результаты профилирования простого чата, отправляющего сообщения по UDP, показаны на рис. 2.

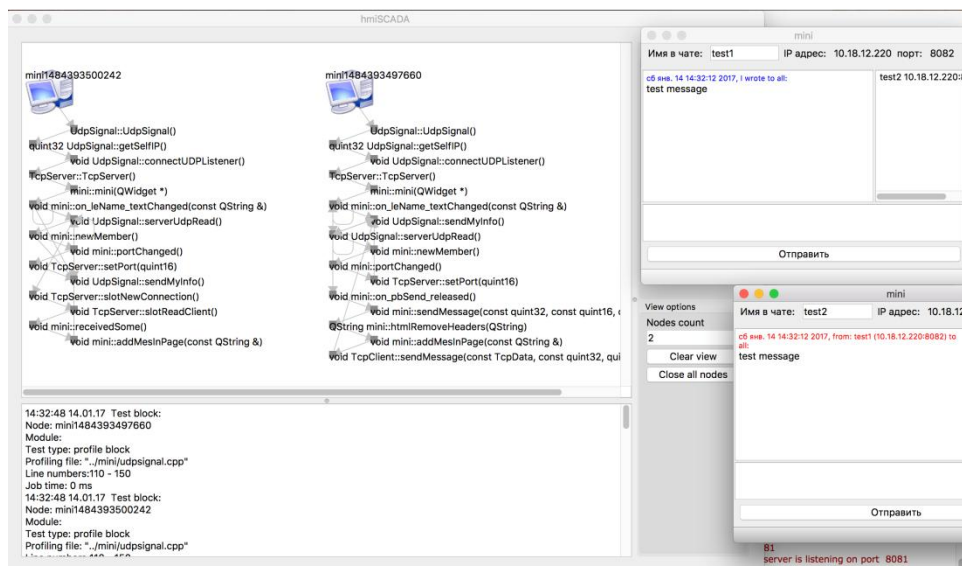


Рисунок 2. Визуализация результатов профилирования двух экземпляров приложения чата

Экземпляры профилируемых приложений на рис. 2, отмечены иконкой с изображением рабочей станции. Функциональные блоки отмечены серыми квадратами с названием профилируемой функции. Последовательность переходов между функциональными блоками отмечена стрелками. При наведении курсора на функциональный блок появляется всплывающее окно с информацией о времени выполнения. Активные функции и переходы между ними выделяются зеленым цветом. Меню управления экземпляром профилируемого приложения вызывается нажатием правой клавишей мыши на иконке. По умолчанию предусмотрены пункты вывода информации о приложении и завершение приложения.

#### 4. Заключение

Рассмотрены методы и инструментальные средства типа SCADA для профилирования и управления распределенными системами. Данные системы позволят автоматизировать процесс профилирования систем, что упростит поиск узких мест и ошибок в системе [9]. Важным фактором в развитии и популяризации таких систем типа SCADA является возможность интегрирования их в уже эксплуатирующиеся распределенные системы, поэтому в прототипе hmiSCADA предлагается модульная архитектура. Благодаря данной архитектуре сторонние разработчики получают возможность разрабатывать свои модули hmiSCADA. Потраченные трудозатраты на разработку данных модулей должны с легкостью окупиться сэкономленным временем на профилирование и анализ системы.

#### Литература

- [1] *Бреслер И. Б., Семенов С. А., Корниенко В. В., Борисов В. В.* Перспективный подход к организации программных комплексов // *Радиопромышленность*. 2009. Вып. 1. С. 72–88.
- [2] *Reelsen A.* Using elasticsearch, logstash and kibana to create realtime dashboards [Электронный ресурс] URL: [https://secure.trifork.com/dl/goto-berlin-2014/GOTO\\_Night/logstash-kibana-intro.pdf](https://secure.trifork.com/dl/goto-berlin-2014/GOTO_Night/logstash-kibana-intro.pdf).
- [3] *Bagnasco S. et al.* Monitoring of IaaS and scientific applications on the Cloud using the Elasticsearch ecosystem // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 608. No. 1. P. 012016.
- [4] *Sigelman B. H. et al.* Dapper, a large-scale distributed systems tracing infrastructure. – 2010.
- [5] *Лукьянчиков О. И., Филатов В. В.* Профилирование распределенных систем // *Инженерный вестник*. 2016. № 2. URL: <http://engsi.ru/doc/834731.html>
- [6] *Иванов А. Ю., Горшков В. С.* Методика оценки эффективности распределенных информационных хранилищ // *Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-*

*Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. 2010. Т. 6. № 2. С. 38–44 (<http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V22/7.pdf>)*

- [7] Башарин Г. П., Толмачев А. Л. Теория сетей массового обслуживания и ее приложения к анализу информационно-вычислительных систем // *Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика»*. 1983. Т. 21. № 1. С. 3–119.
- [8] Макаров Д. В., Бурковский В. Л. Моделирование распределенной информационной системы на основе сети массового обслуживания // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2016. Т. 12. № 1.
- [9] Nikulchev E., Pluzhnik E., Lukyanchikov O., Biryukov D., Andrianova E. QoS-based computing resources partitioning between virtual machines in the cloud architecture // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016. Vol. 7. No. 11. P. 165–170.

**Авторы:**

Роман Геннадьевич Сухарев — студент, Московский технологический университет (МИРЭА)

Олег Игоревич Лукьянчиков — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры управления и моделирования систем, Московский технологический университет (МИРЭА)

Евгений Владимирович Плужник — первый проректор, Московский технологический институт

## Profiling and Control of Distributed Systems

R. Sukharev\*, O. Lukyanchikov\*, E. Pluzhnik\*\*

\*Moscow Technological University MIREA  
Vernadsky Avenue, 86, Moscow, Russia 119571

\*\*Moscow Technological Institute  
Leninskiy pr., 38A, Moscow, Russia 119334

e-mail: luk-it6@yandex.ru

*Аннотация.* The article analyzes and standardizes methods for profiling distributed systems that focus on simulation to conduct experiments and build a graph model of the system. The theory of queueing networks is used for simulation modeling of distributed systems, receiving and processing user requests. To automate the above method of profiling distributed systems the software application was developed with a modular structure and similar to a SCADA-system.

*Ключевые слова:* distributed systems, resource management, profiling systems, control systems.

### References

- [1] Bresler I. B. et al. (2009) *Radiopromyshlennost*, 1:72–88. [In Rus]
- [2] Reelsen A. (2014) *Using elasticsearch, logstash and kibana to create realtime dashboards* [https://secure.trifork.com/dl/goto-berlin-2014/GOTO\\_Night/logstash-kibana-intro.pdf](https://secure.trifork.com/dl/goto-berlin-2014/GOTO_Night/logstash-kibana-intro.pdf).
- [3] Bagnasco S. et al. (2015) *Journal of Physics: Conference Series*, **608**(1):012016.
- [4] Sigelman B. H. et al. (2010) *Dapper, a large-scale distributed systems tracing infrastructure*.
- [5] Lukyanchikov O. I., Filatov V. V. (2016) *Inzhenernyj vestnik*, 2, 83473 [In Rus]
- [6] Ivanov A. Y., Gorshkov V. S. (2010) *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Ros-sii*, **6**(2):38–44 [In Rus]
- [7] Basharin G. P., Tolmachev A. L. (1983) *Itogi nauki i tehniki. Seriya «Teoriya veroyatnostej. Matematicheskaja statistika. Teoreticheskaja kibernetika»*, **21**:3–119 [In Rus]
- [8] Makarov D. V., Burkovskiy V. L. (2016) *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. **12**(1) [In Rus]
- [9] Nikulchev E. et al. (2016) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, **7**(11):165-170.

## Технические средства человеко-компьютерного взаимодействия TUI. Обзор и анализ возможностей использования в игрофикации

*И. В. Осипов*

*i2i istudy, Inc.*

*Сан-Франциско, США USA*

*e-mail: ilyavosipov@gmail.com*

*Abstract.* Tangible user interface (TUI) на русский язык можно перевести как «материальный» или «ощутимый» интерфейс пользователя. В настоящей статье делается обзор современных технических средств, используемых при построении материальных пользовательских интерфейсов. Обзор нацелен на определение возможностей использования TUI как расширение человеко-компьютерного взаимодействия в технологиях геймификации.

*Keywords:* TUI, GUI, распределенные вычисления, игрофикация, серьезные игры.

### 1. Введение

Автор впервые осознал свое столкновение с материальным интерфейсом в мае 2016 г., когда во время путешествия в Национальный парк Лассен-Волканик в Калифорнии случайно увидел устройство *SandScape*, установленное в помещении для посетителей парка. Двое детей играли с песком, готовы были играть часами с песком, строя геодезические ландшафты под проектором, создавая руками каньоны с водой и пики с шапками снега. Стало понятно, что для геймификации, которой автор занимался много лет, это лучшее и органичное дополнение. По сути, материальный интерфейс и есть геймификационный интерфейс. Изучение этого вопроса положило начало собственной разработке материального интерфейса.

Tangible user interface (TUI) на русский язык можно перевести как «материальный» или «ощутимый» интерфейс пользователя. Далее автор будет использовать слово «материальный», понимая под этим «то, что можно пощупать или ощутить».

Эволюция интерфейсов пользователя началась от Command-line interfaces (интерфейс командной строки), появившегося в 60 – 70-тых годах прошлого столетия. Далее был разработан Graphic user interface (GUI) — графический интерфейс пользователя, первые образцы которого представила компания Xerox Palo Alto Research Center в 1970 г. Он повсеместно используется на персональных компьютерах и мобильных устройствах. Последующее развитие пользовательские интерфейсы получили в виде серии направлений, известных под именами: Tangible user interface, Kinetic user interface, Natural user interface, Touch user interface, Organic user

interface, Natural language user interface и даже Brain-computer interface. Интерфейсы стали развиваться в сторону интуитивно понятного взаимодействия между человеком и компьютером, где их юзабилити отличалось «прозрачностью» и доступностью для понимания обычному человеку.

«Простое соответствие, то есть использование естественных аналогий и культурных стандартов ведет к мгновенному пониманию», — утверждает гуру юзабилити Дональд Норман. Материальный интерфейс пользователя TUI — это разновидность пользовательского интерфейса, в котором взаимодействие человека с электронными устройствами происходит при помощи материальных предметов и конструкций. Одновременно TUI включает в себя такое направление, как Touch user interface, Kinetic user interface, Gesture recognition (интерфейс взаимодействия с помощью жестов). Однако TUI (материальный интерфейс пользователя) не противопоставляется широко используемому GUI (графическому интерфейсу пользователя), а дополняет его. И GUI постепенно обогащается за счет использования технологий, созданных в рамках TUI.

«GUI не способен охватить все богатство человеческих чувств и умений, которые люди выработали при взаимодействии с материальным миром» — писал в 1997 г. профессор Хироси Исии (имя на японском: 石井 裕) из медиалаборатории Массачусетского технологического института (MIT). Он считает, что опосредованные манипуляции только с виртуальными объектами, из которых состоит графический интерфейс — это тупиковый путь. Будущее за естественным взаимодействием с материальными предметами, надо лишь найти способ вернуться к нему. “We began our investigation of “looking to the future of HCI” at this museum by looking for what we have lost with the advent of personal computers. Our intention was to rejoin the richness of the physical world in HCI” [1]. Компьютерные интерфейсы, основанные на таком принципе, Исии и назвал Tangible user interface. Именно он считается автором этого термина. Материальный интерфейс характеризуется физическими представлениями, связанными с цифровой информацией, включая механизм управления и обратной связи между физическими объектами и цифровой информацией. Элементы материального интерфейса — это не кнопки и окна, нарисованные на экране, а материальные предметы или сенсоры, воспринимающие управление со стороны пользователя.

## **2. Технологии мотивации посредством геймификации с использованием TUI-интерфейса**

Игра представляет собой глобальное явление, которое существует во всех исторических и современных культурах. Кант называл игру «целесообразностью без цели». (Eisler — Kant (1787) Zweckmäßigkeit ohne Zweck).



Игрофикация (геймификация) — это использование игровых практик в неигровом контексте. Игрофикация обычно используется для мотивации или демотивации пользователя к тому или иному типу поведения [2, 3]. Это понятие также тесно связано с “Serious game” (серьезная игра или игра, предназначенная для иной первичной цели, кроме чистого развлечения). Серьезная игра — это словосочетание, которое обычно применяется для обозначения игр, используемых в таких отраслях, как образование, оборона, научные исследования, здравоохранение, управление чрезвычайными ситуациями, городское планирование, техника и политика. Например, серьезные игры используются при обучении пилотов (имитация полета), при обучении студентов-врачей (медицинское моделирование), т. е. имеют педагогическую ценность [4, 5].

Связь материальных интерфейсов и успешности геймификации просто драматическая. Хорошо подобранный материальный интерфейс способен полностью преобразовать серьезные игры или геймификационные техники, подняв его до недостижимых традиционными методами высот, мотивировать пользователя с удовольствием отдавать часы своего времени, повторяя и повторяя игровой опыт. Одновременно с этим достигаются поставленные образовательные цели, а создателям подобных TUI устройств обеспечивается коммерческий успех, конкурентное преимущество и массовое использование их решения.

Практически все современные системы с так называемой смешанной реальностью (mixed reality (MR) / hybrid reality) используют в той или иной степени элементы TUI интерфейса.

Интуитивно понятны без обучения для человека лишь простые инструменты и предметы. Чтобы догадаться, как обращаться с молотком, ножом или палкой, не требуется подробная инструкция. Представления о том, как взаимодействуют разные предметы в реальном мире, уже «зашиты» у людей в подкорке. Но при работе с компьютером такие знания не помогут. За стеклом монитора начинается совсем другой мир, живущий по своим законам и почти не связанный с реальностью. Воздействовать на него можно только с помощью специальных устройств. Именно в этой изолированности и заключается один из главных недостатков графического интерфейса [6].

В 1997 г. профессор Массачусетского технологического института Хироси Исии изготовил интерактивный стол metaDESK. Этот стол так поразил воображение создателей фантастического фильма “Minority Report” («Особое мнение»), что эта разработка использовалась в этом фильме в качестве футуристического компьютера. Также под влиянием этих идей был создан Microsoft Surface [7].

Преимущества материальных интерфейсов первыми осознали производители видеоигр и электронных развлекательных автоматов. Специализированные устрой-

ства в стиле материальных интерфейсов использовались в игровых автоматах еще с 80-тых годов прошлого века. Игрушечные ружья, рули, педали, джойстики были первыми шагами к взаимодействию с компьютерными играми.

Кроме того, производители видеоигр начали встраивать датчики и сенсоры в свою продукцию. Например, устройство Voktai для игровой приставки Game Boy Advance было снабжено фотосенсором, улавливающим ультрафиолет. Чтобы зарядить игровое оружие для стрельбы по вампирам, требовался настоящий солнечный свет. Компания Nintendo выпустила WarioWare Twisted с пьезоэлектрическим гироскопом. В этой игре нельзя обойтись лишь кнопками — приставку нужно трясти, крутить и покачивать. В играх для Nintendo DS стали нормой нестандартные способы управления, имитирующие естественное взаимодействие с материальными предметами. Например, чтобы раскрутить ветряки в Zelda для DS, на экран необходимо подуть [6].

Постепенно элементы TUI стали появляться на неспециализированных устройствах. Так, часть интерфейса iPhone также основана на принципе непосредственного взаимодействия с объектами. «Люди не понимают, что мы изобрели новый класс интерфейсов», — говорил в 2007 г. Стив Джобс, а затем пояснял: «Все дело в том, что в интерфейсе iPhone почти отсутствуют глаголы». Особенность, к которой пытался привлечь внимание глава Apple, действительно очень важна. Пользователь традиционного графического интерфейса сначала выбирает объект, а затем указывает в меню действие, которое над ним необходимо совершить — тот самый «глагол», о котором говорил Джобс. Пользователю материального интерфейса меню с «глаголами» ни к чему: он берет объект и сам, своими руками делает с ним то, что нужно. Так работают мультитач-жесты, воспринимаемые эппловским телефоном, так работает прокрутка в браузере и картах iPhone, так работают инерционные списки [8].

Приемы TUI также широко используются в робототехнике, особенно в тех видах роботов, которые созданы чтобы взаимодействовать с человеком [9].

### **3. Эволюция технологий человеко-компьютерного взаимодействия**

На протяжении уже почти 40 лет клавиатура и мышь остаются основным средством человеко-компьютерного взаимодействия и успешно дополняют графический интерфейс пользователя. Все это вместе получило название WIMP (окна, иконки, мыши, указатели) [10].

Однако в последние годы новые технологии стали обычными. Практически все проекты TUI содержат следующие инновации из списка: сенсорный экран, акселерометр, компьютерная мышь, компьютерное зрение, сенсоры различного типа. По

мере признания, упрощения и массового внедрения эти интерфейсные устройства и методы становятся обыденностью и используются в традиционных GUI интерфейсах.

**Сенсорные экраны.** Элогограф (Elograph) — сенсорная панель, которая хоть и не была похожа на современные прозрачные экраны, но стала первой вехой в истории развития всей технологии. Это одно из базовых устройств, лежащих в основе материального интерфейса. Ее изобретение принадлежит Сэмюел Хёрсту из университета штата Кентукки в 1971 г. Настоящий прозрачный сенсорный экран доктор Хёрст представил миру уже через три года. А еще через три года, в 1977, его компания Elographics запатентовала резистивный экран, до сих пор являющийся одним из самых популярных экранов. В феврале 1994 г. фирма Elographics сменила название на Elo Touch [11].

Экран с поддержкой мультитача появился в 1984 г. Это была емкостная прозрачная панель, наложенная поверх ЭЛТ-монитора. В ее создании принимал участие Боб Бойе (Bob Voie) из Bell Lab [12].

В 1993 г. Apple представил MessagePad H1000 на платформе Newton. Это была одна из первых попыток производства массового карманного компьютера с поддержкой рукописного ввода и сенсорным дисплеем.

В 2007 г. Apple выпустил iPhone, после которого сенсорный мультитач дисплей и акселерометр стали стандартом де-факто для всех карманных устройств.

**Акселерометр.** Акселерометр представляет собой устройство, которое измеряет собственное ускорение. Акселерометр является наиболее простым способом определить положение в пространстве. В настоящее время им оснащаются практически все телефоны и переносные компьютеры.

#### *Компьютерная мышь*

Координатное устройство ввода для управления курсором и отдачи различных команд компьютеру. Современные браузеры и некоторые программы поддерживают жесты мышью. 9 декабря 1968 г. компьютерная мышь была представлена на показе интерактивных устройств в Калифорнии. Патент на этот гаджет получил Дуглас Энгельбарт в 1970 г. [13].



Рисунок 1. Magic Mouse

В 2009 г. фирмой Apple была представлена мышь Magic Mouse, являющаяся первой в мире мышью с сенсорным управлением и поддержкой технологии мультитач (рис. 1). Вместо кнопок, колесиков и прочих элементов управления в этой мыши используется сенсорный тачпад, позволяющий при помощи различных жестов осуществлять нажатия, прокрутку в любом направлении, масштабирование картинки, переходы по истории документов и проч. [14].

**Компьютерное зрение** — теория и технология, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов. В случае интерфейсов обычно используется для распознавания человеческих жестов и мимики. Как научная дисциплина компьютерное зрение относится к технологии создания искусственных систем, которые получают информацию из изображений. Видеоданные могут быть представлены множеством форм, таких как видеопоследовательность, изображения с различных камер или трехмерные данные, например с устройства Kinect или медицинского сканера. Современное компьютерное зрение широко использует методы искусственного интеллекта.

В конце 1960-х гг. в университетах начались разработки «компьютерного зрения», которые велись в рамках исследования искусственного интеллекта. Оно было предназначено для имитации зрительной системы человека как трамплин к наделению роботов интеллектуальным поведением [15].

В 1972 г. Майрон Крюгер создал лабораторию искусственной реальности Videoplace, которая окружала пользователей и реагировала на их движения. Эта работа стала основой его известной книги “Artificial Reality” [16].

Эта лаборатория не требовала очков или специальных перчаток, там использовались только проектор и камера. Люди без какой-либо подготовки, находящиеся в этой лаборатории, пользовались только естественными жестами (рис. 2).



Рисунок 2. Фрагменты интерфейса Videoplace, показанного в фильме “Myron Krueger — Videoplace, Responsive Environment, 1972 – 1990s” <https://youtu.be/dmmxVA5xhuo>

**Дистанционные сенсоры.** Одним из первых интерфейсов, основанных на дистанционных сенсорах, можно считать Терменвокс (Theremin или Thereminvox) — электромузыкальный инструмент, созданный в 1920 г. русским изобретателем

Львом Терменом. Звук на этом инструменте возникает не от касания, а только от движений рук исполнителя в пространстве перед специальными антеннами. Инструмент состоит из двух металлических антенн, которые воспринимают относительное положение рук пользователя для управления частотой с одной стороны и амплитудой (громкостью) — с другой. Электрические сигналы от Терменвокса усиливаются и отправляются в громкоговоритель. Прибор реагирует на малейшие изменения емкости колебательного контура, которая меняется от приближения руки. Соответственно меняется и частота звука. В ноябре 1920 г. на заседании кружка механиков физик Лев Термен дал свой первый концерт. Терменвокс стал успешен, так как наличие обратной связи с движением руки позволяло музыканту быстро осознать, как пользоваться устройством. По сути, терменвокс стал первым электрическим устройством, управляемым жестами [17].

Использование технологий дистанционных датчиков или *remote sensors* стало популярно при создании интерфейсов для захвата жестов и движений.

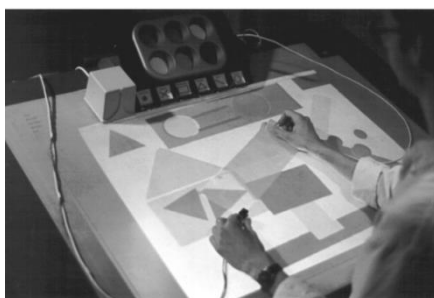
16 сентября 2005 г. на выставке Tokyo Game Show компания Nintendo впервые продемонстрировала контроллер Wii Remote. Главной особенностью Wii Remote является детектор движения, позволяющий игрокам жестами управлять персонажами игры и предметами на экране или «указывать» на объекты, отображаемые на экране. Это обеспечивается работой акселерометра и светочувствительной матрицы. Также в контроллер встроен динамик и вибромеханизм, что дает дополнительную обратную связь. Wii Remote обладает способностью восприниматься в трех измерениях с использованием ADXL330 акселерометра. Оптический датчик PixArt позволяет определить, куда указывает контроллер [18].

Также существуют уже десятки интерфейсов на основе дистанционных датчиков, акселерометров и компьютерного зрения. Например, известный Microsoft Kinect (ранее Project Natal) — бесконтактный сенсорный игровой контроллер, первоначально представленный для консоли Xbox 360 и персональных компьютеров под управлением ОС Windows. Разработан компанией Microsoft [19].

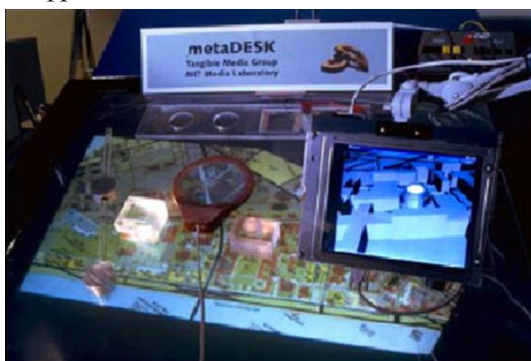
Прообразами TUI интерфейсов стали идеи Ubiquitous Computing от Mark Weiser из Xerox; разработки лаборатории PARC Xerox, где реализовано множество вычислительных устройств включая вкладки, колодки и доски, наряду с инфраструктурой, которая позволяет этим устройствам общаться друг с другом; DigitalDesk разработки P. Wellner, который продемонстрировал путь к объединению физических и цифровых документов с помощью видеопроекции дисплея компьютера на реальный стол с физическими документами, Мраморный автоответчик разработки Durrell Bishop и др. [20].

#### 4. Обзор проектов в области TUI, используемых в области серьезных игр и геймификации

**Bricks.** Это одна из базовых разработок идеолога TUI Хироши Исии. Проект позволяет манипулировать объектами на экране через физические объекты. Развитием этого проекта является более известный metaDESK, где пользователь может манипулировать географическими картами [21, 22].



**metaDESK.** Одна из самых известных платформ, следующая принципам TUI. Это платформа для изучения дизайна материальных пользовательских интерфейсов. metaDESK объединяет несколько 2D- и 3D-графических дисплеев с набором физических предметов и инструментов и воспринимает массив оптических, механических и электромагнитных датчиков поля. Задача metaDESK — связать физические инструменты с их цифровым воплощением.

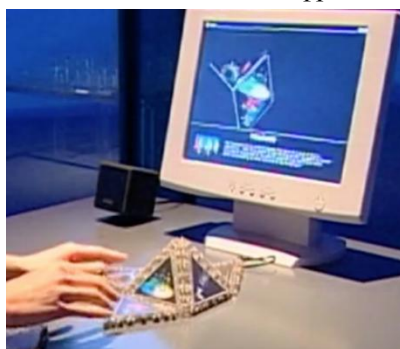


Горизонтальная поверхность metaDESK представляет собой большой проекционный дисплей, над которым на подвижном кронштейне перемещается дополнительный жидкокристаллический монитор. Конструкция использует оптические, механические и электромагнитные датчики, которые отслеживают положение в пространстве каждой части системы. metaDESK, наследуя идеи проекта Bricks, стал прообразом многих устройств, в том числе Microsoft Surface, и даже появлялся в фантастических фильмах [22, 23].

**Triangles.** Набор-конструктор, позволяющий строить из треугольников замысловатые фигуры и просматривать, что получилось на экране компьютера. Тре-



угольники представляют собой физический интерфейс компьютера в виде строительного набора из одинаковых плоских пластиковых треугольников. Треугольники соединяются вместе как физически, так и в цифровом виде через магнитные проводящие соединения. Когда части контактируют друг с другом, конкретные соединения могут вызвать определенные цифровые события, что дает простое, но мощное средство физического взаимодействия с цифровой информацией [24].



**ActiveCube.** Проект разработан Университетом Осака. Это кубики, которые могут быть собраны пользователем в любую структуру, наподобие конструктора Лего. Однако из-за наличия микропроцессора в каждом кубе и параллельного интерфейса передачи данных блок кубиков «понимает» текущую конфигурацию в реальном времени. Компьютер читает коллективную группу блоков через подключение главного блока и отображает всю группу на экране. Если пользователь переставляет блоки, то на экране появляется конечная конфигурация в реальном времени. Проект напоминает Triangles, но создан разными группами разработчиков независимо друг от друга [25, 26].



**Peano.** Пиано представляет собой набор, состоящий из пятидесяти кубиков, которые соединяются и образуют модульный, полноцветный дисплей в трех измерениях. Кубики выполнены из бесцветной диффузной пластмассы. В центре каждого куба Пиано расположен светодиод, который освещает весь объем, при этом его цвет может варьироваться.



Кубики объединяются в модульную сеть, которая поддерживает прямой и программный контроль над анимацией цветного света структуры. Хотя топология сети является линейной, геометрия является трехмерной. Это возможно благодаря использованию кривой Пиано. Кривую Пиано также называют кривой Гильберта, она представляет собой линейную структуру, которая поворачивается под углом  $90^\circ$ , чтобы определить трехмерное пространство с декартовыми координатами. Разъемы специально предназначены для соединения в четырех направлениях, образуют линейную одноранговую сеть. Механика соединения достигается с помощью магнитных коннекторов. Кубики Пиано могут быть анимированы с помощью цифровой палитры. Так как кубики являются сенсорными и «знают» топологию сети, то ими можно управлять с помощью прикосновений [27].

**Constructed Narratives.** Конструктор базируются на 3D Pentomino блоках. Блоки взаимодействуют друг с другом и компьютером по беспроводным каналам и позволяют играть в игры нескольким людям одновременно. На дисплее отображается их виртуальное представление и дополнительная информация. Например, разные цвета блоков, кому из игроков принадлежит блок, буквы для игры «Словодел». По словам автора проекта P. L. Jennings, Constructed Narratives представляет собой первый опыт в области исследований социальных материальных интерфейсов [28–30].



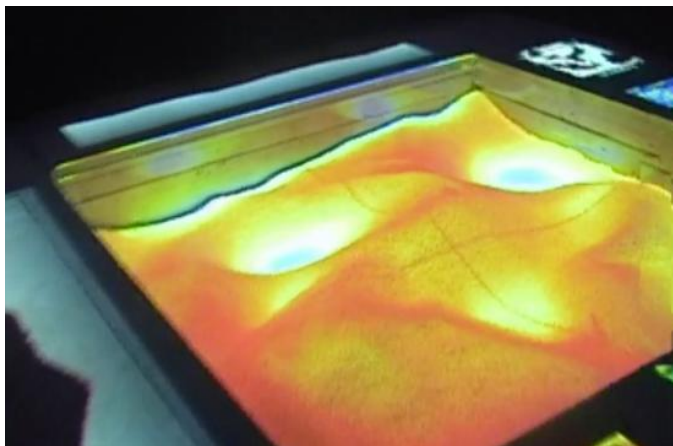
**mediaBlocks.** TUI интерфейс создан для манипуляции медиафайлами, а блоки выступают дескрипторами (тегами) для обращения к файлам в сети Интернет. Все устройства снабжены специальными считывателями для этих блоков. Пример: пе-



реставляя блок из компьютера в принтер, мы отправляем связанный документ на печать [31].



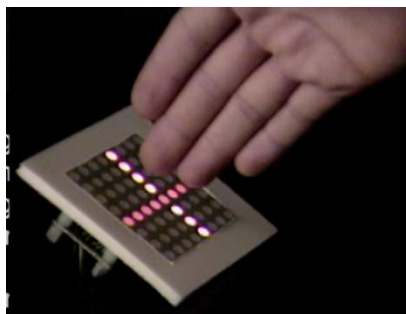
**SandScape.** Это интерфейс, позволяющий строить и понимать топографические карты посредством моделирования форм из песка. Специализированная система делает замеры высот в реальном времени и раскрашивает песок в карту высот с помощью проектора. Кроме того, могут быть отображены тени, биосфера, вода и тому подобное. Аналог Illuminating Clay от MIT Media Lab, где песок заменен глиной и внесено много усовершенствований (<http://tangible.media.mit.edu/project/illuminating-clay/>). Следующая ступень — это Relief, который позволяет воссоздавать и управлять топологией, пользуясь специальной конструкцией (<http://tangible.media.mit.edu/project/relief/>) [32, 33].



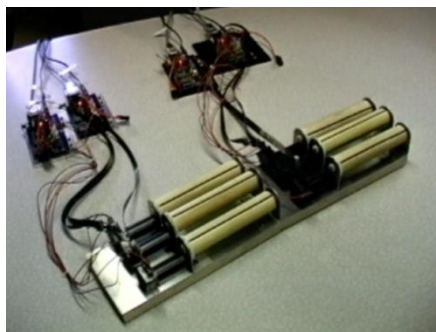
**Curlybot.** Это игрушка, которая может записывать и воспроизводить движение, заданное человеком, как он играл с ней. Она вспоминает, как она была перемещена, и может повторить это движение со всеми тонкостями оригинального жеста, она записывает каждую паузу, ускорение и даже встряхивания в руке пользователя. Затем Curlybot повторяет эти жесты множество раз, создавая красивые и выразительные узоры [34].



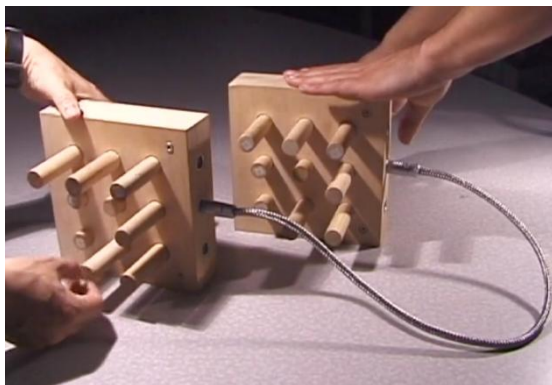
***Fishface.*** Жестовое устройство ввода с визуальной обратной связью в режиме реального времени. Обнаруживает движения путем зондирования электрического поля. Графический дисплей из массива светодиодов используется для отображения жестов [35].



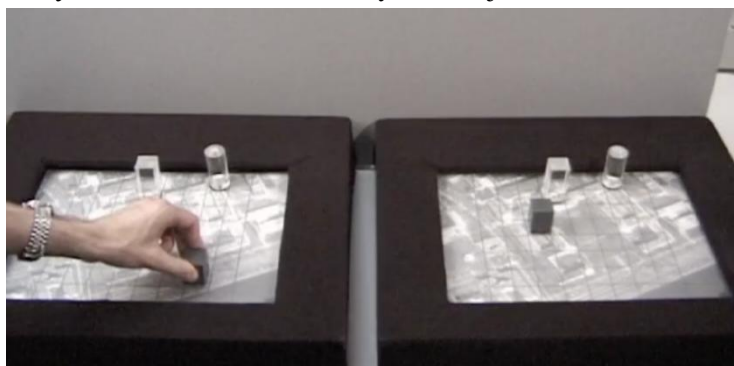
***inTouch.*** Проект состоит из синхронизированной пары аналогичных устройств. Вращение одной части в паре приводит к аналогичному движению в другой части так, что создается иллюзия, что между ними есть механическая связь. Проект позволяет создать иллюзию дистанционного межличностного общения через прикосновение к предмету. «Общий» объект обеспечивает тактильную связь между географически удаленными пользователями, открывая канал для физического выражения на расстоянии. То есть когда один пользователь проводит рукой по одному устройству из пары, второе устройство воспроизводит точно такие же движения и позволяет ощутить второму пользователю предмет так, как будто он физически соединен с первым предметом [36].



**PegBlocks.** Вариация на тему inTouch, передает конфигурацию от одного блока другому и обратно. Блок представляет из себя брусок с выступающими деревянными стержнями. Стержни можно двигать, что приводит к синхронному перемещению таких же стержней в парном блоке [37].



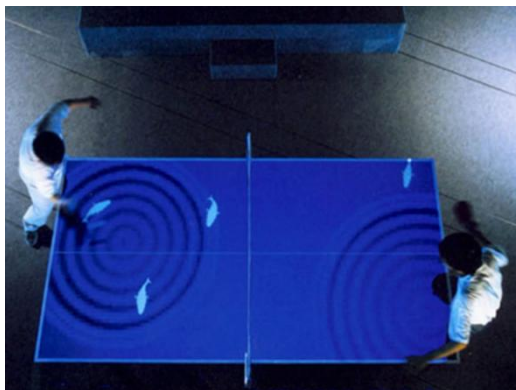
**PSyBench.** PSyBench платформа на Tangible Interfaces предназначена для удаленной кооперативной работы. Объекты на столе-дисплее физически синхронизированы с идентичными объектами на удаленном столе, что позволяет пользователям совместно управлять общим пространством, находясь в разных местах. Это часть проекта “Synchronized Distributed Physical Objects” [38].



**I/O Bulb and Luminous Room.** Проект-манипулирование дополненной реальностью. Компьютерная модель зависит от расположения физических объектов и их частей. I/O Bulb and Luminous Room являются двумя центральными идеями в проекте, целью которого является повсеместная трансформация архитектурного пространства, так что каждая поверхность оказывается способна отображать и собирать визуальную информацию. I/O Bulb является концептуальной эволюцией обычной лампочки [39, 40].

**PingPongPlus.** Настоящий стол для пин-понга, дополненный визуальными эффектами в реальном времени. С помощью проектора и звуков позволяет наглядно видеть, куда ударится шарик пин-понга и направление его движения во время игры. На принципах пин-понг-плюс могут быть построены любые динамические игры,

предоставляющие дополнительную информацию игрокам, такие как бильярд, теннис, хоккей и т. п. В случае с головоломками могут проецироваться или выводиться подсказки [41].



В новой версии PingPongPlusPlus авторы открыли возможность кастомизации пользовательского интерфейса и опыта всем желающим, открыв API и средства разработки [42]. Аналогичная разработка Andante добавляет персонажей к игре на пианино [43].

**musicBottles.** Музыкальные бутылки позволяют манипулировать предзаписанными мелодиями, открывая и закрывая которые пользователь как бы выпускает звук наружу. В проекте демонстрируется естественное управление через манипуляцию вещами [44].



**Reactable.** Один из самых известных TUI интерфейсов работы с музыкой. Звук, которые он издает, зависят от расположения на его поверхности кубиков, символизирующих модули синтезатора. Хотя reactable можно использовать в качестве музыкального инструмента (Бьерк даже взяла его на гастроли в 2007 г.), его реальная практичность под сомнением. Подобные устройства Sensetable и Audiopad были разработаны в 2001 и 2002 гг. в MIT Media Lab (<http://tangible.media.mit.edu/project/sensetable/> и <http://tangible.media.mit.edu/project/audiopad/>).

Синтезатор reactable, разработанный в Португалии пять лет назад, прямой наследник системы metaDESK, на которой Хироси Исии из медиалаборатории MIT оттачивал концепцию материального интерфейса в 1997 г. Reactable тоже состоит из стола-дисплея, на который проецируется компьютерное изображение, и набора

материальных кубиков-иконок (создатели reactable называют их «тангибли»). Необычность reactable в том, что это не столько синтезатор, сколько музыкальный конструктор. У каждого кубика — свое назначение. Некоторые из них интерпретируются системой как генераторы звуковых частот, другие представляют собой фильтры, третьи — это кубики-секвенсоры. Когда кубик оказывается на столе, он немедленно включается в работу, а на поверхности reactable появляются линии, соединяющие его с другими. Чтобы изменить настройки модуля синтезатора (например, увеличить частоту, которую он генерирует), достаточно повернуть соответствующий ему «тангибль» вокруг своей оси. Передвижения кубиков отслеживает камера, спрятанная под полупрозрачной поверхностью стола.



**Availabot.** Устройство под названием Availabot придумали в лондонской студии промышленного дизайна Schulze&Webb. Availabot представляет собой материальное воплощение одного из контактов в мессенджере AIM или ICQ. Когда контакт активен, миниатюрная фигурка уверенно стоит на ножках, но стоит тому уйти в оффлайн, и Availabot безвольно оседет. Для тех, кто готов выстроить на своем столе небольшой отряд таких человечков, предусмотрена особая услуга: каждой фигурке можно придать карикатурное сходство с ее прототипом в реальной жизни [45].



**Siftables / Sifteo.** Элементы Siftables похожи на детские кубики. (Sifteo — коммерческое наименование того же самого проекта). Верхнюю сторону элемента занимает миниатюрный жидкокристаллический дисплей. Внутри кубика находится



акселерометр, четыре инфракрасных датчика (по одному на каждую боковую грань) и микропроцессор. Кубики взаимодействуют между собой и компьютером. Они с помощью датчиков «понимают» соприкосновения с другими кубиками и отличают, когда их поднимают, встряхивают или наклоняют. Этого достаточно, чтобы превратить каждый кубик-Siftable в универсальное материальное воплощение цифрового документа. Тестовые приложения, которые разрабатывают изобретатели Siftables в медиалаборатории MIT, демонстрируют уже знакомый набор жестов, используемых в материальных интерфейсах. Чтобы загрузить в кубик случайный документ, его нужно встряхнуть; соприкосновение двух кубиков вызывает копирование информации; быстрый поворот лицевой стороны вниз и обратно — откат к прошлой версии документа. Группа кубиков может быть использована как платформа для детских игр [46, 47].



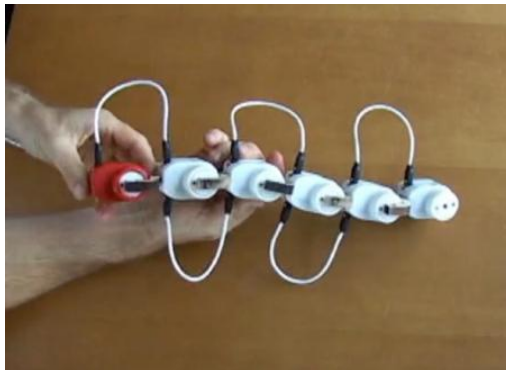
**Cubelets.** Cubelets разработан компанией Modular Robotics, это набор-игрушка, повторяющая функциональность проектов ActiveCube и Triangles. Однако модули могут нести моторизированные узлы и снабжаться дополнительным оборудованием и датчиками. Все это позволяет строить игрушечных роботов, машины и другие игрушки, делая игру увлекательной [48].



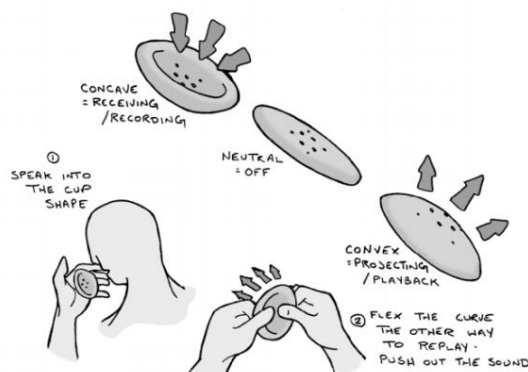
**I/O Brush.** Игрушка для детей, позволяющая рисовать цветами и текстурами реального мира. Пользователь может взять любой цвет и текстуру, приложив кисть к реальному физическому предмету, и дальше использовать эту текстуру при рисовании на компьютере этой же кистью. Устройство элегантно стирает еще один барьер между цифровым и физическим миром [49].



**Торобо.** Механический конструктор, воспроизводящий действия игрока. Пользователь может показать несколько движений, которые потом игрушка воспроизводит. Проект интересен оцифровкой и последующей имитацией действий пользователя. В будущем эти принципы могут быть применены, например, в интерфейсе роботов: отзеркаливая мимику и жесты человека, робот «может добиться» эмпатии и лучшего взаимопонимания [50].



**SpeakCup.** Пример технологии, где форма объекта влияет на цифровую информацию. Когда чашка микрофона вогнута, он записывает информацию, когда выгнута — воспроизводит. Один из самых интуитивно понятных примеров использования TUI интерфейса. Хороший пример для подражания. Подобные интерфейсы желательны в бытовом применении для устройств, которыми пользуются дети, старики, да и любые группы пользователей, не желающие думать о технических особенностях инструмента. Подобный прием инкапсулирует всю сложность устройства, предлагая пользователю элегантную простоту [51].



**g-stalt.** Система управления контентом, полностью основанная на распознавании жестов пользователя, которые он производит в пространстве [52]. Аналог T(ether) (<http://tangible.media.mit.edu/project/tether/>), ориентированный на управление пальцами в воздухе, в том числе одной рукой [53].



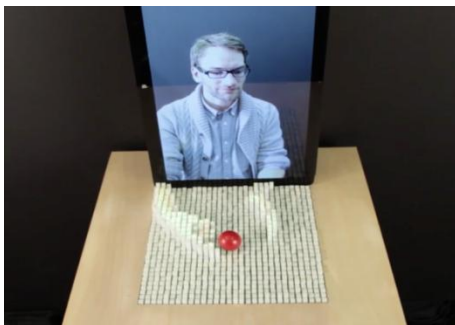
**ZeroN: Levitated Interaction Element.** Проект управляемой магнитной левитации. Позволяет взаимодействовать человеку с левитируемыми предметами. ZeroN представляет собой новый физический / цифровой элемент взаимодействия, который может левитировать и свободно перемещаться с помощью компьютера в трехмерном пространстве. Оба компьютера и люди могут перемещать ZeroN одновременно. При этом люди и компьютеры могут физически взаимодействовать друг с другом в 3D-пространстве. Пример использования ZeroN — это моделирование планетарной системы в учебных целях [54].



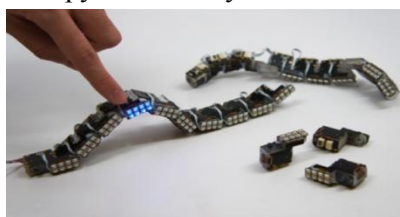
**inFORM, Physical Telepresence, TRANSFORM, Kinetic Blocks, Materiable.** Несколько аналогичных проектов, разработанных в медиалаборатории MIT, позволяющих удаленно управлять поверхностью. Пользуясь поверхностью с переменными



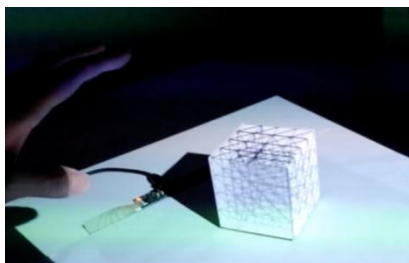
высотами, пользователь может передавать свои жесты на расстоянии и даже манипулировать объектами, как в случае с Kinetic Blocks [55–59].



**LineFORM и ChainFORM.** Похожие проекты, в которых цепь из автономно управляемых модульных сервоприводов образует единое целое. Напоминает продвинутую змейку Рубика. Цепь имеет двунаправленное взаимодействие с пользователем. Легко принимает различные формы, позволяет продемонстрировать передачу волн или анимировать игрушку, если встроить механизм внутрь игрушки в качестве скелета. Дает огромное количество игровых применений. В отличие от змейки Рубика, которая пассивна в руках играющего, эти проекты сами меняют свою форму и могут самостоятельно закрутить даже узел из своих сегментов [60–61].

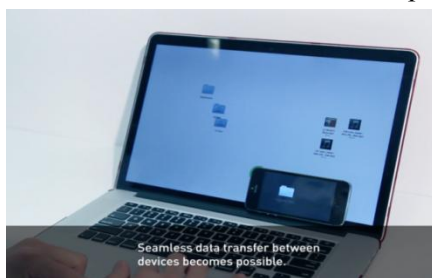


**inSide.** Проект inSide позволяет пользователям визуально осмотреть 3D внутреннюю информацию, «снимая» внешнюю оболочку с обозреваемого объекта. Работает с помощью проекторов, проецирующих внутреннее устройство объекта на его поверхность. (Поверхность может быть сложной). Реализует два популярных метода иллюстрации, а именно прозрачность и чертежи. Для управления используются жесты [62].



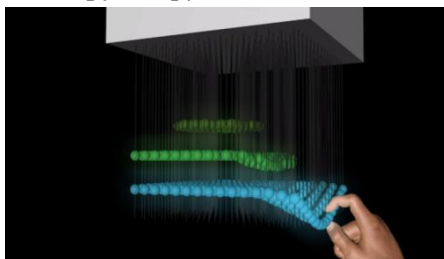
**Thaw.** Программное обеспечение, которое позволяет нескольким устройствам, например телефону и компьютеру, работать вместе как единое пространство. На

фото пользователь перетаскивает папку с файлами с экрана компьютера на телефон. Смартфон действует и в качестве физического интерфейса, и в качестве дополнительного графического слоя для поверхностного взаимодействия на экране компьютера. Решение позволяет отслеживать положение смартфона, размещенного над любым экраном. Способ может быть реализован на существующих устройствах без необходимости использования дополнительных аппаратных средств [63].



*Phixels* — это элементы, содержащие микрокомпьютер и датчики, которые могут работать совместно. Они образуют сетевую структуру, не требующую внешнего компьютера для управления. Могут использоваться для моделирования ландшафта, физических систем, телекоммуникации и др. Поскольку Phixels элементы могут обмениваться информацией друг с другом напрямую, они могут быть организованы в любую структуру. Авторы предлагают применять Phixels для визуализации игры на музыкальном инструменте, для декорирования архитектурного пространства или для художественного выражения [64].

Проект phixels напоминает известные кинетические скульптуры архитектора и дизайнера Joachim Sauter, но они не содержали самоуправляемых модулей и их элементы не взаимодействовали друг с другом [65].



## 5. Выводы

За последние два десятилетия разработан широкий спектр устройств, стирающих грань между компьютерной игрой и реальностью, между цифровым и реальным миром.

Устройства, отклоняющиеся от концепции WIMP (окна, иконки, меню, мышь), создали новое поколение интерфейсов [66].

Хотя не все эти инновации и используются повсеместно, их внедрение сулит повышение вовлеченности пользователя в интуитивное взаимодействие с интерфейсом компьютера, и как результат, повышение коммерческого успеха у проектов. Их использование возможно в десятках областей, таких как робототехника, медицина, бытовая автоматика, а также в образовании, серьезных играх или геймификационных механиках [67].

Ощутимые, или материальные, интерфейсы преодолевают разрыв между киберпространством и физической средой, делая цифровые объекты осязаемыми и интуитивно управляемыми.

## Литература

- [1] *Ishii H., Ullmer B.* Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms // In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems. — ACM, 1997. P. 234–241.
- [2] *Seufert E. B.* Freemium economics: Leveraging analytics and user segmentation to drive revenue. — Elsevier, 2013.
- [3] *Osipov I. V., Nikulchev E., Volinsky A. A., Prasikova A. Y.* Study of gamification effectiveness in online e-learning systems // *International Journal of advanced computer science and applications*, 2015. Vol. 6. No. 2. P. 71–77.
- [4] *Djaouti D., Alvarez J., Jessel J. P.* Classifying serious games: the G/P/S model // *Handbook of research on improving learning and motivation through educational games: Multidisciplinary approaches*. 2011. Vol. 2. P. 118–136.
- [5] *Scott M. J., Ghinea G.* Integrating fantasy role-play into the programming lab: exploring the 'projective identity' hypothesis // *Proceeding of the 44th ACM technical symposium on Computer science education*. — ACM, 2013. P. 119–122. doi:10.1145/2445196.2445237.
- [6] *Тихонов К.* Руками не трогать? // *Компьютерра*. Сентябрь 2008. <http://old.computerra.ru/terralab/archive/input/378840/>
- [7] *Perenson M. J.* Microsoft Debuts 'Minority Report'-Like Surface Computer // *PCWorld*. May, 2007. <http://www.pcworld.com/article/132352/article.html>
- [8] *Markoff J.* As Apple Gains PC Market Share, Jobs Talks of a Decade of Upgrades // *NY-Times*. 22 Oct, 2007. <http://www.nytimes.com/2007/10/22/technology/22apple.html>
- [9] *Guo C., Sharlin E.* Exploring the use of tangible user interfaces for human-robot interaction: a comparative study // *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. — ACM, 2008. P. 121–130.
- [10] *Bainbridge W. S.* *Berkshire encyclopedia of human-computer interaction*. — Berkshire Publishing Group LLC, 2004.
- [11] ELO Touch [Электронный ресурс] URL: <https://www.elotouch.com/about>

- [12] *Buxton B.* Multi-touch systems that I have known and loved // *Microsoft Research*. 2007. Vol. 56. P. 1–11.
- [13] *Engelbart D. C.* XY Position Indicator for a Display System // US 3541541. USA, November. 1970.
- [14] *Topolsky J.* Apple's Magic Mouse: one button, multitouch gestures, Bluetooth, four-month battery life [Электронный ресурс] URL: <https://www.engadget.com/2009/10/20/apples-magic-mouse-multitouch-gestures-bluetooth-four-month/>
- [15] *Szeliski R.* Computer vision: algorithms and applications. — Springer Science & Business Media, 2010.
- [16] *Krueger M. W.* Artificial reality. — 1983.
- [17] *Галеев Б. М.* Легендарный Термен. Репрессивная наука. — СПб. : Наука, 1991.
- [18] *Schou T., Gardner H. J.* A Wii remote, a game engine, five sensor bars and a virtual reality theatre // Proceedings of the 19th Australasian conference on Computer-Human Interaction: Entertaining User Interfaces — ACM, 2007. P. 231–234).
- [19] *Zhang Z.* Microsoft kinect sensor and its effect // *IEEE multimedia*. 2012. Vol. 19. No. 2. P. 4–10.
- [20] *Ishii H., Ullmer B.* Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms // Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems. — ACM, 1997. P. 234–241.
- [21] *Fitzmaurice G. W., Ishii H., Buxton W. A.* Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces // Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. — ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1995. P. 442–449.
- [22] *Ullmer B., Ishii H.* The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces // Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology. — ACM, 1997. 223–232/
- [23] *Ullmer B. A.* Models and mechanisms for tangible user interfaces. Doctoral dissertation. — Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [24] *Gorbet M. G., Orth M., Ishii H.* Triangles: tangible interface for manipulation and exploration of digital information topography // Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems). — ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1998. P. 49–56.
- [25] *Kitamura Y., Itoh Y., Masaki T., Kishino F.* ActiveCube: a bi-directional user interface using cubes // Proceedings. Fourth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies 2000. — IEEE, 2000. Vol. 1, P. 99–102.
- [26] *Watanabe R., Itoh Y., Asai M., Kitamura Y., Kishino F., Kikuchi H.* The soul of ActiveCube: implementing a flexible, multimodal, three-dimensional spatial tangible interface // Computers in Entertainment (CIE). 2004. Vol. 2. No. 4. P. 1–13. <https://pdfs.semanticscholar.org/acd9/546adb6bf228710a5d2a378f4870edc03414.pdf>

- [27] *Heaton K.* Peano cube, Personal Information Architecture Group and Toys of Tomorrow, 2000.
- [28] *Jennings P. L.* A Theoretical Construct of Serious Play and the Design of a Tangible Social Interface // *Shared Encounters*. — Springer London, 2009. P. 153–172.
- [29] *Jennings P.* Tangible social interfaces: critical theory, boundary objects and interdisciplinary design methods // *Proceedings of the 5th conference on Creativity & cognition*. — ACM, 2005. P. 176–186.
- [30] *Jennings P.* Constructed narratives a tangible social interface // *Proceedings of the 5th conference on Creativity & cognition*. — ACM, 2005. P. 263–266. <https://www.cl.cam.ac.uk/events/tangibleinterfaces/TUIworkshop-Jennings.pdf>
- [31] *Ullmer B., Ishii H., Glas D.* mediaBlocks: physical containers, transports, and controls for online media // *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. — ACM, 1998. P. 379–386.
- [32] *Ratti C., Wang Y., Ishii H., Piper B., Frenchman D.* Tangible User Interfaces (TUIs): a novel paradigm for GIS // *Transactions in GIS*. 2004. Vol. 8. No. 4. P. 407–421.
- [33] *Piper B., Ratti C., Ishii H.* Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis // *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. — ACM, 2002. P. 355–362.
- [34] *Frei P., Su V., Mikhak B., Ishii H.* Curlybot: designing a new class of computational toys // *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. — ACM, 2000. P. 129–136.
- [35] *Yarin P., Smith J., Ishii H.* *Fishface* [Электронный ресурс] URL: <http://alumni.media.mit.edu/~yarin/fishface/>
- [36] *Su V. C.* The design and implementation of inTouch: a distributed, haptic communication system. Doctoral dissertation. — Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [37] *Piper B., Ishii H.* PegBlocks: a learning aid for the elementary classroom // *CHI'02 extended abstracts on Human factors in computing systems*. — ACM, 2002. P. 686–687.
- [38] *Brave S., Ishii H., Dahley A.* Tangible interfaces for remote collaboration and communication // *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*. — ACM, 1998. P. 169–178.
- [39] *Underkoffler J., Ishii H.* Urp: a luminous-tangible workbench for urban planning and design // *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*. — ACM, 1999. P. 386–393.
- [40] *Underkoffler J., Ullmer B., Ishii H.* Emancipated pixels: real-world graphics in the luminous room // *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. — ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999. P. 385–392.

- [41] *Ishii H., Wisneski C., Orbanes J., Chun B., Paradiso J.* PingPongPlus: design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play // Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems. — ACM, 1999. P. 394–401.
- [42] *Xiao X., Bernstein M. S., Yao L., Lakatos D., Gust L., Acquah K., Ishii H.* PingPong++: community customization in games and entertainment // Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. — ACM, 2011. P. 24.
- [43] *Xiao X., Tome B., Ishii H.* Andante: Walking Figures on the Piano Keyboard to Visualize Musical Motion // Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression. — London, 2014. P. 629–632.
- [44] *Ishii H.* Bottles: A transparent interface as a tribute to mark weiser // *IEICE Transactions on information and systems*. 2004. Vol. 87. No. 6. P. 1299–1311.
- [45] *Coupard P. P.* An Availabot-like computer-controlled push puppet for Linux [Электронный ресурс] URL: [http://myspace.voo.be/pcoupard/push\\_puppet\\_toy/](http://myspace.voo.be/pcoupard/push_puppet_toy/)
- [46] *Merrill D. J., Kalanithi J. J., Fitzgerald B. P.* U.S. Patent No. D635,190. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 2011.
- [47] *Hunter S., Kalanithi J., Merrill D.* Make a Riddle and TeleStory: designing children's applications for the siftables platform // Proceedings of the 9th International Conference on Interaction Design and Children. — ACM, 2010. P. 206–209.
- [48] *Schweikardt E.* Modular robotics studio // Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction. — ACM, 2011. P. 353–356.
- [49] *Ryokai K., Marti S., Ishii H.* I/O brush: drawing with everyday objects as ink // Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. — ACM, 2004. P. 303–310.
- [50] *Raffle H. S., Parkes A. J., Ishii H.* Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory // Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. — ACM, 2004. P. 647–654.
- [51] *Zigelbaum J., Chang A., Gouldstone J., Monzen J. J., Ishii H.* SpeakCup: simplicity, BABL, and shape change // Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction. — ACM, 2008. P. 145–146.
- [52] *Zigelbaum J., Browning A., Leithinger D., Bau O., Ishii H.* G-stalt: a chirocentric, spatiotemporal, and telekinetic gestural interface // Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction. — ACM, 2010. P. 261–264.
- [53] *Lakatos D., Blackshaw M., Olwal A., Barryte Z., Perlin K., Ishii H.* T (ether): spatially-aware handhelds, gestures and proprioception for multi-user 3D modeling and animation // Proceedings of the 2nd ACM symposium on Spatial user interaction. — ACM, 2014. P. 90–93.
- [54] *Lee J., Post R., Ishii H.* ZeroN: mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation // Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology. — ACM, 2011. P. 327–336.

- [55] *Follmer S., Leithinger D., Olwal A., Hogge A., Ishii H.* inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation // Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST'13. — ACM, 2013. P. 417–426.
- [56] *Leithinger D., Follmer S., Olwal A., Ishii H.* Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration // Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology. — ACM, 2014. P. 461–470.
- [57] *Ishii H., Leithinger D., Follmer S., Zoran A., Schoessler P., Counts J.* TRANSFORM: Embodiment of Radical Atoms at Milano Design Week // Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. — ACM, 2015. P. 687–694.
- [58] *Schoessler P., Windham D., Leithinger D., Follmer S., Ishii H.* Kinetic Blocks: Actuated Constructive Assembly for Interaction and Display // Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. — ACM, 2015. P. 341–349.
- [59] *Nakagaki K., Vink L., Counts J., Windham D., Leithinger D., Follmer S., Ishii H.* Materiable: Rendering Dynamic Material Properties in Response to Direct Physical Touch with Shape Changing Interfaces // Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. — ACM, 2016. P. 2764–2772.
- [60] *Nakagaki K., Follmer S., Ishii H.* LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint // Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. — ACM, 2015. P. 333–339.
- [61] *Nakagaki K., Dementyev A., Follmer S., Paradiso J. A., Ishii H.* ChainFORM: A Linear Integrated Modular Hardware System for Shape Changing Interfaces // Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. — ACM, 2016. P. 87–96.
- [62] *Tang S. K., Sekikawa Y., Perlin K., Larson K., Ishii H.* inSide [Электронный ресурс] URL: <http://tangible.media.mit.edu/project/inside/>
- [63] *Leigh S. W., Schoessler P., Heibeck F., Maes P., Ishii H.* THAW: tangible interaction with see-through augmentation for smartphones on computer screens // Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. — ACM, 2015. P. 89–96.
- [64] *Vink L., Dementyev A., Ishii H.* Phixels [Электронный ресурс] URL: <http://tangible.media.mit.edu/project/phixels/>
- [65] *Sauter J.* Interfaces in Public and Semi-public Space. In *The Art and Science of Interface and Interaction Design*. — Springer Berlin Heidelberg, 2008. P. 63–73.
- [66] *Jacob R. J., Girouard A., Hirshfield L. M., Horn M. S., Shaer O., Solovey E. T., Zigelbaum J.* Reality-based interaction: unifying the new generation of interaction styles // CHI'07 extended abstracts on Human factors in computing systems. — ACM, 2007. P. 2465–2470.



- [67] *Schneider B., Jermann P., Zufferey G., Dillenbourg P.* Benefits of a tangible interface for collaborative learning and interaction // *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2011. Vol. 4. No. 3. P. 222–232.

**Автор:**

*Илья Викторович Осипов* — директор, i2study Inc. (США, Сан-Франциско).



## Technical Equipment of Human-Computer Interaction TUI. Review and Analysis Opportunities to use for Gamification

I. V. Osipov

i2i study, Inc. San Francisco, CA, USA

e-mail: ilyavosipov@gmail.com

*Abstract.* This article provides an overview of modern technology used in the construction of tangible user interface (TUI). Review focuses on the opportunities TUI as an extension of human-computer interaction in gamification technologies.

*Keywords:* TUI, GUI, tangible user interface, ambient media, augmented reality, ubiquitous computing, Pervasive Computing, gamification, serious games.

### References

- [1] Ishii H., Ullmer B. (1997) Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems, pp. 234–241.
- [2] Seufert E. B. (2013). Freemium economics: Leveraging analytics and user segmentation to drive revenue. Elsevier.
- [3] Osipov I. V., Nikulchev E., Volinsky A. A., Prasikova, A. Y. (2015) *International Journal of advanced computer science and applications*, 6(2):71–77.
- [4] Djaouti D., Alvarez J., Jessel J. P. (2011) Classifying serious games: the G/P/S model. *Handbook of research on improving learning and motivation through educational games: Multidisciplinary approaches*, 2:118–136.
- [5] Scott M. J., Ghinea G. (2013) Integrating fantasy role-play into the programming lab: exploring the 'projective identity' hypothesis. In Proceeding of the 44th ACM technical symposium on Computer science education, pp. 119–122.
- [6] <http://old.computerra.ru/terralab/archive/input/378840/>
- [7] Perenson M. J. (2007) Microsoft Debuts 'Minority Report'-Like Surface Computer. PCWorld. <http://www.pcworld.com/article/132352/article.html>
- [8] Markoff J. (2007) As Apple Gains PC Market Share, Jobs Talks of a Decade of Upgrades. NYTimes. <http://www.nytimes.com/2007/10/22/technology/22apple.html>
- [9] Guo C., Sharlin E. (2008). Exploring the use of tangible user interfaces for human-robot interaction: a comparative study. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 121–130.

- [10] *Bainbridge W. S.* (2004). Berkshire encyclopedia of human-computer interaction. Berkshire Publishing Group LLC.
- [11] <https://www.elotouch.com/about>
- [12] *Buxton B.* (2007). *Microsoft Research*, **56**:1–11.
- [13] *Engelbart D. C.* (1970). XY Position Indicator for a Display System, US 3541541. USA, November.
- [14] *Topolsky J.* (2009) Apple's Magic Mouse: one button, multitouch gestures, Bluetooth, four-month battery life. engadget.com. <https://www.engadget.com/2009/10/20/apples-magic-mouse-multitouch-gestures-bluetooth-four-month/>
- [15] *Szeliski R.* (2010). Computer vision: algorithms and applications. Springer & Business Media.
- [16] *Krueger M. W.* (1983). Artificial reality.
- [17] *Galeev B. M.* (1991). Legendary Theremin. Repressive science. Nauka. [In Rus]
- [18] *Schou T., Gardner H. J.* (2007). A Wii remote, a game engine, five sensor bars and a virtual reality theatre. In Proceedings of the 19th Australasian conference on Computer-Human Interaction: Entertaining User Interfaces, pp. 231–234.
- [19] *Zhang Z.* (2012) *IEEE multimedia*, **19**(2):4–10.
- [20] *Ishii H., Ullmer B.* (1997). Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems, pp. 234–241.
- [21] *Fitzmaurice G. W., Ishii H., Buxton W. A.* (1995). Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 442–449.
- [22] *Ullmer B., Ishii H.* (1997). The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. In Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 223–232.
- [23] *Ullmer B. A.* (1997). Models and mechanisms for tangible user interfaces (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [24] *Gorbet M. G., Orth M., Ishii H.* (1998). Triangles: tangible interface for manipulation and exploration of digital information topography. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 49–56.
- [25] *Kitamura Y., Itoh Y., Masaki T., Kishino F.* (2000). ActiveCube: a bi-directional user interface using cubes. In Proceedings. Fourth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies, **1**, pp. 99–102.
- [26] *Watanabe R., Itoh Y., Asai M., Kitamura Y., Kishino F., Kikuchi H.* (2004). *Computers in Entertainment*, **2**(4):1–15.

- [27] *Heaton K.* (2000). Peano cube, Personal Information Architecture Group and Toys of Tomorrow.
- [28] *Jennings P. L.* (2009). A Theoretical Construct of Serious Play and the Design of a Tangible Social Interface. In *Shared Encounters* (Springer London), pp. 153–172.
- [29] *Jennings P.* (2005). Tangible social interfaces: critical theory, boundary objects and interdisciplinary design methods. In *Proceedings of the 5th conference on Creativity & cognition*, pp. 176–186.
- [30] *Jennings P.* (2005). Constructed narratives a tangible social interface. In *Proceedings of the 5th conference on Creativity & cognition*, pp. 263–266.
- [31] *Ullmer B., Ishii H., Glas D.* (1998) mediaBlocks: physical containers, transports, and controls for online media. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 379–386.
- [32] *Ratti C., Wang Y., Ishii H., Piper B., Frenchman D.* (2004) *Transactions in GIS*, **8**(4):407.
- [33] *Piper B., Ratti C., Ishii H.* (2002). Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 355–362.
- [34] *Frei P., Su V., Mikhak B., Ishii H.* (2000). Curlybot: designing a new class of computational toys. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 129–136.
- [35] *Yarin P., Smith J., Ishii H.* (1998) Fishface <http://alumni.media.mit.edu/~yarin/fishface/>
- [36] *Su V. C.* (1999) The design and implementation of inTouch: a distributed, haptic communication system (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [37] *Piper B., Ishii H.* (2002). PegBlocks: a learning aid for the elementary classroom. In *CHI'02 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 686–687.
- [38] *Brave S., Ishii H., Dahley A.* (1998). Tangible interfaces for remote collaboration and communication. In *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pp. 169–178.
- [39] *Underkoffler J., Ishii H.* (1999). Urp: a luminous-tangible workbench for urban planning and design. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 386–393.
- [40] *Underkoffler J., Ullmer B., Ishii H.* (1999). Emancipated pixels: real-world graphics in the luminous room. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 385–392.
- [41] *Ishii H., Wisneski C., Orbanes J., Chun B., Paradiso J.* (1999). PingPongPlus: design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 394–401.

- [42] Xiao X., Bernstein M. S., Yao L., Lakatos D., Gust L., Acquah K., Ishii H. (2011). Ping-Pong++: community customization in games and entertainment. In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, p. 24.
- [43] Xiao X., Tome B., Ishii H. (2014). Andante: Walking Figures on the Piano Keyboard to Visualize Musical Motion. In NIME, pp. 629–632.
- [44] Ishii H. (2004) *IEICE Transactions on information and systems*, **87**(6):1299–1311.
- [45] Coupard P. P. (2008) An Availabot-like computer-controlled push puppet for Linux.
- [46] Merrill D. J., Kalanithi J. J., Fitzgerald B. P. (2011). U.S. Patent No. D635,190. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [47] Hunter S., Kalanithi J., Merrill D. (2010) Make a Riddle and TeleStory: designing children's applications for the siftables platform. In Proceedings of the 9th International Conference on Interaction Design and Children, pp. 206–209).
- [48] Schweikardt E. (2011). Modular robotics studio. In Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, pp. 353–356.
- [49] Ryokai K., Marti S., Ishii H. (2004). I/O brush: drawing with everyday objects as ink. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 303–310.
- [50] Raffle H. S., Parkes A. J., Ishii H. (2004). Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 647–654.
- [51] Zigelbaum J., Chang A., Gouldstone J., Monzen J. J., Ishii H. (2008). SpeakCup: simplicity, BABL, and shape change. In Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction, pp. 145–146.
- [52] Zigelbaum J., Browning A., Leithinger D., Bau O., Ishii H. (2010). G-stalt: a chirocentric, spatiotemporal, and telekinetic gestural interface. In Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, pp. 261–264.
- [53] Lakatos D., Blackshaw M., Olwal A., Barryte Z., Perlin K., Ishii H. (2014). T (ether): spatially-aware handhelds, gestures and proprioception for multi-user 3D modeling and animation. In Proceedings of the 2nd ACM symposium on Spatial user interaction, pp. 90–93.
- [54] Lee J., Post R., Ishii H. (2011). ZeroN: mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation. In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 327–336.
- [55] Follmer S., Leithinger D., Olwal A., Hogge A., Ishii H. (2013) inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In UIST, pp. 417–426.
- [56] Leithinger D., Follmer S., Olwal A., Ishii H. (2014) Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration. In Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 461–470.

- [57] Ishii H., Leithinger D., Follmer S., Zoran A., Schoessler P., Counts J. (2015) TRANSFORM: Embodiment of Radical Atoms at Milano Design Week. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 687–694.
- [58] Schoessler P., Windham D., Leithinger D., Follmer S., Ishii H. (2015) Kinetic Blocks: Actuated Constructive Assembly for Interaction and Display. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 341–349.
- [59] Nakagaki K., Vink L., Counts J., Windham D., Leithinger D., Follmer S., Ishii H. (2016) Material: Rendering Dynamic Material Properties in Response to Direct Physical Touch with Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2764–2772.
- [60] Nakagaki K., Follmer S., Ishii H. (2015) LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 333–339.
- [61] Nakagaki K., Dementyev A., Follmer S., Paradiso J. A., Ishii H. (2016). ChainFORM: A Linear Integrated Modular Hardware System for Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 87–96.
- [62] Tang S. K., Sekikawa Y., Perlin K., Larson K., Ishii H. (2014) inSide <http://tangible.media.mit.edu/project/inside/>
- [63] Leigh S. W., Schoessler P., Heibeck F., Maes P., Ishii H. (2015). THAW: tangible interaction with see-through augmentation for smartphones on computer screens. In Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, pp. 89–96.
- [64] Vink L., Dementyev A., Ishii H. (2016) Phixels, <http://tangible.media.mit.edu/project/phixels/>
- [65] Sauter J. (2008). Interfaces in Public and Semi-public Space. In *The Art and Science of Interface and Interaction Design* (Springer Berlin Heidelberg), pp. 63–73.
- [66] Jacob R. J., Girouard A., Hirshfield L. M., Horn M. S., Shaer O., Solovey E. T., Zigelbaum J. (2007). Reality-based interaction: unifying the new generation of interaction styles. In CHI'07 extended abstracts on Human factors in computing systems, pp. 2465–2470.
- [67] Schneider B., Jermann P., Zufferey G., Dillenbourg P. (2011). *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(3):222–232.

## Моделирование движения летательного аппарата с машущим крылом<sup>1</sup>

*Л. Ю. Ворочаева, С. Ф. Ефимов, О. Г. Локтионова,  
Б. В. Лушников, С. Ф. Яцун*

*Юго-Западный государственный университет,  
305040, Россия, Курск, ул. 50 лет Октября, 94,*

*e-mail: mila180888@yandex.ru, efimov@mail.ru, rector@swsu.ru,  
bv1\_61@inbox.ru, teormeh@inbox.ru*

*Аннотация.* Статья посвящена исследованию вертикального полета аппарата с машущим крылом, также называемого орнитооптером. Робот представляет собой цепочку пяти последовательно соединенных активными цилиндрическими шарнирами звеньев, центральное из которых является корпусом, а остальные попарно образуют складывающиеся крылья. Особенность рассматриваемого устройства заключается в том, что взмахи его крыльев имитируют движение крыльев чайки, т. е. у объекта есть биологический прототип. Для аппарата разработана математическая модель полета, большое внимание уделено модели взаимодействия звеньев робота с воздушной средой, определены положения и скорости точек приложения приведенных аэродинамических сил к каждому из звеньев. На основании результатов численного моделирования вертикального полета робота установлено наличие трех режимов полета: подъем, зависание на некоторой высоте и снижение, нахождение устройства в одном из указанных режимов влияют параметры колебаний крыльев, а именно частота и амплитуда взмахов, соотношение амплитуд колебаний двух звеньев одного крыла и смещение относительно нуля положения равновесия колебаний крыльев.

*Ключевые слова:* орнитооптер, летающий аппарат, машущее крыло, аэродинамические силы, вертикальный полет, режимы полета.

### 1. Введение

С развитием робототехники и сопутствующих технологий все больший интерес проявляется к бионике — науке, которая изучает характер движения живых организмов, а также явления и процессы, протекающие в них с целью создания мехатронных приборов, работающих по тем же принципам.

Изучение характера движения птиц позволило сделать важный вывод о том, что в качестве упрощенной системы, адекватно моделирующей движение робота-орнитоопера, можно рассматривать систему трех или пяти твердых тел, связанных

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-08-00787.

между собой шарнирами, оснащенными электроприводами [1–7]. Подавая управляющие напряжения на электроприводы, можно изменять относительные углы, определяющие положение звеньев друг относительно друга, на заданные значения.

## 2. Описание орнитоптера

В статье рассматривается аппарат с двумя машущими крыльями, называемый орнитоптером, который состоит из цепочки пяти звеньев [5]. Каждое крыло робота образовано двумя звеньями 1 и 2, 4 и 5, соединенными между собой цилиндрическими шарнирами, при помощи таких же шарниров крылья присоединены к корпусу 3 (рис. 1). Цилиндрические шарниры являются активными за счет приводов 6, при помощи которых крылья совершают взмахи относительно корпуса. Особенностью предложенной в работе конструкции является то, что крылья аппарата во время каждого взмаха изменяют свою площадь в проекции на горизонтальную плоскость, благодаря чему и осуществляется полет: при движении крыла вверх его звенья складываются, сопротивление воздуха, действующее на них, уменьшается, при движении вниз звенья крыла раскладываются, увеличивая сопротивление воздуха под крылом.

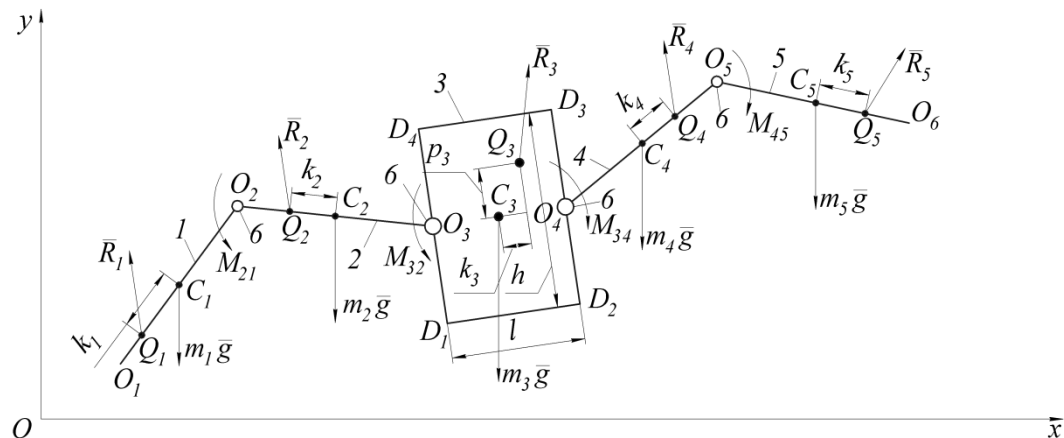


Рисунок 1. Расчетная схема орнитоптера

В работе исследуется движение орнитоптера в вертикальной плоскости  $Oxy$  при условии, что корпус аппарата моделируется прямоугольником со сторонами  $l_3$  и  $h_3$ , а звенья крыльев — стержнями длинами  $l_i$ . Также в работе принято допущение, что центры масс звеньев совпадают с центрами их симметрии — точками  $C_i$ . С каждым звеном связана относительная система координат  $O_i x_i y_i$  так, что ось  $O_i x_i$  располагалась вдоль звена (для звена 3 относительная система координат  $C_3 x_3 y_3$ , ось  $C_3 x_3$  проходит через точки  $C_3$  и  $O_4$ ). Положение робота на плоскости  $Oxy$  одно-



значно описывается проекциями положения центра масс корпуса на оси  $Ox$  и  $Oy$ , а также углами  $\varphi_i$  наклона звеньев к горизонтальной оси, отсчитываемыми против часовой стрелки. Таким образом, вектор обобщенных координат имеет вид

$$\bar{q} = (x_{c3} \ y_{c3} \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4 \ \varphi_5)^T. \quad (1)$$

Полет орнитоопера происходит при действии на него сил тяжести  $m_i g$ , приложенных в центрах масс звеньев и направленных вертикально вниз, моментов  $M_{21}$ ,  $M_{32}$ ,  $M_{34}$ ,  $M_{45}$ , генерируемых приводами, и аэродинамических сил  $R_i$ , приложенных в точках  $Q_i$ .

### 3. Модель аэродинамического взаимодействия

#### 3.1. Определение аэродинамических сил

Во время движения орнитоопера на каждое звено  $i = 1, 2, 4, 5$  действуют аэродинамические силы, которые в проекциях на координатные оси абсолютной и относительной (связанной со звеном  $i$ ) систем координат могут быть записаны следующим образом (рис. 2):

$$\bar{R}_i = \bar{R}_{ix} + \bar{R}_{iy} = \bar{R}_{ix}^{(i)} + \bar{R}_{iy}^{(i)}. \quad (2)$$

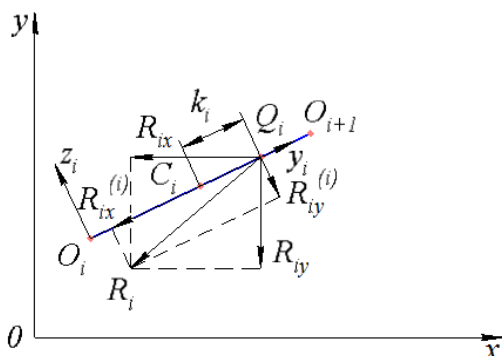


Рисунок 2. Схема приложения аэродинамической силы к звену  $i = 1, 2, 4, 5$

Проекции аэродинамических сил в абсолютной системе координат определяются по формулам

$$R_{ix} = \frac{C_x \rho S_i^{Ox}}{2} \dot{x}_{Q_i} |\dot{x}_{Q_i}|, \quad R_{iy} = \frac{C_y \rho S_i^{Oy}}{2} \dot{y}_{Q_i} |\dot{y}_{Q_i}|, \quad (3)$$

где  $C_x$ ,  $C_y$  — коэффициенты проекций аэродинамической силы;  $S_i^{Ox}$ ,  $S_i^{Oy}$  — площади сторон звена  $i$  перпендикулярно осям  $Ox$  и  $Oy$  соответственно,  $\dot{x}_{Q_i}$ ,  $\dot{y}_{Q_i}$  — проекции скорости точки  $Q_i$  на оси  $Ox$  и  $Oy$ .



Площади  $S_i^{Ox}$  и  $S_i^{Oy}$  будем вычислять по формулам

$$S_i^{Ox} = S_i^{Oixi} \cos \varphi_i + S_i^{Oiyi} \sin \varphi_i, \quad (4)$$

$$S_i^{Oy} = S_i^{Oixi} \sin \varphi_i + S_i^{Oiyi} \cos \varphi_i, \quad (5)$$

где

$$S_i^{Oixi} = b_i h_i, \quad S_i^{Oiyi} = l_i b_i \quad (6)$$

— площади звеньев, перпендикулярные осям  $O_i x_i$  и  $O_i y_i$  относительных систем координат, для  $i = 1, 2, 4, 5$ ;  $S_i^{Oixi} = 0$ ,  $b_i$  — ширина звеньев, определяется в направлении, перпендикулярном плоскости  $Oxy$  и на рис. 1 не показана.

Для определения положения точек  $Q_i$  на звеньях и их скоростей будем считать, что точки  $Q_i$  являются центрами масс фигур, образованных силами  $\bar{R}_{iy}^{(i)}$ , направленными перпендикулярно звеньям. Причем эти точки удалены от центров масс крыльев на расстояния  $k_i$ , а для корпуса положение точки  $Q_3$  определяется расстояниями  $k_3$  и  $p_3$  относительно центра масс последнего вдоль сторон  $D_1 D_2$  и  $D_2 D_3$ .

### 3.2. Определение скоростей точек $Q_i$

Скорости точек  $Q_i$  будем определять исходя из их положений на звеньях, принятых ранее, которые во время движения робота постоянно меняются. Скорости точек  $Q_2, Q_4$  равны:

$$\dot{\vec{r}}_{Q_2} = \dot{\vec{r}}_{C_3} + \dot{T}_{30} \bar{\rho}_{C_3 O_3}^{(3)} + \dot{T}_{20} (\bar{\rho}_{O_3 C_2}^{(2)} + \bar{\rho}_{C_2 Q_2}^{(2)}), \quad (7)$$

$$\dot{\vec{r}}_{Q_4} = \dot{\vec{r}}_{C_3} + \dot{T}_{30} \bar{\rho}_{C_3 O_4}^{(3)} + \dot{T}_{40} (\bar{\rho}_{O_4 C_4}^{(4)} + \bar{\rho}_{C_4 Q_4}^{(4)}), \quad (8)$$

где  $\bar{\rho}_{C_2 Q_2}^{(2)} = (k_2 \ 0)^T$ ,  $\bar{\rho}_{C_4 Q_4}^{(4)} = (k_4 \ 0)^T$  — соответствующие относительные радиусы-векторы;  $\dot{T}_{i0}$  — производная матрицы поворота

$$T_{i0} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Скорости точек  $Q_1, Q_5$  равны:

$$\dot{\vec{r}}_{Q_1} = \dot{\vec{r}}_{C_3} + \dot{T}_{30} \bar{\rho}_{C_3 O_3}^{(3)} + \dot{T}_{20} \bar{\rho}_{O_3 O_2}^{(2)} + \dot{T}_{10} (\bar{\rho}_{O_2 C_1}^{(1)} + \bar{\rho}_{C_1 Q_1}^{(1)}), \quad (10)$$

$$\dot{\vec{r}}_{Q_5} = \dot{\vec{r}}_{C_3} + \dot{T}_{30} \bar{\rho}_{C_3 O_4}^{(3)} + \dot{T}_{40} \bar{\rho}_{O_4 O_5}^{(4)} + \dot{T}_{50} (\bar{\rho}_{O_5 C_5}^{(5)} + \bar{\rho}_{C_5 Q_5}^{(5)}), \quad (11)$$

где  $\bar{\rho}_{C_1 Q_1}^{(1)} = (k_1 \ 0)^T$ ,  $\bar{\rho}_{C_5 Q_5}^{(5)} = (k_5 \ 0)^T$  — соответствующие относительные радиусы-векторы.

Скорость точки  $Q_3$  имеет вид:

$$\dot{\vec{r}}_{Q_3} = \dot{\vec{r}}_{C_3} + \dot{T}_{30} \vec{p}_{C_3 Q_3}^{(3)} \quad (12)$$

где  $\vec{p}_{C_3 Q_3}^{(3)} = (k_3 \ p_3)^T$  — относительный радиус-вектор.

### 3.3. Определение положений точек $Q_i$

Для определения расположения точек  $Q_i$  на звеньях (расстояния  $k_i, p_3$ ) будем рассматривать соответствующие проекции аэродинамической силы  $R_{iy}^{(i)}$  и  $R_{3x}^{(3)}$ , перпендикулярные осям  $O_i x_i, O_3 y_3$ , а точки  $Q_i$  считать центрами масс соответствующих фигур. Скорости точек  $Q_i$  в проекциях на оси систем координат  $O_i x_i y_i$  записываются с использованием матриц поворота  $T_{0i}$ :

$$\dot{r}_{Q_i}^{(i)} = T_{0i} \dot{r}_{Q_i}, \quad (13)$$

$$T_{0i} = T_{i0}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i \\ -\sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Перейдем к вычислению расстояний  $k_i$ . Для этого определим формулы для  $(\dot{y}_{Q_i}^{(i)})^2$ , сгруппировав слагаемые при  $k_i^2, k_i, k_i^0$  соответственно и получим формулы для расчета проекций аэродинамических сил на оси  $O_i y_i$ . Представим  $R_{iy}^{(i)}$  следующим образом:

$$R_{iy}^{(i)} = a_{iy} k_i^2 + b_{iy} k_i + c_{iy}. \quad (15)$$

Для этого введем обозначения, записанные ниже.

$$a_{iy} = \frac{C_y \rho S_i^{Oiyi}}{2} \dot{\varphi}_i^2, \quad (16)$$

$$b_{i=1,5y} = \frac{C_y \rho S_i^{Oiyi}}{2} \left[ -2\dot{x}_{C_3} \dot{\varphi}_i \sin \varphi_i + 2\dot{y}_{C_3} \dot{\varphi}_i \cos \varphi_i \mp \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_3 l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_i) \mp 2\dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_{2(4)} l_{2(4)} \cos(\varphi_{2(4)} - \varphi_i) \mp \dot{\varphi}_i^2 l_i \right], \quad (17)$$

$$b_{i=2,4y} = \frac{C_y \rho S_i^{Oiyi}}{2} \left[ -2\dot{x}_{C_3} \dot{\varphi}_i \sin \varphi_i + 2\dot{y}_{C_3} \dot{\varphi}_i \cos \varphi_i \mp \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_3 l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_i) \mp \dot{\varphi}_i^2 l_i \right], \quad (18)$$

$$b_{3y} = -C_y \rho S_3^{O3y3} \dot{\varphi}_3 (\dot{y}_{C_3} \cos \varphi_3 - \dot{x}_{C_3} \sin \varphi_3), \quad (19)$$

$$c_{i=1,5y} = \frac{C_y \rho S_i^{O_{iyi}}}{2} \left[ \dot{y}_{C3}^2 \sin^2 \varphi_i - 2\dot{x}_{C3} \dot{y}_{C3} \sin \varphi_i \cos \varphi_i + \dot{y}_{C3}^2 \cos^2 \varphi_i \pm \right. \\ \pm \dot{x}_{C3} \dot{\varphi}_3 l_3 \sin \varphi_i \cos(\varphi_3 - \varphi_i) \pm 2\dot{x}_{C3} \dot{\varphi}_{i\pm 1} l_{i\pm 1} \sin \varphi_i \cos(\varphi_{i\pm 1} - \varphi_i) \mp \\ \pm \dot{x}_{C3} \dot{\varphi}_i l_i \sin \varphi_i \mp \dot{y}_{C3} \dot{\varphi}_3 l_3 \cos \varphi_i \cos(\varphi_3 - \varphi_i) \mp \\ \mp 2\dot{y}_{C3} \dot{\varphi}_{i\pm 1} l_{i\pm 1} \cos \varphi_i \cos(\varphi_{i\pm 1} - \varphi_i) \mp \dot{y}_{C3} \dot{\varphi}_i l_i \cos \varphi_i + \\ + \dot{\varphi}_3^2 l_3^2 \cos^2(\varphi_3 - \varphi_i) / 4 + \dot{\varphi}_{i\pm 1} \dot{\varphi}_3 l_{i\pm 1} l_3 \cos(\varphi_{i\pm 1} - \varphi_i) \cos(\varphi_3 - \varphi_i) + \\ + \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_3 l_i l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_i) / 2 + \dot{\varphi}_{i\pm 1}^2 l_{i\pm 1}^2 \cos^2(\varphi_{i\pm 1} - \varphi_i) + \\ \left. + \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_{i\pm 1} l_i l_{i\pm 1} \cos(\varphi_{i\pm 1} - \varphi_i) + \dot{\varphi}_i^2 \frac{l_i^2}{4} \right], \quad (20)$$

$$c_{i=2,4y} = \frac{C_y \rho S_i^{O_{iyi}}}{2} \left[ \dot{x}_{C3}^2 \sin^2 \varphi_i - 2\dot{x}_{C3} \dot{y}_{C3} \sin \varphi_i \cos \varphi_i + \right. \\ + \dot{y}_{C3}^2 \cos^2 \varphi_i \pm \dot{x}_{C3} \dot{\varphi}_3 l_3 \sin \varphi_{i+1} \cos(\varphi_3 - \varphi_i) \pm \\ \dot{x}_{C3} \dot{\varphi}_i l_i \sin \varphi_i \mp \dot{y}_{C3} \dot{\varphi}_3 l_3 \cos \varphi_i \cos(\varphi_3 - \varphi_i) \mp \dot{y}_{C3} \dot{\varphi}_i l_i \cos \varphi_i + \\ \left. + \dot{\varphi}_3^2 \frac{l_3^2}{4} \cos^2(\varphi_3 - \varphi_i) + \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_3 l_i l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_i) / 2 + \dot{\varphi}_i^2 \frac{l_i^2}{4} \right], \quad (21)$$

$$c_{3y} = \frac{C_y \rho S_3^{O_{3y3}}}{2} \left[ \dot{x}_{C3}^2 \sin^2 \varphi_3 - 2\dot{x}_{C3} \dot{y}_{C3} \sin \varphi_3 \cos \varphi_3 + \dot{y}_{C3}^2 \cos^2 \varphi_3 \right]. \quad (22)$$

Найдем расстояния  $k_i$ ,  $i = 1-5$ , по формуле

$$k_i = \int_{-li/2}^{li/2} k_i \cdot R_{iy}^{(i)} dk_i \Big/ \int_{-li/2}^{li/2} R_{iy}^{(i)} dk_i = \frac{b_{iy} l_i^2}{a_{iy} l_i^2 + 12c_{iy}}. \quad (23)$$

Таким образом, найдены расположения точек  $Q_i$  для крыльев (звенья  $i = 1, 2, 4, 5$ ).

Аналогичным образом вычислим расстояние  $p_3$ : определим формулу для вычисления  $(\dot{x}_{Q3}^{(3)})^2$ , преобразуем выражение  $(\dot{x}_{Q3}^{(3)})^2$ , сгруппировав слагаемые при  $p_3^2$ ,  $p_3$ ,  $p_3^0$ , подставив выражение  $(\dot{x}_{Q3}^{(3)})^2$ , получим формулу для определения проекции аэродинамической силы на ось  $O_3 x_3$ .

Введем следующие обозначения:

$$a_{3x} = \frac{C_x \rho S_3^{O_{3x3}}}{2} \dot{\varphi}_3^2, \quad (24)$$

$$b_{3x} = -C_x \rho S_3^{O_{3x3}} \dot{\varphi}_3 (\dot{x}_{C3} \cos \varphi_3 + \dot{y}_{C3} \sin \varphi_3), \quad (25)$$

$$c_{3x} = \frac{C_x \rho S_3^{O3x3}}{2} \left[ \dot{x}_{C3}^2 \cos^2 \varphi_3 + 2\dot{x}_{C3}\dot{y}_{C3} \sin \varphi_3 \cos \varphi_3 + \dot{y}_{C3}^2 \sin^2 \varphi_3 \right] \quad (26)$$

и запишем силу  $R_{3x}^{(3)}$  следующим образом:

$$R_{3x}^{(3)} = a_{3x} p_3^2 + b_{3x} p_3 + c_{3x}. \quad (27)$$

Найдем расстояние  $p_3$  по формуле

$$p_3 = \frac{\int_{-h3/2}^{h3/2} p_3 \cdot R_{3x}^{(3)} dp_3}{\int_{-h3/2}^{h3/2} R_{3x}^{(3)} dp_3} = \frac{b_{3x} h_3^2}{a_{3x} h_3^2 + 12c_{3x}}. \quad (28)$$

Для частного случая, когда скорости вращения  $\dot{\varphi}_i \rightarrow 0$ , выражения для положения точки приложения аэродинамической силы будут иметь вид:

$$a_{3x}(\dot{\varphi}_3 \approx 0) = 0, \quad a_{iy}(\dot{\varphi}_i \approx 0) = 0, \quad i = 1, 2, 4, 5, \quad (29)$$

$$b_{3x}(\dot{\varphi}_3 \approx 0) = 0, \quad b_{iy}(\dot{\varphi}_i \approx 0) = 0, \quad i = 1, 2, 4, 5, \quad (30)$$

$$c_{3x}(\dot{\varphi}_3 \approx 0) \neq 0, \quad c_{iy}(\dot{\varphi}_i \approx 0) \neq 0, \quad i = 1, 2, 4, 5, \quad (31)$$

$$p_3 = 0, \quad k_i = 0. \quad (32)$$

Следовательно, можно сделать вывод, что при  $\dot{\varphi}_i \approx 0$  точки приложения аэродинамических сил к звеньям  $i$  будут располагаться в центрах их масс.

#### 4. Математическая модель полета орнитоопера

Система дифференциальных уравнений движения орнитоопера, записанная с использованием уравнения Лагранжа II рода и принципа возможных перемещений, может быть представлена в матричном виде следующим образом:

$$A(q)\ddot{q} + B(q)D(\dot{q})\dot{q} = F. \quad (33)$$

где  $A(q)$ ,  $B(q)$  — матрицы коэффициентов;  $D(\dot{q})$  — диагональная матрица первых производных обобщенных координат  $q$ ;  $F$  — матрица обобщенных сил, имеющие вид

$$A(q) = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ a_{71} & a_{72} & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} \end{pmatrix}, \quad (34)$$

$$B(q) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} \\ 0 & 0 & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} \\ 0 & 0 & 0 & b_{34} & b_{35} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{43} & 0 & b_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{53} & b_{54} & 0 & b_{56} & b_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{65} & 0 & b_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{75} & b_{76} & 0 \end{pmatrix}, \quad (35)$$

$$D(\dot{q}) = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{q}_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{q}_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{q}_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{q}_7 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

$$F = (F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6 \ F_7)^T. \quad (37)$$

## 5. Моделирование вертикального полета орнитоопера

Предложенная в работе расчетная схема орнитоопера такова, что позволяет данному устройству имитировать взмахи крыльев птиц и, соответственно, поведение птиц во время полета. В связи с этим разработаны законы изменения углов звеньев крыльев, при которых поведение аппарата в воздухе аналогично полету чайки [5].

$$\varphi_2(t) = -\varphi_{02} \cos(\omega t) - w_2, \quad (38)$$

$$\varphi_4(t) = \varphi_{04} \cos(\omega t) + w_4, \quad (39)$$

$$\varphi_1(t) = \begin{cases} \varphi_{01} \cos(\omega_1 t) + w_1, & t < T/4, \\ -\varphi_{01} \cos(\omega(t - T/4)) + w_1, & T/4 \leq t < 3T/4, \\ \varphi_{01} + w_1, & 3T/4 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (40)$$

$$\varphi_5(t) = \begin{cases} -\varphi_{05} \cos(\omega_1 t) - w_5, & t < T/4, \\ \varphi_{05} \cos(\omega(t - T/4)) - w_5, & T/4 \leq t < 3T/4, \\ -\varphi_{05} - w_5, & 3T/4 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (41)$$

где  $\varphi_{0i}$  — некоторое значение угла поворота звена, определяющее амплитуду колебаний;  $w_i$  — смещение положения равновесия колебания звена вверх/вниз;  $T$  —

период колебания звена. Причем,  $\varphi_{05}^- = -\varphi_{05} - w_5$ ,  $\varphi_{05}^+ = \varphi_{05} - w_5$ ,  $\varphi_{04}^- = -\varphi_{04} + w_4$ ,  $\varphi_{04}^+ = \varphi_{04} + w_4$ .

Введем следующие обозначения:  $\varphi_{01} = \varphi_{05} = \dot{\varphi}_0$ ,  $\varphi_{02} = \varphi_{04} = \varphi_0$ ,  $w_1 = w_2 = w_4 = w_5 = w$ , причем положим, что  $\omega_1 = 2\omega$ . Введем коэффициент, характеризующий соотношение амплитуд колебаний звеньев 4 и 5 (1 и 2):

$$\lambda = \varphi_{04} / \varphi_{05} = \varphi_0 / \dot{\varphi}_0. \quad (42)$$

### 5.1. Исследование режимов полета

На рис. 3 приведены временные зависимости координаты  $y_{C3}$  центра масс корпуса орнитоопера при разных значениях соотношений смещений  $w_4 = -w_5$ . По графикам видно, что существуют три режима вертикального полета устройства: подъем, зависание на некоторой высоте и снижение. Причем, с ростом  $w_4 = -w_5$  режим снижения меняется на зависание, а затем на подъем, а при отрицательных значениях  $w_4 = -w_5$  по мере их приближения к 0 расстояние, на которое снижается орнитооптер, уменьшается, при положительных значениях  $w_4 = -w_5$  при стремлении их к 0 расстояние, на которое происходит подъем устройства, также убывает.

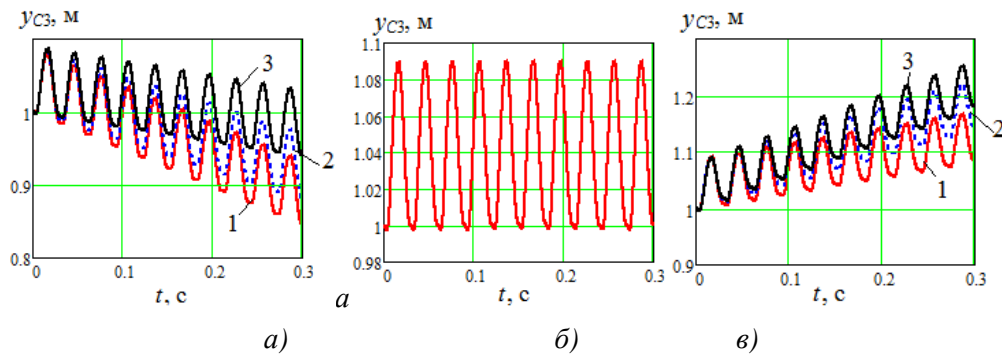


Рисунок 3. Графики зависимостей  $y_{C3}(t)$  при  $T = 0.03$  с,  $\varphi_0 = 0.4$  рад: а — снижение ( $1 - w_4 = -w_5 = -15^\circ$ ,  $2 - w_4 = -w_5 = -10^\circ$ ,  $3 - w_4 = -w_5 = -5^\circ$ ), б — зависание ( $w_4 = -w_5 = -1^\circ$ ), в — подъем ( $1 - w_4 = -w_5 = 5^\circ$ ,  $2 - w_4 = -w_5 = 10^\circ$ ,  $3 - w_4 = -w_5 = 15^\circ$ ).

### 5.2. Определение средней вертикальной скорости орнитоопера

Более удобными для анализа являются зависимости средней вертикальной скорости аппарата от амплитуды взмахов крыльев при различных значениях параметров этих колебаний. Средние скорости движения центра масс корпуса по высоте  $\dot{y}_{sr}$  для раз-

личных режимов движения объекта приведены на рис. 4–6. Средняя скорость вычисляется по формуле

$$\dot{y}_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{j=1-N} \dot{y}_{c3},$$

где  $N$  — число вычислений за период колебания крыльев.

По графикам рис. 4 видно, что с уменьшением частоты  $\omega$  (ростом периода колебаний  $T$ ) значения средних скоростей снижаются, причем на всех кривых наблюдается максимум, который также сглаживается с убыванием  $\omega$ .

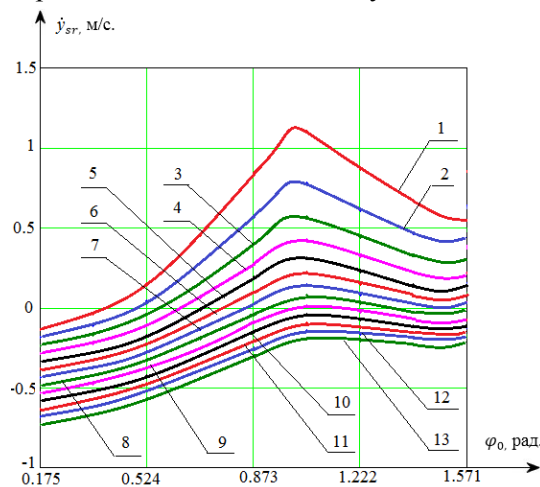


Рисунок 4. Графики зависимостей: 1:  $T = 0.03$  с, 2:  $T = 0.04$  с, 3:  $T = 0.05$  с, 4:  $T = 0.06$  с, 5:  $T = 0.07$  с, 6:  $T = 0.08$  с, 7:  $T = 0.09$  с, 8:  $T = 0.10$  с, 9:  $T = 0.11$  с, 10:  $T = 0.12$  с, 11:  $T = 0.13$  с, 12:  $T = 0.14$  с, 13:  $T = 0.15$  с

При наименьшем угле  $\varphi_0 = 0.175$  рад значения средних скоростей отрицательные, а при наибольшем угле  $\varphi_0 = 1.571$  рад отрицательные при малых частотах колебаний крыльев и положительные при больших  $\omega$ . Это означает, что при больших значениях частот по мере роста амплитуды колебаний крыльев происходит следующая смена режимов движения: снижение, зависание, подъем, а при уменьшении значений частот последовательность смены режимов другая: снижение, зависание, подъем, зависание, снижение, а при самых малых частотах существует только режим снижения.

На рис. 5 представлены результаты исследования влияния соотношения амплитуд колебаний звеньев крыльев на средние значения скоростей вертикального перемещения устройства.

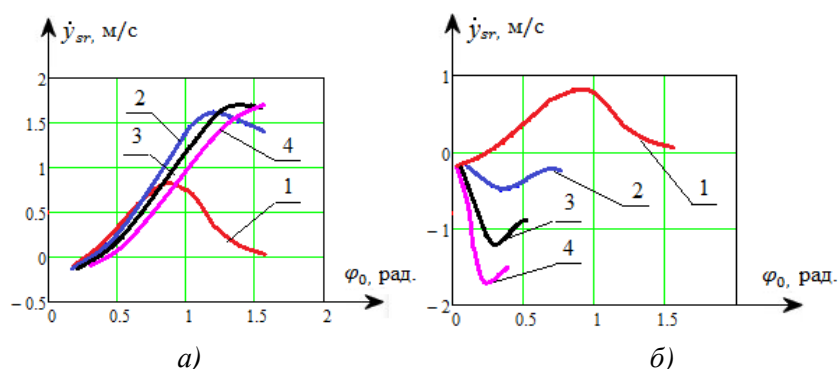


Рисунок 5. Графики зависимостей  $\dot{y}_{sr}(\varphi_0)$  при  $w = 0$  рад,  $T = 0.03$  с: а — 1:  $\lambda = 1$ , 2:  $\lambda = 2$ , 3:  $\lambda = 3$ , 4:  $\lambda = 4$ ; б — 1:  $\lambda = 1$ , 2:  $\lambda = 1/2$ , 3:  $\lambda = 1/3$ , 4:  $\lambda = 1/4$ .

По данным графикам можно выделить три вида кривых. Первый вид справедлив для равенства амплитуд  $\lambda = 1$ , когда при минимальном значении  $\varphi_0$  средняя скорость  $\dot{y}_{sr}$  отрицательна и близка к нулю, затем при увеличении  $\varphi_0$  до значения  $\varphi_0 = 0.785$  рад средняя скорость  $\dot{y}_{sr}$  переходит через ноль и по некоторой кривой достигает своего наибольшего значения, а затем убывает также по криволинейному закону и при  $\varphi_0 = 1.571$  рад приближается к нулевому значению. Второй вид кривых соответствует случаю  $\lambda > 1$ . При этом увеличивается наибольшее значение средней скорости и величина  $\varphi_0$ , соответствующая максимуму, а второй участок кривой, на котором происходит убывание  $\dot{y}_{sr}$ , сокращается и при  $\lambda = 4$  перестает существовать. Третий вид кривых соответствует случаю  $\lambda < 1$ , при этом средние скорости принимают только отрицательные значения. Отметим, что по мере роста  $\varphi_0$  эти значения плавно убывают до минимальных, а потом плавно возрастают, причем с уменьшением  $\lambda$  пик средней скорости наблюдается при меньшем значении угла  $\varphi_0$ , а участок графика, соответствующий возрастанию  $\dot{y}_{sr}$ , сокращается.

На рис. 6 приведены графики средних вертикальных скоростей орнитоопера при различных значениях  $w$ . На графиках можно выделить три участка, которые отличаются для положительных и отрицательных значений  $w$ . В первом случае (для  $w < 0$ ) средняя скорость вначале возрастает почти пропорционально амплитуде колебаний крыльев  $\varphi_0$ , достигает наибольшего значения, затем убывает тоже пропорционально росту  $\varphi_0$ , достигает наименьшего значения и вновь возрастает. Причем по мере увеличения значения  $w$  последний участок графика сокращается, повторное возрастание средней скорости становится менее заметным. Второй вид графиков справедлив для  $w > 0$ , на которых вначале наблюдается незначительное убывание средней вертикальной скорости по мере роста  $\varphi_0$ , причем, чем больше



значение  $w$ , тем более существенно снижение  $\dot{y}_{sr}$ . Затем на графике происходит рост средней скорости пропорционально  $\varphi_0$  до достижения максимального значения, а после этого вновь убывание  $\dot{y}_{sr}$ , величина последнего участка графика и величина, на которую уменьшается средняя вертикальная скорость, убывают по мере увеличения  $w$ . График при  $w = 0$  является переходным между графиками при  $w < 0$  и  $w > 0$ .

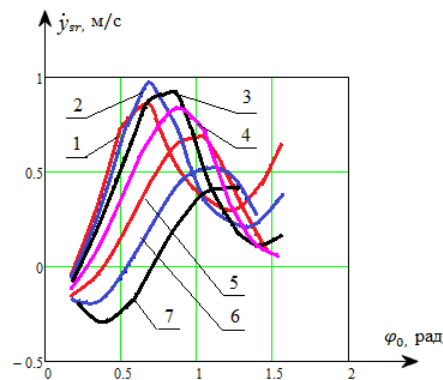


Рисунок 6. Графики зависимостей  $\dot{y}_{sr}(\varphi_0)$  при  $\lambda = 1$ ,  $w = 0$  рад,  $T = 0,03$  с:

- 1:  $w = -15^\circ$ , 2:  $w = -10^\circ$ , 3:  $w = -5^\circ$ , 4:  $w = 0^\circ$ , 5:  $w = 5^\circ$ ,  
6:  $w = 10^\circ$ , 7:  $w = 15^\circ$

## 6. Заключение

В статье представлены результаты исследований вертикального полета пятизвенного робота-орнитоптера с машущими складывающимися крыльями, особенностью которого является то, что движение крыльев в полете имитирует взмахи крыльев чайки. В работе разработана математическая модель плоского полета устройства в вертикальной плоскости, представленная в матричной форме. Детально освещен вопрос аэродинамического взаимодействия звеньев аппарата с воздушной средой, определены положения и скорости точек приложения приведенных аэродинамических сил к каждому из звеньев робота.

На основании математической модели проведено численное моделирование полета робота, по временным зависимостям вертикальной координаты центра масс корпуса установлено наличие трех режимов полета: снижение, зависание и подъем. Причем зависание наблюдается для каждого значения  $\varphi_0$  только при некотором определенном значении  $\omega$ , а подъем и опускание имеют широкий диапазон варьирования двух указанных параметров.

Построены графики зависимостей средних значений вертикальной скорости корпуса устройства от амплитуды колебаний звеньев крыльев, установлено влия-

ние на последовательность смены режимов полета, максимальные и минимальные значения  $\dot{y}_{sr}$  параметров колебаний крыльев: соотношения амплитуд колебаний звеньев 1 и 2 (4 и 5) и смещения  $w$  положения равновесия колебаний звеньев крыльев от нуля.

## Литература

- [1] *DeLaurier J. D.* An ornithopter wing design // *Canadian aeronautics and space journal*. 1994. Vol. 40. No. 1. P. 10–18.
- [2] *Brooks A. N.* Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur // *AIAA*. 1985. P. 85–1446.
- [3] *DeLaurier J. D.* The development of an efficient ornithopter wing // *The aeronautical journal of the royal aeronautical society*. 1993. Vol. 97. P. 153–161.
- [4] *Craparo E., Ingram B. A.* Micro-sized ornithopter wing design // 41st aerospace sciences meeting and exhibit. 2003. P. 1–9.
- [5] *Jatsun S. F., Vorochaeva L. Yu., Efimov S. V.* Study of the motion of a mechanical system due to the oscillatory motion of the side links // *JVE International LTD. Vibroengineering*. 2016. Vol. 8. P. 74–79.
- [6] *Jackowski Z. J.* Design and construction of an autonomous ornithopter : Diss. Massachusetts Institute of Technology. 2009.
- [7] *Maglasang J., Isogai K., Goto N., Yamasaki M.* Aerodynamic Study and Mechanization Concepts for Flapping-Wing Micro Aerial Vehicles // *Memoirs of the Faculty of Engineering*. 2006. Vol. 66. No. 1. P. 71–82.

### **Авторы:**

*Людмила Юрьевна Ворочаева* — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

*Сергей Венегдитович Ефимов* — кандидат технических наук, докторант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

*Оксана Геннадьевна Локтионова* — доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, Юго-Западный государственный университет

*Борис Владимирович Лушников* — кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

*Сергей Федорович Яцун* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

## Modeling the Motion of a Flapping Wing Aerial Vehicle

L. Y. Vorochaeva, S. V. Efimov, O. G. Loktionova, B. V. Lushnikov,  
S. F. Jatsun

Southwest State University

50 let Oktyabrya St., 94, Kursk, Russia, 305040

e-mail: efimov@mail.ru

*Abstract.* The article discusses the vertical flight of a flapping wing aerial vehicle, which is also called an ornithopter. The robot is a chain of five links connected in series by active cylindrical hinges with the central link being the body and the remainder forming folding wings in pairs. The distinctive feature of this device is that the flaps of its wings imitate those of a seagull i.e. the device has a biological prototype. We construct a mathematical model of this device; much attention is given to the model of the interaction of the wings with the air environment and we determine the positions and velocities of points of application of the reduced aerodynamic forces to each of the links. Based on the results of numerical modelling of the vertical flight of the robot three modes of flight were established: ascent, hovering at a certain height and descent. The device can operate in these modes based on the oscillation parameters of the wings in particular flapping frequency and amplitude, the ratio of the amplitudes of two links and one wing and the shift of the equilibrium oscillation position of the wings relative to zero.

*Keywords:* ornithopter, flying apparatus, flapping wing, aerodynamic forces, vertical flight, flight modes.

### Referenses

- [1] DeLaurier J. D. (1994) *Canadian aeronautics and space journal*, **40**(1): 10–18.
- [2] Brooks A. N. (1985) *AIAA*, pp. 85–1446.
- [3] DeLaurier J. D. (1993) *The aeronautical journal of the royal aeronautical society*, pp. 153–161.
- [4] Craparo E., Ingram B. (2003) A micro-sized ornithopter wing design. In 41st aerospace sciences meeting and exhibit, pp. 1–9.
- [5] Jatsun S.F. et al. (2016) *JVE International LTD. Vibroengineering*, **8**:74–79.
- [6] Jackowski Z.J. (2009) Design and construction of an autonomous ornithopter. PhD, MIT
- [7] Maglasang J., Isogai K., Goto N., Yamasaki M. (2006) *Memoirs of the Faculty of Engineering*, **66**(1):71–82.

---

## Материалы тест-объектов для настройки авиационных оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли

Е. Б. Баблюк\*, Ю. М. Берлад\*, А. Г. Летьяго\*\*, А. П. Кондратов\*

\*Московский политехнический университет  
107023, Москва, ул. Б. Семеновская, 38

\*\*Московский научно-исследовательский телевизионный институт  
105094, Москва, ул. Гольяновская, 7а, стр. 1

e-mail: apkrezero@mail.ru

*Аннотация.* Показана возможность изготовления разворачиваемых тестовых объектов для настройки авиационной оптической аппаратуры дистанционного зондирования Земли в виде комплекта фрагментов из атмосфероустойчивых полимерных материалов путем цифровой струйной печати на полотнах двух типов. Основные фрагменты с фиксированной оптической плотностью содержат изображения светлых штрихов на темном фоне. Фоновые фрагменты монохромны. Предложено рациональное сочетание материалов для фрагментов тестовых объектов, произведена оценка их оптических свойств и светостойкости.

*Ключевые слова:* тест-объекты для настройки оптической аппаратуры, оптическая плотность полимерных материалов, баннерные ткани, светостойкость, адгезионная прочность.

### 1. Введение

На смену аналоговым оптико-электронным системам мониторинга земной поверхности (МЗП) приходят цифровые оптико-электронные системы (ОЭС) МЗП. В отличие от пленочных, в цифровых ОЭС в качестве приемника оптического излучения (ПОИ) используются матрицы элементарных светочувствительных элементов со строго упорядоченной регулярной структурой. Используемые в качестве приемника оптического излучения цифровых ОЭС матричные (линейные) фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС) либо комплементарные структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП) имеют определенный физический размер элемента ПОИ. По этой причине для оценки разрешающей способности и настройки цифровых оптико-электронных систем МЗП необходимо создание и использование штриховых тест-объектов с определенной угловой ориентацией полос (штрихов) относительно регулярной структуры приемника оптического излучения.

В качестве основного критерия оценки эффективности ОЭС МЗП используется линейное разрешение бортовой системы на местности  $L_m$ .

Линейное разрешение на местности определяют по формуле

$$L_m = \frac{H}{2Rf},$$

где  $R$  — разрешающая способность системы,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $H$  — высота аэрофотосъемки, м;  $f$  — фокусное расстояние системы, мм.

Разрешающая способность является пространственно-частотной характеристикой фотографической системы и определяется методом визуального дешифрирования после фотографирования тест-объектов. Определение разрешающей способности ОЭС МЗП проводится как в лабораторных, так и в летных условиях при натуральных испытаниях.

В состав комплексов для настройки авиационных оптико-электронных систем, расположенных на аэродромах, входят тест-объекты, содержащие калиброванные фотометрические поля [1]. Пространственное разрешение авиационной аппаратуры оценивается с помощью штриховых тест-объектов. Радиометрические свойства оцениваются по фотометрическим полям. Тестовые объекты бывают двух типов: стационарные, изготавливаемые путем нанесения на бетонное основание краски, в состав которой входят добавки для обеспечения требуемой диффузности поверхности, и разворачиваемые — полотна ткани или другого гибкого материала с нанесенным рисунком.

Тестовые объекты являются весьма материалоемкими и должны обладать стабильными измерительными свойствами на протяжении всего периода эксплуатации к их рациональному конструированию, изготовлению, разворачиванию и поддержанию поверхности в рабочем состоянии, к которой предъявляются повышенные требования [1]. При этом важное значение имеет выбор не только материала тест-объекта, но и технологического процесса печати штрихов и полей яркости, обеспечивающего высокую точность и стабильность изображения на больших площадях запечатываемого материала.

Цель работы — обоснование оптимального устройства, выбора материалов и оценка качества печати штрихов и полей яркости на разворачиваемом тест-объекте для настройки авиационных оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли.

## 2. Объекты и методы исследования

Для исследования оптических свойств отпечатков выбраны баннерные материалы торговой марки BlockOut, ламинированные покрытием из ПВХ (полотно № 1) и баннерные материалы покрытием из ПВХ, полученные по литьевой технологии Blockout S-PRW334240B (полотно № 2).

Измерение спектральных коэффициентов отражения поверхности проводили спектрорадиометром FieldSpec 3. Коэффициенты отражения определяли на чистом баннерном материале до печати и на полях яркости и штриховых элементах с разной интенсивностью тона (30, 55 и 100%).

Перед началом каждого измерения определяли оптические характеристики белого эталона. Высота положения объектива оптоволоконного кабеля спектрорадиометра — 15 см.

Для оценки светостойкости использовали отпечаток на литом баннерном материале Blockout S-PRW334240B (полотно № 2).

Светостойкость оценивали путем измерения оптической плотности запечатанных участков с интенсивностью тона 55 и 100% после экспозиции образцов в устройстве по патенту [6].

### 3. Результаты и обсуждение

Анализ характеристик атмосферостойких запечатываемых материалов, представленных на мировом рынке [5–7], позволяет заключить, что пригодными для изготовления тест-объектов дистанционного зондирования Земли являются баннерные полотна с покрытием из поливинилхлорида. Синтетические баннерные полотна являются слоистыми композиционными материалами и состоят из полиэфирной сетки и монолитного поливинилового покрытия, предназначенного для печати на полиграфическом оборудовании. По технологии производства полотно сетка заливается раствором или пастообразным составом (пластизолом), содержащим поливинилхлорид, а затем пропускается через обогреваемые валы каландра для придания материалу необходимой для печати гладкости поверхности.

Запечатываемый материал для тест-объектов должен обладать светостойкостью, минимальным светопропусканием и равномерными характеристиками отражения ЭМИ в видимом диапазоне спектра до и после печати на нем рисунков (штрихов) различной оптической плотности.

В результате сравнительной оценки показателей физико-механических свойств, объявленных производителями [7], и специфических характеристик качества запечатываемой поверхности для изготовления тестовых объектов и последующих испытаний были выбраны баннерные полотна: BackLit GLK S5251, BlockOut GLK S6151, BlockOut S-PRW334240B, BlockOut GLK S5355M, а также нетканые полотна из синтетических волокон.

Значения спектральных коэффициентов отражения представлены в форме графиков (рис. 1).

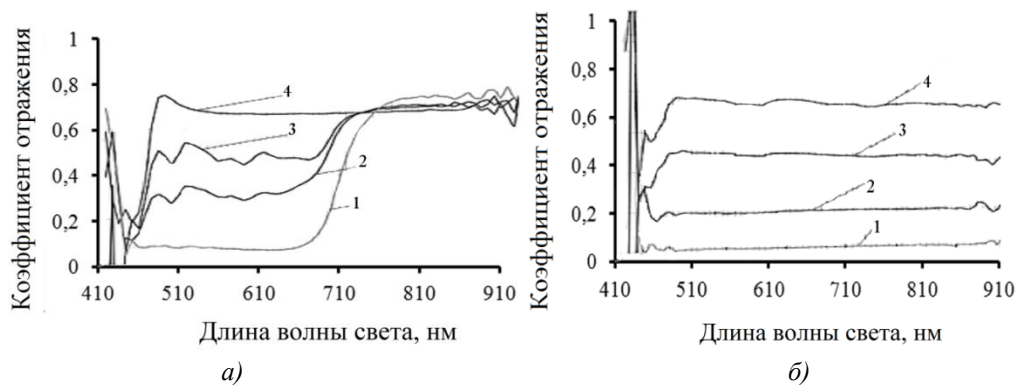


Рисунок 1. Спектр коэффициентов отражения света от отпечатков на образце полотна № 1 (а) и образце полотна № 2 (б) при интенсивности тона: 1 — 100%; 2 — 55%; 3 — 33%; 4 — 1%

Коэффициент отражения света от незапечатанного баннерного материала № 1 (1%) в диапазоне 450–1000 нм имеет постоянное значение. Спектр коэффициентов отражения отпечатков с интенсивностью тона 30 и 55% в диапазоне 400–600 нм нестабилен. Все отпечатки с интенсивностью тона (30, 55 и 100%) полученные на образце баннерного полотна № 2 (рис. 1б), имеют постоянное значение коэффициентов отражения света в диапазоне длин волн 450–1000 нм.

Современные баннерные краски являются УФ-отверждаемыми, т. е. поглощающими свет композициями, резко изменяющими свое агрегатное состояние и физические свойства под действием коротковолнового электромагнитного излучения. Поэтому правомерно предположить, что в процессе производства, сразу после печати и при длительной эксплуатации тестовых объектов, на стабильность оптических свойств, по-видимому, будет оказывать влияние не только ультрафиолетовое излучение, но и дневной солнечный свет.

Установлено, что оптическая плотность отпечатков зависит от вида запечатываемого полотна и заметно изменяется в течение 5 мин (рис. 2). При этом цветовое различие отпечатков, получаемых на баннерной ткани, превышает порог чувствительности глаз человека, т. е. заметно визуально.

Для экспериментальной оценки светостойкости исследовали отпечаток на баннерном материале Blockout S-PRW334240B.

Светостойкость оценивали путем измерения оптической плотности запечатанных участков с интенсивностью тона 55 и 100% после выдерживания образцов в климатической камере, имитирующей ускоренный износ материала солнечными лучами [6].

Результаты тестирования представлены в таблице 1.



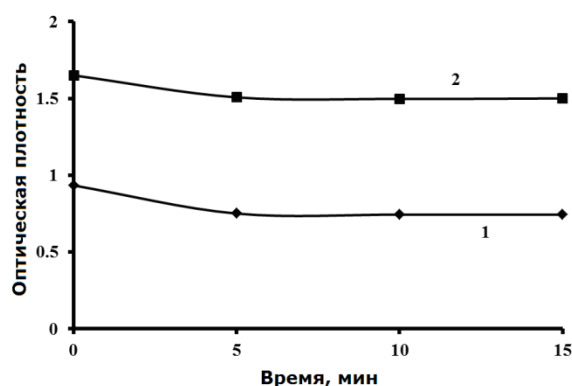


Рисунок 2. Изменение оптической плотности красочного слоя на различных материалах после печати УФ краской: 1 — нетканый материал; 2 — баннерная ткань

Таблица 1 — Значения оптической плотности отпечатков на баннерном материале Blockout S-PRW334240B до и после воздействия УФ-излучения

Оптическая плотность исходных образцов		Оптическая плотность образцов, облученных в течение 96 часов		Оптическая плотность образцов, облученных в течение 180 часов	
55%	100%	55%	100%	55%	100%
0.848	1.226	0.852	1.228	0.846	1.224

Тест-объект по техническому решению [7] состоит из фрагментов с изображением штрихов определенной группы и универсальных фрагментов бокового фона одинаковых геометрических размеров. Фрагменты выполнены из баннерного полотна полиграфическим способом, обеспечивающем точность оптических измерений.

Не менее важной задачей, кроме повышения точности проводимых измерений, является снижение затрат на расходные материалы при изготовлении тест-объектов, уменьшение затрат времени и сил на раскладку модулей, необходимых для проверки конкретных режимов работы бортовой оптико-электронной аппаратуры. Устройство тест-объектов предполагает выкладывание на поверхности Земли оптимального для каждого типа настраиваемых оптико-электронных систем набора модулей, состоящего из одного и более основных фрагментов шириной, кратной трем метрам, с нанесенными на темном фоне светлыми изображениями групп штрихов.

При определении оптимального набора учитывают, что суммарная ширина фрагментов, сформированных в модуль, должна превышать ширину группы штрихов, развернутой относительно длинной стороны модуля под углом 45 или 135°. Количество вспомогательных унифицированных фрагментов бокового фона, кото-

рые примыкают к основным фрагментам, должно обеспечивать не менее, чем двукратное превышение расстояния от изображения штрихов до края модуля.

Вспомогательные фоновые фрагменты, обладающие близкими характеристиками (идентичный спектральный коэффициент отражения) к фону на основных фрагментах со штрихами, могут быть выполнены из нетканого материала меньшей себестоимости, чем баннерное полотно основных фрагментов.

Оценка затрат на изготовление известного [8] и предлагаемого тест-объектов заключается в том, что сравнивают материалоемкость и связанные с этим затраты на изготовление фоновых фрагментов для одного модуля тест-объектов с идентичными штрихами.

В случае изготовления тест-объекта на изготовление фоновых фрагментов потребовалось бы затратить запечатываемого материала трехслойной структуры (включающей армирующую ткань и светостойкое полимерное покрытие) общей площадью 2354 м<sup>2</sup>. При изготовлении фоновых фрагментов одного модуля тест-объекта устройства по [7] используется однослойный нетканый материал без покрытия и расход запечатанного материала на фоновые фрагменты составляет 1325 м<sup>2</sup>. Экономия запечатанного материала достигает 1029 м<sup>2</sup>, что составляет 44% по площади и значительно больше по стоимости.

Печатные свойства материала на фоновых фрагментах существенно отличаются от свойств баннерных полотен с покрытием из поливинилхлорида. Шероховатость полотен с покрытием из поливинилхлорида характеризуется величиной 3–7 мкм. Вследствие высокой прочности поверхности и оптимальной шероховатости баннерных полотен адгезия слоев печатной краски достигает  $70,0 \pm 0,9$  МПа. Адгезионная прочность закрепления слоев печатной краски используемой для печати фона нетканых полотен, составляет лишь  $17,0 \pm 0,8$  МПа. Однако этой величины достаточно для многократного перегибания и сворачивания отпечатков фоновых фрагментов в рулон при их хранении и развертывании на поверхности земли.

#### 4. Вывод

Показана возможность изготовления развертываемых тестовых объектов для настройки авиационной оптической аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Предложено рациональное сочетание запечатываемых материалов для изготовления основных штриховых и однотонных фоновых фрагментов способом цифровой струйной печати на баннерных полотнах с литым покрытием из поливинилхлорида.

## Литература

- [1] *Goryl F., Burini A.* Calibration Test Sites and Cal/Val Portal Renovation. IVOS 21. — University of Lethbridge, Canada, 11/13 August 2009.
- [2] *Киппхан Г.* Энциклопедия по печатным средствам информации. — М. : МГУП, 2003.
- [3] *Шадрина С. А., Чуркин А. В.* Широкоформатные принтеры с УФ-отверждаемыми чернилами // *Полиграфия.* 2014. № 9. С. 17–20.
- [4] *Чуркин А. В.* Цифровая печать. Основные технологии и оборудование // *Материалы всероссийской конференции — Цифровая печать. Вопросы техники и технологии.* — М : Федеральное агентство по печати и массовым коммуникациям, 2014. С. 14–16.
- [5] *Чуркин А. В.* Получение точных колориметрических изображений на цифровых печатных машинах // *Полиграфия.* 2015. № 4. С. 39–40.
- [6] *Кондратов А. П.* Устройство для определения химической стойкости и светопрочности красок оттиска на полимерной упаковке // Патент РФ 153923, МПК G01N 17/02 , 2016.
- [7] *Алтухов Е. В., Баблюк Е. Б. и др.* Мира для настройки и определения параметров оптико-электронных систем // Пат. РФ 153923, МПК G 01M 11/02, 2016.
- [8] *Веселов Ю. Г., Тихонычев В. В., Данилин А. А.* Выбор тест-объекта для оценки разрешающей способности цифровых оптико-электронных систем мониторинга земной поверхности // *Наука и образование.* 2012. Вып. 4.

### **Авторы:**

*Евгений Борисович Баблюк* — доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой инновационных технологий в полиграфическом и упаковочном производстве, Московский политехнический университет

*Юрий Милославович Берлад* — аспирант кафедры инновационных технологий, Московский политехнический университет

*Александр Григорьевич Летяго* — доктор технических наук, профессор; Московский научно-исследовательский телевизионный институт

*Александр Петрович Кондратов* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет

## Materials for Configure Aviation Optoelectronic Earth Remote Sensing Systems

*E. B. Bablyuk<sup>\*</sup>, Yu. M. Berlad<sup>\*</sup>, A. G. Letyago<sup>\*\*</sup>, A.P. Kondratov<sup>\*</sup>*

*<sup>\*</sup>Moscow Polytechnic University  
107023 Moscow, Russia*

*<sup>\*\*</sup>Moscow Scientific-Research Television Institute  
105094 Moscow, Russia*

*e-mail: e-mail: apkrezero@mail.ru*

*Аннотация.* The paper illustrates the possibility of manufacturing deployable test objects to configure aviation optical equipment for remote sensing of the Earth in the form of a set of fragments made of weatherproof polymeric materials using the method of digital inkjet printing of two types of prints. The main fragments with a fixed optical density include images of light bars against a dark background. Background fragments are monochrome. We have suggested a reasonable combination of materials for test objects fragments, and assessed their optical parameters and lightfastness.

*Ключевые слова:* test objects for configuring optical devices, the optical density of the polymer materials, banner cloth, light resistance, adhesive strength.

### References

- [1] *Goryl F., Burini A. (2009) Calibration Test Sites and Cal/Val Portal Renovation. IVOS 21. University of Lethbridge, Canada*
- [2] *Kipphan H. (2003) Handbuch der Printmedien*
- [3] *Shadrina S. A., Churkin A. V. (2014) Poligrafija, 9:17–20 [In Rus]*
- [4] *Churkin A. V. (2014) Cifrovaja pechat'. Osnovnye tehnologii i oborudovanie. In Proc. conf. Cifrovaja pechat. Voprosy tehniki i tehnologii. Moscow, pp. 14–16 [In Rus]*
- [5] *Churkin A. V. (2015) Poligrafija, 4:39–40 [In Rus]*
- [6] *Kondratov A. P. (2016) Patent RF 153923, MPK G01N 17/02*
- [7] *Altuhov E. V., Babljuk E. B. et al. (2016) Pat. RF 153923, MPK G 01M 11/02*
- [8] *Veselov Y. G., Tihonychev V. V., Danilin A. A. (2014) Nauka i obrazovanie, 4 [In Rus]*

## Неразрушающая оценка параметров рельефной маркировки термоусадочных монтажных изделий для авиационной техники

*А. П. Кондратов<sup>\*</sup>, М. В. Коновалова<sup>\*</sup>, Е. П. Черкасов<sup>\*</sup>,  
И. А. Савенкова<sup>\*\*</sup>*

*<sup>\*</sup>Московский политехнический университет  
107023, Москва, ул. Б. Семеновская, 38*

*<sup>\*\*</sup>Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики  
101000, Москва, ул. Мясницкая, 20*

*e-mail: [apkrezero@mail.ru](mailto:apkrezero@mail.ru)*

*Аннотация.* Предложен новый способ рельефной маркировки термоусадочных трубок и муфт из полимерных материалов с «памятью формы». Приведены методика и результаты инструментальной оценки стереометрии рельефной маркировки монтажных деталей для авиационной техники из поливинилхлорида, полиэтилентерефталата и полистирола. Параметры точечной рельефной маркировки и соответствие формы точек стандарту шрифта Брайля определены неразрушающим методом по цвету интерференционной картины с точностью 0,02 мм.

*Ключевые слова:* авиационные материалы, рельеф, стереометрия, микроскопия, тактильная маркировка, монтаж коммуникаций, термоусадочные трубки.

### 1. Введение

В новых образцах сложной техники [1], в авиационной промышленности и авиаремонтных работах [2, 3] используют полимерные термоусадочные трубки и муфты с «памятью формы» для обеспечения дополнительной механической защиты, герметизации и электроизоляции контактов, сложных соединений электрических проводов и т. п.

Для контроля технического состояния различных авиационных агрегатов и определения принадлежности коммуникаций применяют различные виды маркировки. Как правило, для идентификации используют разноцветные изолирующие оболочки кабеля, бирки и флажки. В бортовой электрической сети летательных аппаратов маркировке подлежат все провода, жгуты и кабели [4]. Принадлежность проводов к различным системам и фидерам определяется не только цветом изоляции провода и маркировкой, представляющей собой буквенно-цифровой индекс, нанесенный на полимерную изоляцию провода или на его маркировочную бирку. В условиях отсутствия прямого доступа, недостаточной видимости или плохой освещенности

ценности места расположения коммуникаций целесообразно применение тактильной маркировки.

Для облегчения однозначного прочтения нанесенной на изоляционную оболочку или муфту информации, выполненную, например, шрифтом Брайля, тактильные символы должны иметь определенный вид, определенное расположение на плоскости и соответствовать строго регламентированным параметрам стереометрии [5].

Разработанная нами технология нанесения тактильных меток на изделия из термоусадочных полимерных материалов [6, 7] позволяет записывать информацию на мягких и гибких пленочных полимерных материалах с соблюдением допустимых размеров символов шрифта Брайля.

Для определения оптимального режима и контроля процесса маркировки изделий (этикеток, упаковки, муфт и трубок) из полимерных материалов необходима инструментальная количественная оценка стереометрии рельефа микроскопического размера.

Существует несколько способов исследования объемных прозрачных, бесцветных микрообъектов, которые используются в медицине, криминалистике, материаловедении [8, 9].

В предшествующих экспериментальных работах [10, 11] измерение параметров тактильного рельефа производилось следующим образом. Образец эластичного маркированного изделия охлаждали до температуры ниже температуры стеклования полимера для увеличения жесткости и рассекали лезвием вдоль гребней рельефа. Затем оценивали полученное сечение, фотографировали и измеряли размеры изображения с помощью измерительно-калибровочных функций оптического цифрового USB-микроскопа. При этом на этапе рассечения образца неизбежна деформация рельефа маркировки, следствием которой является погрешность величиной + 0,3 мкм.

*Цель исследования* — разработка высокоточной инструментальной методики бесконтактной оценки стереометрии рельефной маркировки гибких и эластичных полимерных деталей с «памятью формы», применяемых при монтаже и ремонте коммуникаций авиационных агрегатов.

## 2. Объекты и методы исследования

Исследованы термоусадочные трубки и пленки промышленного производства из поливинилхлорида, полиэтилентерефталата и полистирола толщиной 50 мкм. Производители термоусадочных материалов Dongil Chemical и Alfaterm. Коэффициент максимальной усадки при  $90 \pm 5$  °С около 70%. На образцы пленок нанесены тактильные точечные и линейные знаки. Точечную маркировку осуществляли с ис-

пользованием паяльной станции, обеспечивающей термостатирование при  $100 \pm 1$  °С цилиндрического стержня с плоским основанием диаметром 1,0 и 3,0 мм. Линейную маркировку производили с помощью импульсного нагревателя локальной термообработкой [12]. «Проявление» рельефа осуществляли усадкой на фиксирующей подложке (оправке), имитирующей изолируемую коммуникацию авиационного агрегата, путем нагрева горячим воздушным потоком или в воде (85–95 °С) по методике [10].

### 3. Результаты и обсуждение

Алгоритм нового способа рельефной маркировки термоусадочных деталей из термопластичных полимеров включает следующие операции.

Локальную термообработку образцов (термоусадочной трубки или пленки) проводили в изометрических условиях, аппликацию образца на жесткое основание (коммуникации, контакты проводов) и термоусадку в горячем теплоносителе (воздух, вода). Локальную термообработку изделия с «памятью формы» в изометрических условиях. При локальной термообработке малого участка изделия изометрический режим обеспечивается жесткостью полимерного материала, окружающего места локального нагревания полимера. Вследствие жесткости стеклообразного полимера усадка термообработанной части не реализуется, а имеет место локальная релаксация внутренних напряжений. Результатом релаксации внутренних напряжений является стабилизация геометрических размеров зоны локальной термообработки, т. е. утрата способности к термоусадке.

При нагревании изделия после локальной термообработки путем погружения в горячий теплоноситель его поверхность резко сокращается. Зоны локальной термообработки не изменяют площади термостабилизированной поверхности и выдавливаются наружу. Образуется рельеф, несущий визуальную и тактильную информацию. Рельеф может иметь форму отрезков прямой линии или геометрических фигур и форму точек со стереометрией шрифта Брайля. Главными факторами, определяющими форму и габариты рельефа, являются усадочные свойства полимера (коэффициент термоусадки), размеры зоны локальной термообработки (диаметр основания точки или ширина линий) и соотношение размеров термоусадочной трубки (муфты) и размеров коммуникации, на которые наносится оболочка или муфта.

Виды рельефной маркировки на термоусадочных трубках, применяемых в электрических и электронных элементах коммуникаций авиационных агрегатов, показаны в виде схемы на рис. 1 и 2.

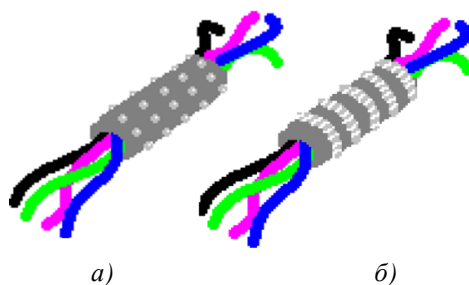


Рисунок 1. Вид участков тактильной маркировки изделий с «памятью формы»  
из термоусадочных трубок многожильного кабеля:  
а) точечная маркировка; б) линейная маркировка

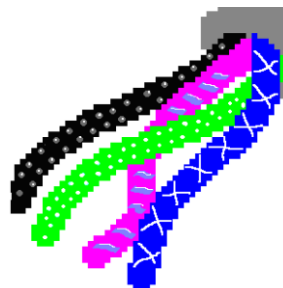


Рисунок 2. Вид участков тактильной маркировки отдельных проводов  
из термоусадочных трубок

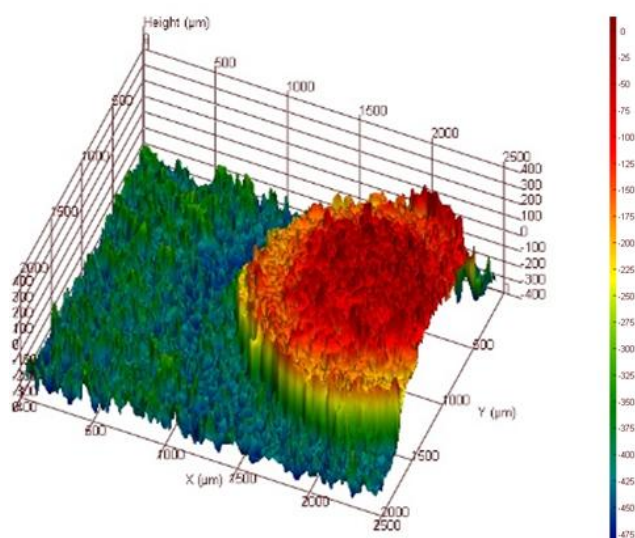
Для инструментальной оценки стереометрии поверхности монтажных деталей авиационной техники, выполненных из прозрачных полимерных материалов, применяли бесконтактное построение 3D-моделей рельефа исследуемого образца. Для этого использовали лабораторный прямой микроскоп отраженного света Carl Zeiss Axio Lab.A1, оснащенный измерительной приставкой PhaseView. Определение расстояния до фрагмента поверхности производили путем анализа интерференционной картины, формируемой внутри измерительной приставки. Приставка содержит калиброванный источник излучения, что позволяет с использованием результатов предварительного измерения расстояния до исследуемого образца по положению максимумов и минимумов интерференционной картины рассчитывать точные размеры рельефа. Для предварительного измерения расстояния используются данные о геометрии оптического тракта, содержащегося в калибровочных файлах, используемого программного обеспечения.

Для оптического исследования необходимо покрыть поверхность образца полимерной трубкой или пленки пигментом или раствором красителя темного цвета, т. к. на проекции прозрачных объектов появляются искажения — шумы. Окраши-

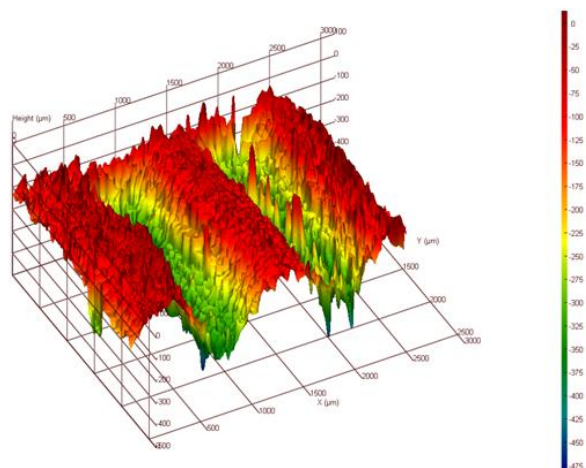


вание поверхностей исследуемых образцов производили чернилами, содержащими этанол.

Построение 3D-модели обеспечивается программным обеспечением GetPhase. Наиболее информативно рельеф поверхности образцов выглядит в изометрии (рис. 3). Высота характерных точек рельефа поверхности определяется по цветовой градационной шкале (показана справа на рис. 3а, 3б).



а)



б)

Рисунок 3. 3D-модель фрагментов различной тактильной маркировки полимерных пленок: а — точечная маркировка; б — линейная маркировка

Количественные характеристики рельефа, полученные при измерении элементов тактильной маркировки разных видов, приведены в табл. 1 и 2. Геометрия мар-

кировки [13] не очень разнообразна, она может быть либо точечной, либо линейной, но габариты маркировки могут изменяться в зависимости от площади обрабатываемой поверхности полимера.

В табл. 1 представлены данные габаритных размеров точечной маркировки на разных по химическому составу, но одинаковых по толщине полимерах. Из таблицы видно, чем больше диаметр нагревательного элемента, тем выше рельефная точка. В табл. 2 представлены результаты измерения амплитуды и периода тактильной маркировки.

Таблица 1 — Параметры точечной маркировки образцов термоусадочных полимерных материалов

Полимерный материал	Высота точки, мкм	
	диаметр нагревательного элемента — 3,0 мм	диаметр нагревательного элемента — 1,0 мм
Поливинилхлорид	442	370
Полистирол	563	243
Полиэтилен-терефталат	667	30

Таблица 2 — Параметры линейной маркировки пленки толщиной 50 мкм

Полимерный материал	Параметры	
	Амплитуда, мкм	Период, мкм
Поливинилхлорид	264	1180
Полистирол	462	1660
Полиэтилентерефталат	512	1720

Вследствие того, что полиэтилентерефталат обладает большей жесткостью, сформировавшийся рельеф и точечной, и линейной маркировки на этих образцах пленки довольно высок по сравнению с рельефом на других пленках — участниках эксперимента.

#### 4. Заключение

Наличие рельефных знаков на термоусадочных трубках заметно облегчит быстрое распознавание и идентификацию коммуникаций и соединений, так как идентификация кабельной продукции по цветовому различию или путем чтения слов, цифр на бирках и флажках в условиях плохой видимости и ограниченной доступности к агрегатам авиационной техники нередко затруднительна.

Предложенная инструментальная методика бесконтактной оценки стереометрии рельефной маркировки гибких и эластичных полимеров позволяет производить более точное нанесение и измерение параметров поверхности термоусадочных деталей, не нарушая их целостности, с малой погрешностью.

## Литература

- [1] *Канискин В. А., Таджибаев А. И.* Эксплуатация силовых электрических кабелей : учеб. пособие. Часть 1. — СПб. : ПЭИПК, 2001.
- [2] *Илюшин Н. М.* Методические рекомендации по эксплуатации и войсковому ремонту бортовых электрических сетей летательных аппаратов. — Люберцы : 13 ГНИИ Минобороны России, 1985.
- [3] Самолет Ил-76 / Руководство по ремонту боевых повреждений / Раздел Бортовая электрическая сеть. Часть 1, книга 6. — М. : ООО «Авиа-Медиа», 2004–2007.
- [4] *Бранзбург Е. З. и др.* Кабели с пластмассовой изоляцией и муфты для их монтажа. — М. : Энергоатомиздат, 1987.
- [5] Marburg Medium spacing convention for braille. Сайт компании Deutsche Blindenstudienanstalt e.V Braille-Druckerei Postbox 11 60 35001 Marburg [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.blista.de/download/druckerei/braille-dimensions> свободный.
- [6] *Коновалова М. В., Кондратов А. П.* Скрытая тактильная метка // Патент РФ 150223 22.09.2014, опублик. 10.02.2015, Бюл. № 4.
- [7] *Кондратов А. П.* Градиентные и интервальные термоусаживающиеся материалы для защиты полиграфической продукции от фальсификации // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела.* 2010. № 4. С. 57–65.
- [8] Методы исследования в гистологии, цитологии и эмбриологии. Сайт компании «Изучение медицины» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://profmed.blogspot.ru/2013/04/blog-post\\_28.html](http://profmed.blogspot.ru/2013/04/blog-post_28.html). свободный. Дата обращения 03.03.2016.
- [9] *Константинов В. Б., Бабенко В. А.* Голографический интерференционный микроскоп для исследования микрообъектов // *Журнал технической физики.* 2007. Т. 77. № 12. С. 92–95.
- [10] *Коновалова М. В., Кондратов А. П.* Маркировка этикеток и групповой упаковки из термоусадочной поливинилхлоридной пленки шрифтом Брайля // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела.* 2015. № 3. С. 53–59.
- [11] *Kondratov A. P.* Thermo shrinking films with interval macrostructure for protection of packaging from falsification // *Modern Applied Science.* 2015. Vol. 8. № 6. P. 204–209.
- [12] *Konovalova M. V., Kondratov A. P., Nazarov V. G., Benda A. F.* Relaxation processes in the interval shrinkable polyvinylchloride films with tactile marking of shrinkable labels // 46th Annual International Conference on Graphic Arts and Media Technology Management and Education 25–29 May 2014. — Athens and Corinthia, Greece, 2014. P. 251.
- [13] *Черкасов Е. П., Кондратов А. П.* Модернизация штампа для локальной термостабилизации пленки с эффектом «памяти формы» // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела.* 2015. № 1. С. 43–47.

*А. П. Кондратов,  
М. В. Коновалова,  
Е. П. Черкасов,  
И. А. Савенкова*

*Неразрушающая оценка параметров рельефной  
маркировки термоусадочных монтажных  
изделий для авиационной техники*

***Авторы:***

*Александр Петрович Кондратов* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет

*Мария Васильевна Коновалова* — аспирант кафедры инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет

*Егор Павлович Черкасов* — аспирант кафедры инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет

*Ирина Александровна Савенкова* — преподаватель Департамента иностранных языков, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

## Assessment of Non-destructive of Relief Marking Parameters of Heat Shrinkable Equipment for Aviation Technics

*A. P. Kondratov*<sup>\*</sup>, *M. V. Konovalova*<sup>\*</sup>, *E. P. Cherkasov*,  
*I. A. Savenkova*<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>*Moscow Polytechnic University*  
*107023 Moscow, Russia*

<sup>\*\*</sup>*National Research University Higher School of Economics*  
*101000 Moscow, Russia*

*e-mail: apkrezero@mail.ru*

*Abstract.* The article explains a new method of relief marking of heat-shrinkable tubing and sleeves made of polymer materials with “shape memory effect.” Method of instrument evaluation of relief marking stereometry of installation parts for aviation equipment, made of polyvinyl chloride, polyethyleneterephthalate and polystyrene was developed and the results were explained. Parameters of pin-point relief marking and compliance of point forms to the Braille font standard were determined with the use of the non-destructive method based on the color of interference pattern with precision of 0.02 mm.

*Key words:* stereometry, microscopy, tactile marking, heat shrinkable polymeric materials.

### References

- [1] *Kaniskin, V. A., Tadzhibaev A. I.* (2001) Jekspluatacija silovyh jelektricheskikh kabelej. Part 1. Saint-Petesburg [In Rus]
- [2] *Ilushin N. M.* (1985) Metodicheskie rekomendacii po jekspluatacii i vojskovomu remontu bortovyh jelektricheskikh setej letatel'nyh apparatov. Moscow [In Rus]
- [3] *Samolet Il-76 Rukovodstvo po remontu boevyh povrezhdenij. Razdel Bortovaja jelektricheskaja set. Part 6.* Moscow 2004–2007 [In Rus]
- [4] *Branzburg, E. Z. et al.* (1987) Kabeli s plastmassovoj izoljaciej i mufty dlja ih montazha. Moscow, Energoatomizdat [In Rus]
- [5] Rezhim dostupa: <http://www.blista.de/download/druckerei/braille-dimensions-svobodnyj>.
- [6] *Konovalova M. V., Kondratov A. P.* (2015) Patent RF 150223 22.09.2014
- [7] *Kondratov A. P.* (2010) *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela*, 4:57–65.
- [8] [http://profmed.blogspot.ru/2013/04/blog-post\\_28.html](http://profmed.blogspot.ru/2013/04/blog-post_28.html). svobodnyj. Data obrashhenija 03.03.2016 [In Rus]

- [9] *Konstantinov V. B., Babenko V. A. (2007) Zhurnal tehniceskoy fiziki, 77(12):92–95 [In Rus]*
- [10] *Konovalova M. V., Kondratov A. P. (2015) Izvestija vysshih ucheb-nyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela, 3:53–59 [In Rus]*
- [11] *Kondratov A. P. (2015) Modern Applied Science, 8(6):204–209*
- [12] *Konovalova M. V., Kondratov A. P., Nazarov V. G., Benda A. F. (2014) Relaxation processes in the interval shrinkable polyvinylchloride films with tactile marking of shrinkable labels. In Proc. 46th Annual International Conference on Graphic Arts and Media Technology Management and Education 25–29 May 2014. Athens and Corinthia, Greece, p. 251*
- [13] *Cherkasov, E. P., Kondratov A. P. (2015) Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela, 1:43–47. [In Rus]*

## Механизм оценки технологических проектов с венчурной составляющей

*А. С. Семенов*

*Московский технологический институт  
119334, Москва, Ленинский пр-т, 38А*

*Российский университет дружбы народов  
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

*e-mail: semenov.venture@mail.ru*

*Аннотация.* В статье рассматриваются методы оценки венчурных проектов, используемые в современной рыночной практике. Рассмотрены метод сопоставимых оценок, доходный метод, венчурный метод. Их комбинация может использоваться для принятия решения об инвестировании в проект.

*Ключевые слова:* венчурные сделки, ИТ-рынок, оценка компаний.

### 1. Введение

Исходя из рыночной логики частного инвестора и критериев, применяемых на международных рынках венчурного капитала именно для этого случая, оценка отражает логику взаимодействия «предприниматель-инвестор».

Оценка венчурного проекта и определение доли инвестора в компании по праву считается одним из наиболее тонких мест процесса due-diligence. Это неудивительно: именно на данном этапе выходит наружу потенциальный конфликт между менеджментом компании и венчурным инвестором относительно объемов инвестиций и передаваемой доли — целью основателей компании является получение больших объемов инвестиций при меньшем размере передаваемых акций, тогда как цели венчурного капиталиста прямо противоположны.

Иногда основатели компании и инвестор сразу достигают консенсуса относительно доли каждой стороны. Такие решения определяются желаемым «балансом сил», на который согласны обе стороны. Например, предприниматель оставляет за собой контроль, а инвестор берет крупный блокирующий пакет порядка 30–40%. Однако подобные ситуации на практике достаточно редки, и определение долей основывается на долгих переговорах между сторонами, главный предмет которых — определение стоимости компании перед и после инвестиций и стоимости вклада каждой из сторон.

По мнению практиков, именно на стадии оценки венчурного проекта возникает большинство разногласий инвесторов и менеджмента компании, и на этом этапе

срывается до 40% сделок. Признаком достижения этого консенсуса считается расхождение во взглядах на стоимость компании не более чем на 20%.

На практике главная задача анализа стоимости компании — достижение компромисса между сторонами. Технически данный процесс осуществляется через всестороннее изучение параметров (настоящих и прогнозных) оцениваемого проекта, чаще всего — его финансовых потоков и последующих споров относительно их значений. В ходе оценки компании обе стороны получают возможность по-новому и непредвзято взглянуть на бизнес в целом, прояснить его неясные детали, проанализировать основные источники доходов и расходов компании, подкорректировать бизнес-план.

В индустрии прямых и венчурных инвестиций процедура оценки имеет разный акцент в зависимости от стадии проекта. Для поздних стадий — расширения и мезонинной фазы — особый вес имеет текущее финансовое положение компании. Для крупных российских фондов private equity, ориентированных на поздние стадии, обороты и прибыльность компании — кандидата на инвестиции является важнейшим параметром принятия решения. Оценка компаний ранних стадий, претендующих на венчурные инвестиции, опирается на прогнозные значения денежных потоков в среднесрочном периоде и ожидаемую «терминальную» стоимость на выходе.

Несмотря на различия в зависимости от стадий развития, в индустрии прямых и венчурных инвестиций был выработан ряд подходов, модификации которых пригодны к проектам любых стадий. Эти методы отличаются от традиционных подходов, поскольку у компаний-реципиентов отсутствуют рыночные котировки акций или долей, что делают стандартную теорию (например, CAPM) малоприменимой.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие пять методов оценки венчурных проектов:

- метод сопоставимых оценок;
- метод дисконтированного денежного потока;
- венчурный метод.

Автор предлагает соединить все эти методы в рамках единой работающей методики (что неоднократно реализовывалось им на практике).

Во всех вышеприведенных методах следует различать оценку компании pre-money (до получения инвестиций) и post-money (после получения инвестиций).

В оценочной практике очень хорошим признаком является примерное совпадение оценок компаний по нескольким методам (расхождение меньше 20%). Этот взгляд выглядит обоснованным. Действительно, в основе всех методов лежат прогнозы параметров развития компании со стороны инвестора или ее основателей. Совпадение значений стоимости компании, определенных различными методами,



говорит о том, что прогнозные значения хорошо согласованы друг с другом и основаны на реалистическом представлении о состоянии и развитии компании. Как правило, в течение временного промежутка, когда фонд держит акции проинвестированной компании, ее стоимость возрастает во много раз и имущество венчурного фонда требует достаточно частой переоценки. Чаще всего венчурные инвесторы меняют стоимость проинвестированных компаний непосредственно после наступления моментов роста ее цены — окончания НИОКР, изготовление опытного образца, запуска производства, завершение запланированных этапов.

Таблица 1. Методы оценки компаний в венчурном бизнесе.

Метод	Описание
<i>Договорный</i>	Стоимость компании определяется на базе субъективных мнений ее основателей и инвестора
<i>Метод сопоставимых оценок</i>	Используются коэффициенты отношения стоимости к операционным показателям для компаний, аналогичных оцениваемой по отрасли, уровню риска, размерам, темпам роста
<i>Метод дисконтируемого денежного потока (DCF)</i>	Будущие чистые денежные потоки за прогнозный период (5–10 лет) дисконтируются по формуле сложных процентов. Используется коэффициент дисконтирования, равный средневзвешенной стоимости капитала для компании. Дисконтированная стоимость на «выходе» (терминальная) также учитывается в качестве слагаемого
<i>Венчурный метод</i>	Прогнозируется продажная стоимость компании на «выходе». Данная стоимость дисконтируется по специальной («венчурной») ставке 40–75% годовых для определения текущей стоимости

Иногда инвестиционный комитет венчурного фонда вводит процедуру регулярной формальной оценки портфеля фонда, например раз в квартал. По ее результатам актив компании признается благополучным или же подлежит списанию. Если компания в течение 1–2 лет не добивается ожидаемых результатов, или на нее проблематично найти покупателя на «выходе», по цене, устраивающей фонд, происходит формальное списание цены акций на четверть, половину или даже до 0. Это не означает, что компанию вообще не удастся продать через несколько лет — полное списание самого проекта происходит лишь после фактического разорения предприятия.

## 2. Метод сопоставимых оценок

Метод базируется на вычислении стоимости компании на основе текущих или прогнозных значений ее операционных показателей с использованием коэффициентов отношения стоимости к тем же показателям, посчитанных на основании данных по рынку. Подобные коэффициенты называются множителями или рыночными мультипликаторами. Оценка компании исходя из ее текущих показателей — это *pre-money* оценка, тогда как оценка на основе прогнозируемых значений с учетом полученных инвестиций — это оценка *post-money*.

Простейшей и тем не менее широко используемой версией метода сопоставимых оценок является использование общих для рынка множителей, которые могут дать первое, очень приблизительное представление о порядке величины стоимости компании в зависимости от оборотов и прибыли. Данные «коэффициенты» меняются со временем, и в настоящее время венчурные инвесторы применяют следующие формулы:

$$Value = Turnover/2,$$

или

$$Value = EBIT \times 5,$$

где *Value* — стоимость компании; *Turnover* — ее оборот; *EBIT* — ее прибыль до выплаты процентов и налогов. Если в качестве значений *Turnover* и *EBIT* берутся текущие показатели, то это *pre-money* оценка. Если же берутся прогнозные значения через несколько лет с учетом полученных инвестиций, то это — *post-money* оценка. В случае ранних стадий развития (*seed*, *start-up*) в качестве значений оборота и прибыли имеет смысл брать только прогнозные значения через несколько лет.

Обычно инвестор оценивает таким образом лишь порядок величины стоимости компании и на его основании принимает решение о том, стоит ли оценивать компанию дальше, при помощи более трудоемких и аккуратных методов. Значительно более обоснованной и объективной версией подхода с использованием множителей является выбор рыночного мультипликатора посредством анализа компаний, аналогичных оцениваемой по:

- отрасли;
- размерам;
- темпам роста;
- уровню рисков.

Метод оценки состоит из следующей последовательности операций.

1. Выбирается группа компаний, на основании данных которых будет считаться оценочный коэффициент.
2. Выбирается базовый операционный параметр.

3. Вычисляются отношения стоимости к базовому параметру для каждой компании из группы (предполагается, что значения базового параметра и стоимости компании известны для каждого члена группы).

4. Оценочный множитель получается с использованием усреднения полученных отношений (возможно, с весовыми коэффициентами).

Основную сложность метода представляет поиск необходимых данных. Наиболее легка данная задача для зрелых компаний, имеющих устойчивую прибыльность, поскольку компании-аналоги торгуются на фондовом рынке и информация по их операционным параметрам и капитализации является общедоступной. Для неторгуемых компаний ранних стадий задача поиска аналогов весьма сложна. Опытные венчурные инвесторы и фонды поздних стадий часто используют данные из своей практики или из практики коллег. В последнем случае используемые выборки состоят из нескольких (2–5) компаний.

*В рамках метода сопоставимых оценок следует учитывать структуру капитала компании и наличие долгов. Наличие долга влечет за собой два эффекта:*

- выплата процентов занижает показатели операционной прибыли компании, от которой зависит терминальная стоимость компании;
- выплата процентов снижает размер налоговых выплат компании («долговой щит»).

*Поэтому при оценке компании нужно понять, какой эффект доминирует и использовать соответствующие показатели, например значение прибыли до выплаты, процентов и налогов (ЕБИТ). В любом случае к процессу оценки нужно привлечь специалиста по бухгалтерскому учету.*

Для российских компаний стадий early stage и expansion Российская Ассоциация Прямое и Венчурное Инвестирование (РАВИ) предлагает вариант метода сопоставимых оценок, согласно которому

$$Value_{pre-money} = K \cdot Sales,$$

где *Sales* — текущий объем продаж компании; *K* — коэффициент рыночной оценки, основанный на данных 2003–2006 гг. по российской отрасли private equity. Значения *K* в зависимости от роста рынка, роста продаж и рентабельности бизнеса приводятся в табл. 2.

Метод сопоставимых оценок получил очень широкое распространение в силу своей понятности, относительной простоты и ориентированности на рынок капитала. Основными «узкими местами» данного метода являются:

- недоступность и неполнота информации по сопоставимым компаниям (особенно непубличным);
- широкий разброс коэффициентов для сопоставимых компаний;

- необходимость поправки стоимости, рассчитанной с использованием коэффициентов торгуемых на бирже компаний, на более высокие, «венчурные», риски.

Таблица 2. Коэффициенты рыночной оценки компаний в венчурном бизнесе

Источник: Российская Ассоциация Венчурного Инвестирования [1–3]

Рост рынка, % в год	Рост продаж, % в год	Рентабельность бизнеса, %	К
10	10	10	1
30	40	20	4
50	70	30	7
70	100	40	10

Это приводит к тому, что в случае возникновения спора каждая сторона может найти массив информации, который будет невыгодным для другой стороны и подтвердит, что цена компании — либо выше, либо ниже приведенной оценки. В силу этой причины, результат данного метода обычно также не выступает в качестве окончательного результата и используется, скорее, как весомый аргумент в пользу той или иной оценки, полученной другим методом.

Красивым примером применения метода сопоставимых оценок в случае технологической компании на стадии подготовки к «выходу» является оценка компании РБК, проведенная ИГ «Атон» перед IPO в 2002 г.

Таблица 3. Финансовые и операционные показатели компаний сектора информационных технологий (млн. долл. США)

Компания	Тикер	Страна	Выручка			ЕВИТДА			Рентабельность ЕВИТДА		Чистая рентабельность	
			2001	2002П	Изм.	2001	2002П	Изм.	2001	2002 П	2001	2002 П
Апох Group	AXO	Великобритания	60,2	68,6	14%	9,1	10,4	14%	15%	15%	12%	12%
Anite Group	AIE	Великобритания	271,6	313,6	15%	31,7	35,9	13%	11%	11%	1%	1%
Xansa	XAN	Великобритания	778,0	918,0	18%	66,6	78,5	18%	9%	9%	2%	2%
Logica	LOG	Великобритания	1957,0	2271,0	16%	226,2	262,5	16%	12%	12%	8%	8%
АИТ Group	AGP	Великобритания	67,8	83,6	23%	7,5	9,3	23%	11%	11%	8%	8%
Среднее			626,9	730,0	17%	68,2	79,3	17%	12%	12%	6%	6%
Медиана			271,6	313,6	16%	31,7	35,9	16%	11%	11%	8%	8%
Выручка РБК от услуг в области информационных технологий			6,8	12,4	82%	2,6	5,7	119%	38%	46%	29%	32%

Источник: Hemscott.

Таблица 4. Рыночные мультипликаторы компаний в области медиабизнеса, 2002П

2.

Компания	EV/EBITDA	EV/Выручка	P/E
Wilmington Group PLC	6,6	1,2	14,4
INT Media Group	6,7	0,9	N/A
Onesource	7,1	1,4	12,5
Hemscott	N/A	1,2	N/A
Interactive Data Corp	13,5	3,5	19,7
Среднее	8,5	1,6	15,5

Таблица 5. Финансовые и операционные показатели компаний медиабизнеса (млн. долл. США)

Компания	Тикер	Страна	Выручка			EBITDA			Рентабельность EBITDA		Чистая рентабельность	
			2001	2002П	Изм.	2001	2002П	Изм.	2001	2002П	2001	2002П
Wilmington Group PLC	WIL	Великобритания	80,0	86,0	8%	14,7	15,8	7%	18%	18%	6%	7%
INT Media Group	INTM	США	44,0	42,0	-7%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Onesource	ONES	США	58,3	64,0	10%	10,4	11,2	8%	18%	18%	8%	9%
Hemscott	HEM	США	7,2	8,1	13%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Interactive Data Corp	IDCO	США	340,0	367,2	8%	95,0	102,6	8%	28%	28%	1%	2%
Среднее			108,6	115,1	5%	52,7	56,9	8%	23%	23%	5%	6%
Медиана			58,3	63,9	8%	52,7	56,9	8%	23%	23%	5%	6%
Выручка РБК от медиа-бизнеса			9,8	12,6	15%	4,9	6,7	36%	50%	54%	41%	37%

Источник: Hemscott, «Атон».

Таблица 6. Оценка на основе сопоставления с другими компаниями

	2002П		
	млн. долл. США	Коэффициент	Целевая стоимость предприятия (EV), млн. долл. США
<b>Информационные технологии</b>			
Выручка	12,4	1,7	21,1
EBITDA	5,7	16,8	95,8
Чистая прибыль	4,0	23,7	94,8
Средний целевой показатель EV информационных технологий, млн. долл. США			70,6
<b>Медиабизнес</b>			
Выручка	12,6	1,6	29,2
EBITDA	6,7	8,5	57,0
Чистая прибыль	4,6	15,5	71,3
Средний целевой показатель EV медиабизнеса, млн. долл. США			52,5
Суммарный целевой показатель EV, млн. долл. США			<b>123,1</b>
Чистая сумма долга, млн. долл. США			- 2,0
Ориентировочная стоимость акций, млн. долл. США			<b>125,1</b>

Источник: «Атон».

В ходе оценки аналитиками «Атон» на основании данных EV о рыночной капитализации компании и последующим арифметическим усреднением были рассчитаны оценочные коэффициенты. В ходе применения оценочных коэффициентов к прогнозным данным по РБК были получены следующие результаты — см. табл. 7.

Таблица 7. Оценочные коэффициенты для Rambler Media и Baidu

Компания (2005)	Rambler Media	Baidu
капитализация (P), млн. долл. США	400	2690
общий доход (S), млн. долл. США	21.4 в 2005 году	
P/S	18.7	
прибыль (E), млн. долл. США		≈10
P/E		268

Другой пример метода сопоставимых оценок является анализ капитализации компании «Яндекс», проведенной в 2006 г. журналом «Эксперт». В данной статье приводится сравнение «Яндекса» возможными его аналогами, а именно Rambler Media (который провел IPO на AIM) и китайским поисковиком Baidu (разместился на NASDAQ).

Поскольку Россия и Китай сильно отличаются между собой, то коэффициент для Baidu нуждается в коррекции, чтобы его можно было применить к «Яндексу». Интернет-аудитория Китая составляет около 130 млн человек, в России (к концу 2006 г.) — порядка 30 млн. Доля рынка Baidu — это около 40%, а «Яндекса» — около 60%. Кроме того, китайский рынок несколько перегрет и для коэффициента следует ввести поправку в размере 1.5. Таким образом, корректирующий коэффициент для P/E равен  $130/30 \cdot 0.4/0.6 \cdot 1.5 = 4.33$ , а P/E для «Яндекса», таким образом, составит  $268/4.33 = \mathbf{61.9}$ .

Результаты оценки «Яндекса» приведены в табл. 8.

Таблица 8. Оценка «Яндекса» на основе коэффициентов

Компания (2006II)	Яндекс
Капитализация (P) \$, млн.	= $18.7 \cdot 64 \approx 1200$ , или $61.9 \cdot 24 \approx 1500$
Общий доход (S), млн. долл. США	64
P/S	<b>18.7</b>
Прибыль (E), млн. долл. США	24
P/E	<b>61.9</b>

Таким образом, капитализация «Яндекса» составляет 1.2–1.5 млрд. долл. США

*В итоге, автор считает, что метод сопоставимых оценок должен выступать неотъемлемой частью оценки венчурного проекта, но на стадии «выхода», т. е. продажи доли компании инвестору. Тем самым, он становится неотъемлемой компонентой создаваемого в работе инструментария оценки проектов ранних стадий.*

### 3. Метод дисконтированного денежного потока (DCF)

Отличительной чертой данного метода является максимально полное использование прогноза денежных потоков компании. Дисконтированный денежный поток представляет собой сумму значений денежного потока за прогнозный период, продисконтированных по формуле сложных процентов. В качестве коэффициента дисконтирования используется средневзвешенная стоимость акционерного капитала  $r_E$  на рынке с поправкой  $\pi$  на дополнительные, венчурные риски, присущие конкретному проекту. Помимо этого, в выражение DCF входит и конечная (терминальная) стоимость компании на конец прогнозного периода, также дисконтируемая к начальному периоду. Данный дисконтированный поток представляет собой pre-money оценку компании. Для получения post-money оценки проекта необходимо к денежному потоку проекта прибавить приведенное значение потока инвестиций.

$$DCF_{pre-money} = CF_1 + \frac{CF_2}{(1+r_E+\pi)} + \frac{CF_3}{(1+r_E+\pi)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r_E+\pi)^{n-1}} + \frac{CF_{n+1}}{(1+r_E+\pi)^n},$$

где  $CF_i$  — денежный поток компании в год  $i < n-1$ , равный показателю прибыли/убыткам (например, прибыли до выплаты процентов и налогов, *EBIT*), а *ExitValue* — «терминальная» стоимость компании на «выходе» в год  $n$ .

$$DCF_{post-money} = CF_1 + I_1 + \frac{CF_2 + I_2}{(1+r_E+\pi)} + \frac{CF_3 + I_3}{(1+r_E+\pi)^2} + \dots + \frac{CF_n + I_n}{(1+r_E+\pi)^{n-1}} + \frac{CF_{n+1}}{(1+r_E+\pi)^n},$$

где  $I_i$  — инвестиции в проект в год  $i$ .

В качестве  $r_E$  обычно берется ожидаемый возврат на инвестиции.

*Вместо стоимости капитала в контексте венчурных инвестиций, по мнению автора, имеет смысл рассматривать минимально возможный уровень дохода, желаемый инвестором. Например, если инвестор желает получить от проекта X как минимум 40% годовых, то в роли дисконта и нужно положить 40%. Это и означает, что для компании X капитал стоит 40% годовых.*

Для DCF-метода предполагается, что структура капитала компании не меняется в течение прогнозного периода, определенная по методу DCF, составляет 0.85 млн. долл. США (pre-money) и 1.97 млн. долл. США (post-money).

Премия за венчурный риск  $\pi$  является дополнительным инструментом, с помощью которого инвестор может «заложить» в проект большую доходность, компенсирующую повышенную рискованность.

Безусловным преимуществом метода DCF является его теоретическая обоснованность и наличие четкой процедуры оценки. Впрочем, для непубличных компаний (в том числе, для компаний получающих прямые и венчурные инвестиции) его осложняют следующими особенностями:

- реальные значения денежных потоков могут сильно отличаться от прогнозных;
- для стартапов решающее влияние на DCF оказывает конечная (терминальная) стоимость, нахождение которой может осуществляться методом сопоставимых оценок, при том, что операционный денежный поток прогнозируется менеджментом проекта;
- данному методу присуща некоторая степень субъективности, поскольку прогноз денежных потоков и терминальной стоимости компании делается на основании внешних относительно модели предположений.

#### 4. Венчурный метод

Этот метод является адаптацией метода DCF к случаю стартапа и учитывает ряд особенностей венчура, когда объектом финансирования выступают компании ранних стадий.

Определение стоимости компании венчурным методом состоит из следующих шагов:

- прогнозируется терминальная, целевая стоимость компании на «выходе» (возможно, через метод сопоставимых оценок);
- терминальная стоимость дисконтируется по специальной «венчурной» ставке (до 75%), учитывающей высокую степень риска  $\pi$ .

Полученная стоимость является стоимостью post-money. Стоимость pre-money, в случае венчурного метода, определяют простым вычитанием из нее величины инвестиций *Investment*. Чаще всего в качестве последнего параметра берется совокупный их объем без учета дисконтирования. Таким образом, имеют место соотношения

$$Value_{post-money}^{venture} = \frac{ExitValue}{(1 + r_{venture})^T},$$

$$Value_{pre-money}^{venture} = \frac{ExitValue}{(1 + r_{venture})^T} - Investments,$$



где  $ExitValue$  — стоимость компании на «выходе»;  $r_{venture}$  — «венчурный» дисконт, равный  $r_E + \pi$ , где  $\pi$  имеет порядок 30–40%;  $T$  — период до «выхода».

Венчурный метод особенно подходит для варианта, когда понятно, кому, когда и каким образом будет продана доля инвестора в проекте и существует понимание, сколько можно будет заработать на «выходе». «Венчурный» метод не учитывает промежуточные дивиденды в случае их наличия.

В случае применения этого метода главным предметом спора выступает «венчурный» дисконт и премия за риск  $\pi$ . При обсуждении «венчурного» дисконта инвестор может напомнить, что в нем должны быть учтаны не только возврат и риск, но и стоимость тех услуг, которые венчурный капиталист предоставляет инвестору — опыт, связи, репутация, а кроме того, существует вероятность «разводнения». Это служит дополнительным аргументом для его повышения.

Преимуществом данного метода является его легкость и традиционное использование рядом венчурных инвесторов. В то же время «узкими местами» метода являются следующие обстоятельства:

- в выборе коэффициента дисконтирования возможен значительный произвол;
- не учитывается финансирование в несколько раундов и возможность досрочного прекращения инвестиций в случае неудачи;
- не учитываются промежуточные дивиденды.

Автор предлагает включить венчурный метод для оценки тех проектов, где ставка сделана всецело на рост капитализации без учета промежуточных дивидендов.

## 5. Определение доли венчурного инвестора в компании

После того, как значения стоимости компании pre-money и post-money будут определены и согласованы обеими сторонами, становится возможным рассчитать долю инвестора исходя из его вклада. Простейшей формулой для этой цели является:

$$\frac{Investment}{Investment + Value_{pre-money}} = \frac{Investment}{Value_{post-money}} = InvestorShare,$$

где  $Investment$  — оценка инвестиций в компанию;  $Value_{pre-money}$  — pre-money стоимость компании;  $Value_{post-money}$  — post-money стоимость компании;  $InvestorShare$  — доля инвестора.

В качестве оценки инвестиций в компанию может браться:

- общий объем инвестиций;
- приведенный поток инвестиций  $NPV_i$ ;

$$NPV_I = I_1 + \frac{I_2}{(1+r)} + \frac{I_3}{(1+r)^2} + \dots + \frac{I_n}{(1+r)^{n-1}},$$

где  $I_i$  — объем инвестиций в год  $i$ ;  $r$  — ставка дисконта, равная стоимости капитала на рынке  $r_E$  или  $r_E + \pi$  ( $\pi$  — премия за дополнительные, венчурные риски).

Цена компании post-money  $Value_{post-money}$  — это  $Value_{pre-money} + Investment$ .

Использование  $NPV_I$ , а не общего объема инвестиций, выгодно прежде всего реципиенту, так как уменьшает значение переменной  $Investment$  и повышает его долю в проекте. Возможность работы с  $NPV_I$ , а не с общим объемом инвестиций — предмет переговоров между сторонами. Важным аргументом может стать то, что разбиение инвестиций на несколько раундов влечет к снижению риска инвесторов. Впрочем, для метода оценки компании через дисконтированный денежный поток  $DCF$  является корректным использование только  $NPV_I$ .

В этой связи следует сравнить использование премии за венчурный риск в методе  $DCF$  и опционный метод. Целью обоих инструментов является учет рисков развития компании. Использование премии за риск влечет к общему понижению стоимости компании и, следовательно, увеличению доли инвестора. Опционный метод, наоборот, повышает ее стоимость, что улучшает положение основателей.

При определении доли венчурного инвестора последний часто «страхуется» от «понижающих» раундов и «разводнения», что выражается в увеличении дисконта — премии за риск. Это приводит к увеличению доли венчурного инвестора в компании.

Иногда, в случае большой вероятности «понижающего» раунда и «разводнения» доли инвестора, ее определяют исходя из той доли, которую он хочет сохранить после «разводнения». Это может быть сделано по формуле

$$CurrentShare = ShareAfterDilution \times (1 + DilutionShare),$$

где  $CurrentShare$  — доля (в %), передаваемая инвестору в настоящий момент;  $ShareAfterDilution$  — доля (в %), которую инвестор желает сохранить после «разводнения»;  $DilutionShare$  — количество новых акций, выпускаемых в процессе «разводнения» в % от первоначального количества акций.

По аналогии с опционным методом, данный подход может учитывать различные сценарии развития событий. Подобная методология расчета называется «первым чикагским методом». На «вход» в этом методе подаются значения  $Value(T)$  при различных сценариях и их вероятности, и уже затем считается их математическое ожидание (среднее значение). Трудоемким моментом становится просчет ве-

роятностей. Впрочем, «чикагский» метод проигрывает опционному тем, что не учитывает возможность раннего прекращения инвестиций в случае неудачи.

## 6. Эффективность венчурных вложений и ставка дисконтирования

### 6.1. Измерение эффективности инвестиции: NPV и IRR

Важной задачей для венчурного инвестора является анализ эффективности инвестиций. Суть данной процедуры состоит в сравнении их с альтернативными возможностями вложений.

Рассмотрим простейшую ситуацию, когда инвестор вкладывает в проект  $N$  2 млн. долл. США, а через год получает отдачу  $Z$  млн. долл. США. Вложения производятся из расчета 40% годовых, т. е. инвестор хочет получить как минимум 40% прибыли через год. На практике это означает, что если менеджеры проекта  $N$  данный возврат ему обеспечить не могут, то инвестор найдет возможность вложиться в другой проект с доходностью, большей или равной 40%. В рамках этого проекта инвестор может поступить двумя способами.

1. Посчитать значение  $Z - 2 \cdot (1 + 0.4)$ , и если данная величина больше или равна 0, то решение об инвестиции будет принято. Можно, «приведя» все к начальному моменту, считать величину  $-2 + \frac{Z}{(1+0.4)}$ .

2. Решить уравнение  $-2 + \frac{Z}{(1+r)} = 0$ , и если  $r$  будет больше 0.4, то решение об инвестиции будет принято.

Эти соображения лежат в основе двух наиболее важных методов оценки инвестиций — метода чистой приведенной стоимости (Net Present Value, NPV) и внутренней нормы доходности (Internal Rate of Return, IRR). Оба метода используют дисконтированный денежный поток от проекта к инвестору. Основными преимуществами данных методов в глазах инвесторов являются:

- отражение неравноценности разновременных затрат: выгодным является более позднее осуществление затрат и более раннее получение финансовых результатов;
- учет наличия альтернативной возможности инвестиций;
- возможность учета финансового риска.

Чистая приведенная стоимость  $NPV$  представляет собой дисконтированный денежный поток от проекта к инвестору за прогнозный период от начала инвестиций до выхода.

$$NPV = D_1 - I_1 + \frac{D_2 - I_2}{(1+r)} + \frac{D_3 - I_3}{(1+r)^2} + \dots + \frac{D_n - I_n}{(1+r)^{n-1}} + \frac{T_I}{(1+r)^n} = -NPV_I + NPV_D,$$

где  $D_i$  — дивиденды инвестора в год  $i$ ;  $I_n$  — объем инвестиций в год  $i$ ;  $T_i$  — сумма, получаемая инвестором при выходе;  $r$  — ставка дисконтирования, которую можно положить как  $r_E$ , так и  $r_E + \pi$ , где  $\pi$  — премия за венчурный риск;  $NPV_I$  — чистый приведенный поток инвестиций;  $NPV_D$  — чистый приведенный поток «расширенных дивидендов» (дивиденды + прибыль инвестора на «выходе»).

В случае, если  $NPV \geq 0$ , то решение об инвестициях принимается.

Следует четко отличать дисконтированный денежный поток проекта  $DCF$  и  $NPV$  инвестора. В первом случае берется денежный поток средств в проект, а во втором — денежный поток средств к инвестору.

Если  $\alpha$  — коэффициент доли инвестора в компании, посчитанный как  $NPV_I / DCF_{post-money}$ , и для подсчетов  $NPV$  и  $DCF$  используются одинаковые ставки дисконтирования, то имеют место равенства:

$$NPV = -NPV_I + NPV_D = -NPV_I + \alpha DCF_{post-money} = 0.$$

Равенство нулю объясняется тем, что вся прибыль, ожидаемая инвестором уже учтена в ставке дисконтирования  $r$ , и в этой ситуации инвестор получит положительную прибыль из расчета  $r$  процентов годовых.

Внутренняя норма доходности ( $IRR$ ) представляет собой максимальный уровень цены на капитал (ставки дисконта), при которой проект с заданным потоком средств к инвестору будет представлять для него коммерческий интерес. А именно, если представить  $NPV$  как функцию от цены на капитал (ставки дисконтирования), то  $IRR$  — это значение, при котором  $NPV$  равна 0. Нахождение  $IRR$  осуществляется решением уравнения.

$$NPV(IRR) = D_1 - I_1 + \frac{D_2 - I_2}{(1 + IRR)} + \frac{D_3 - I_3}{(1 + IRR)^2} + \dots + \frac{D_n - I_n}{(1 + IRR)^{n-1}} + \frac{T_i}{(1 + IRR)^n} = 0,$$

В случае, если  $r$  — некоторый дисконт, определяемый инвестором (например, цена акционерного капитала  $r_E$  с возможной премией за венчурный риск  $\pi$ ), то решение об инвестициях принимается, если  $IRR > r$ .

Формулы нахождения точного значения  $IRR$  в общем виде не существует, и она находится с помощью численных методов и вспомогательные программы (например, через Excel).

Обычно для встречающихся в реальной жизни проектов чаще всего имеет место

$$NPV(r_E) > 0 \Leftrightarrow IRR > r_E.$$

В силу существующих в инвестиционном бизнесе традиций  $IRR$  в настоящее время употребляется чаще, чем  $NPV$ .

Методу *IRR* присущ ряд недостатков, которые у *NPV* отсутствуют:

- в случае, если ряд прогнозных значений денежных потоков отрицателен, *IRR* может не существовать или же могут существовать несколько значений *IRR* (с формальной точки зрения);
- если одновременно и за одно и то же время выполняются несколько независимых друг от друга проектов, то их суммарное *IRR* придется считать отдельно, тогда как суммарное *NPV* можно получить простым сложением.

## 6.2. Выбор ставки дисконтирования

Метод оценки стоимости проекта методом дисконтированного денежного потока (*DCF*) и метод оценки эффективности инвестиций посредством *NPV* требуют знаний стоимости акционерного капитала. Рыночная стоимость акционерного капитала, как правило, берется равной возможному доходу от альтернативных проектов, которые рынок предоставляет в данный момент.

*Вместо стоимости капитала имеет смысл рассматривать минимально возможный уровень дохода, желаемый инвестором. Например, если инвестор желает получить от проекта X как минимум 40% годовых, то в роли дисконта и нужно положить 40%. Это означает, что для компании X капитал стоит 40% годовых.*

На практике инвестор часто руководствуется критерием, что он будет вкладываться в проект, который принесет доходность не менее  $n$  раз за  $k$  лет, что, по сути, и является рассмотрением альтернативы: если данный проект не приносит назначенной доходности, то инвестор будет искать другой проект, который эту доходность ему даст, а сформулированный критерий и представляет собой цену акционерного капитала. Данная формулировка цены акционерного капитала (не менее  $n$  раз за  $k$  лет) посредством вычислений может быть легко переведена в ставку дисконтирования. Для этого существуют специальные таблицы. Ниже приводится один из вариантов, используемых в венчурной отрасли (табл. 9). В качестве критериев роста (левый столбец) выбраны те, которые наиболее часто используются для технологических компаний.

*В случае ряда рынков, к каким относится и Россия, ставка дисконтирования должна учитывать и уровень инфляции.*

В отрасли private equity и венчурного инвестирования в зависимости от стадии развития компании, на которой делаются вложения, используются следующие стандартные дисконтирования [1–3], приведенные в табл. 10.

Таблица 9. Ставки дисконтирования в зависимости  
от желаемого роста доходности

Рост	Ставка дисконтирования (цена акционерного капитала), %
3 раза за 3 года	44
5 раз за 3 года	71
7 раз за 3 года	91
4 раза за 4 года	41
3 раза за 5 лет	25
5 раз за 5 лет	38
7 раз за 5 лет	48
10 раз за 5 лет	58

Таблица 10. Ставки дисконтирования в зависимости от стадии  
развития компании в момент вложений.

Стадии	Развитые страны (США, Евросоюз), %	Россия, %
Посевная	более 40	100
Стартап	более 40	80
Ранний рост	30–50	60
Расширение	30–50	40

## 7. Заключение

В итоге, на базе практически применимых подходов автором был создан и апробирован на практике комплексный подход к оценке венчурных проектов, включающий в себя:

- максимальное использование трактовки роста бизнеса как роста капитализации;
- сочетание метода дисконтированного денежного потока и метода сопоставимых оценок;
- возможность использования чисто капитализационных соображений на ранних стадиях.

Как результат, на базе практик, выработанных действующими экономическими агентами, автором построена (и успешно внедряется) техника комплексной оценки проекта, учитывающая венчурную составляющую. Она может использоваться и для целей оценки тех составляющих комплексных инфраструктурных проектов, что могут быть профинансированы частными инвесторами, играющими по стандартным правилам.

## Литература

- [1] Каширин А. И., Семенов А. С. В поисках бизнес-ангела. Российский опыт привлечения стартовых инвестиций. — М. : Вершина, 2008.

- [2] *Каширин А. И., Семенов А. С.* Инновационный бизнес: венчурное и бизнес-ангельское инвестирование. — М. : Дело, 2010.
- [3] *Родионов И. И., Семенов А. С.* Предпринимательские финансы. — СПб. : Алетейа, 2013.

**Автор:**

*Александр Сергеевич Семеев* — кандидат физико-математических наук, преподаватель МБШ, Московский технологический институт; доцент Института Космических технологий Российский университет дружбы народов

## The Valuation Mechanisms of the Technology Projects with Venture Component

A. S. Semenov

Moscow Technological Institute  
38A, Leninskiy pr., Moscow, Russia, 119334

Peoples Friendship University of Russia  
6, Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia 117198

e-mail: [semenov.venture@mail.ru](mailto:semenov.venture@mail.ru)

*Abstract.* The paper deals with the valuation of venture projects, which are used in the modern market practice. The method of the comparables, discount cash flow method, venture method are mentioned and described. Their combination can be used for the investment decision-making process.

*Ключевые слова:* venture capital transactions, IT market, the assessment of companies.

### References

- [1] Kashirin A. I., Semenov A. S. (2008) V poiskah biznes-angela. Rossijskij opyt privlechenija startovyh investicij. Moscow, Vershina. [In Rus]
- [2] Kashirin A. I., Semenov A. S. (2010) Innovacionnyj biznes: venchurnoe i biznes-angel'skoe investirovanie. Moscow, Delo. [In Rus]
- [3] Rodionov I. I., Semenov. A. S. (2013) Predprinimatel'skie finansy. Saint-Petesburg, Aleteja. [In Rus]



## Список организаций, аффилированных с авторами статей в 2016 г.

### Россия

#### *Москва*

- Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
- Центральный экономико-математический институт РАН
- Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН
- Московский физико-технический институт (государственный университет) (Долгопрудный)
- Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
- Национальный исследовательский университет «МЭИ»
- Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики
- Национальный ядерный исследовательский университет МИФИ
- Национальный исследовательский университет Российский университет дружбы народов
- Московский технологический университет (МИРЭА)
- Московский политехнический университет
- Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова
- Московский государственный университет путей сообщения
- Московский государственный технический университет гражданской авиации
- Московский научно-исследовательский телевизионный институт
- Московский технологический институт
- ГБОУ Лицей 1502 при МЭИ

#### *Санкт-Петербург*

- Михайловская военная артиллерийская академия Министерства обороны Российской Федерации

#### *Екатеринбург*

- Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

#### *Курск*

- Юго-Западный государственный университет

#### *Нижний Новгород*

- Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

#### *Нижний Тагил*

- Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

#### *Рязань*

- Рязанский государственный радиотехнический университет

*Самара*

- Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)
- Самарский государственный технический университет

**США**

- Питтсбургский университет, штат Пенсильвания, Питтсбург,
- i2i istudy, Inc., Сан-Франциско

**Нидерланды**

- Компания «Медтроник»

**Азербайджан**

- Институт информационных технологий НАН Азербайджана, Баку

**Казахстан**

- Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК, Алматы
- Казахстанско-британский технический университет, Алматы

**Мексика**

- Высшая инженерная школа, Веракруз

Свидетельство о регистрации СМИ в Федеральной службе  
по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых  
коммуникаций: Эл № ФС77-58766 от 28.07.2014 г.

*Учредитель:* Негосударственное образовательное учреждение высшего  
образования Московский технологический институт

*Адрес редакции:* 117292, г. Москва, ул. Кедрова, д. 8, корп. 2

*Контактный телефон:* +7 (495 648-62-26)

*e-mail:* e\_nikulchev@mti.edu.ru

*Отв. за выпуск:* Е. В. Никульчев

*Корректор:* С. Ф. Михайлова

Подписано в печать: 25.12.2016.

© Авторы статей

© НОУ ВО МосТех