

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЕЗВИНТОВОГО НАДВОДНОГО РОБОТА¹

А.И. Кленов, А.А. Килин

Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию движения безвинтового надводного робота, приводимого в движение с помощью двух вращающихся внутренних масс. Предложена конструкция безвинтового надводного робота. Представлены результаты экспериментов, подтверждающих возможность перемещения данным методом. Результаты экспериментов сравнены с математическими моделями движения в идеальной и вязкой жидкости.

Ключевые слова: мобильный робот, безвинтовой надводный робот, самопродвижение.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DYNAMICS OF THE SCREWLESS ABOVE-WATER ROBOT

A. Klenov, A. Kilin

This paper is devoted to experimental research of the motion of a screwless above-water robot set in motion by rotating two unbalanced internal masses. The study presents the overview of the methods of movement in a liquid. The results of experiments confirm the possibility of motion by this method. The experimental results are compared with mathematical models of movement in the ideal and viscous liquids.

Keywords: mobile robot, screwless above-water robots, self-promotion.

Введение

В современном мире мобильные робототехнические системы решают большое количество различных задач, связанных, например, с мониторингом состояния окружающей водной среды, взятием проб воды и других. В ряде случаев необходимы устройства, способные интегрироваться в изучаемую среду, не нарушая происходящих в ней процессов. Поэтому методы самопродвижения тел в жидкости имеют большое значение в современном мире [1].

Среди основных методов самопродвижения тел в жидкости можно выделить перемещение, основанное на принципах движения морских существ (рыб, змей, червей). В работах [2, 3] рассмотрены двухзвенные и трехзвенные механизмы, совершающие угловые колебания и перемещающиеся в жидкости подобно рыбе.

Известна модель бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере, перемещающаяся данным образом [4].

Также к самопродвижению можно отнести перемещение, основанное на изменении кинетического момента внутренними роторами. В работе [5] произведен обзор работ по данному направлению и представлена модель безвинтового подводного робота, представляющая собой полый эллипсоид с расположенными внутри тремя роторами, оси вращения которых взаимно ортогональны.

Одним из видов самопродвижения является также перемещение с использованием внутренних масс. В работах [6, 7] рассматривается система, перемещающаяся в жидкости за счет поступательного перемещения внутренней массы в сопротивляющейся среде с квадратичным за-

¹ Работа поддержана РНФ, проект № 14-19-01303.

коном сопротивления и особой формы корпуса, обеспечивающей анизотропию сил сопротивления жидкости (вязкости) в различных направлениях. К данному методу относится вибрационный водный робот [8].

В работах [9–11] рассматривается задача об управлении движением тела в жидкости за счет изменения распределения масс внутри тела. Приведен ряд примеров управления телом за счет перемещения внутри точечной массы и определены два условия, обеспечивающие возможность данного передвижения – анизотропия присоединенных масс тела и движение центра масс по самопересекающейся траектории. В работах [12–13] проведен анализ движения в идеальной жидкости тела, несущего две материальные точки, движущихся по круговым траекториям по заранее заданному закону. Здесь же показаны примеры управления движением такой системы и доказана ее полная управляемость.

Целью данной работы является экспериментальное исследование движения тела в жидкости за счет перемещения двух внутренних масс по окружности.

Разработка натурного образца

Для экспериментального исследования движения тела в жидкости за счет перемещения внутренних масс разработана конструкция безвинтового надводного робота (БНР), который состоит из корпуса и внутреннего механизма (рис. 1, а), обеспечивающего движение внутренних масс по окружности [14]. Корпус надводного робота выполнен в виде полого эллиптического цилиндра (размер $250 \times 180 \times 40$ мм) с килем, расположенным вдоль большой оси эллиптического основания, обеспечивающим различные значения силы сопротивления жидкости (присоединенных масс) в продольном и поперечном направлениях. В качестве материала для изготовления корпуса выбран *ABS* пластик толщиной 3 мм. Внутренний механизм представляет собой однорядный разделяющий зубчатый механизм, преобразующий вращение вала электродвигателя во вращение двух выходных звеньев, на которых закреплены грузики (внутренние массы). Данный механизм обеспечивает одинаковую по модулю скорость (частоту) вращения внутренней массы, но различной направленности. Схема механизма вращения эксцентриков представлена на рис. 1, б.

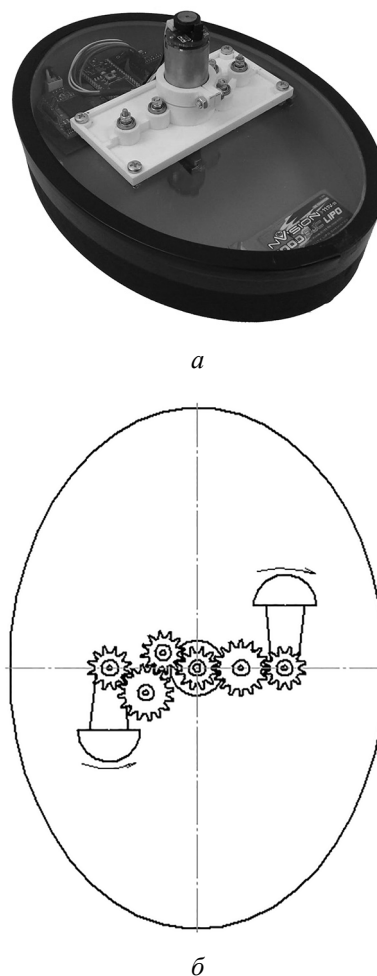


Рис. 1. Модель (а) и схема (б) безвинтового надводного робота

БНР обладает следующими инерционно-массовыми характеристиками:

- масса БНР без эксцентриков $M = 0,8417$ кг;
- габаритные размеры $0,250 \times 0,180 \times 0,040$ м;
- расстояние от пересечения осей симметрии до вращения эксцентриков $R = 0,042$ м;
- радиус вращения центра масс эксцентрика $r = 0,033$ м;
- масса эксцентрика $m = 0,05$ кг.

Основным критерием возможности данного перемещения является различие присоединенных масс тела в различных направлениях. Для определения величины присоединенных масс разработан лабораторный стенд и методика, представленные в работе [15].

Подставив все параметры системы в математическую модель, представленную в работе [12, 16], и решив ее численно, получим траекторию движения центра масс (рис. 2).

Рис. 2 показывает, что тело совершает периодические колебания с амплитудой $A = 2,868$ мм

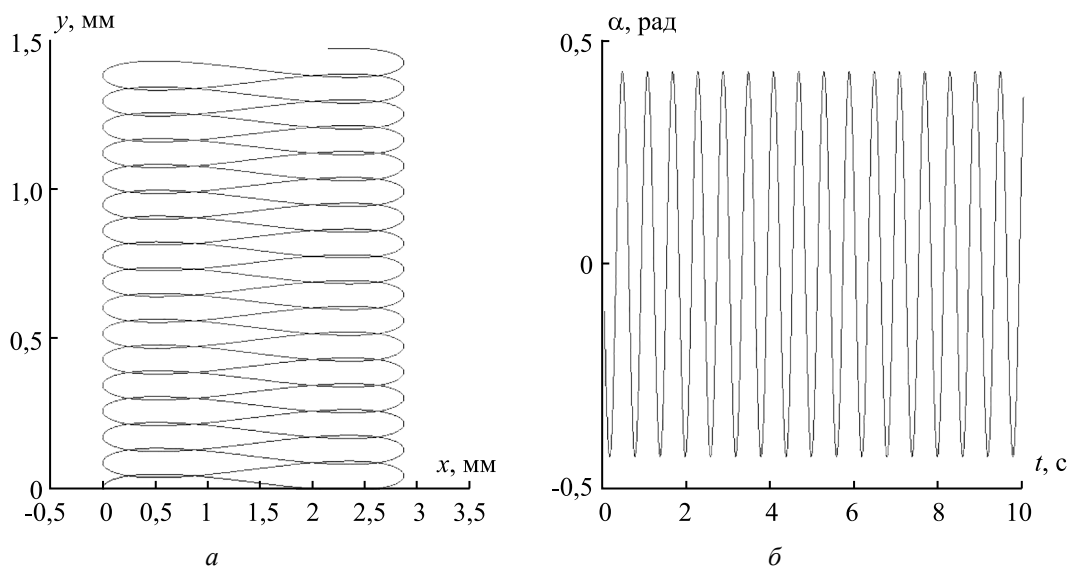


Рис. 2. Траектория движения БНР в модели идеальной жидкости при $\Omega = 100$ об/мин: a – перемещение центра масс; b – изменение угла ориентации α

по оси Ox . На достаточно большом интервале времени t данное движение можно считать прямолинейным со средней скоростью $\bar{V} = 0,147$ мм/с.

Результаты натурного эксперимента

Для проверки математической модели движения БНР была разработана методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных, состоящая из следующих действий:

- 1) на корпус БНР закрепить светоотражающие маркеры системы *Vicon Motion Capture*, задающие систему координат, жестко связанную с БНР;

- 2) поместить БНР в центр бассейна. В нашем случае использовался круглый бассейн диаметром 2 м и глубиной 0,4 м;

- 3) запустить отслеживание движения БНР в системе *Vicon Motion Capture*, задать необходимую частоту вращения эксцентриксов и запустить БНР;

- 4) по полученным данным рассчитать среднее направление движения и повернуть неподвижную систему координат так, чтобы перемещение осуществлялось вдоль оси Oy , что позволит более точно определить параметры траектории движения;

- 5) определить параметры траектории движения: амплитуду, шага продвижения, среднюю скорость движения БНР.

По данной методике было проведено несколько серий экспериментов с различными

скоростями вращения эксцентриксов, не менее 5 экспериментов в каждой серии. Для исключения влияния потоков жидкости на полученные результаты, время между повторными экспериментами задавалось не менее времени релаксации поля скорости жидкости к состоянию покоя. В нашем случае время релаксации выбрано порядка 4 мин.

Пример траектории движения центра масс и зависимости компонент скорости БНР от времени при скорости вращения внутренних масс $\Omega = 100$ об/мин приведены на рис. 3, a , b . На рис. 3, в изображена траектория движения БНР после поворота системы координат в соответствии с п. 4 методики проведения эксперимента.

На рис. 4 представлен график зависимости скорости перемещения от частоты вращения внутренних масс, полученной экспериментально, а также значения, полученные в рамках математической модели [16]. Средняя линейная скорость продвижения БНР (см. рис. 4) так же, как и в теории, растет при увеличении скорости вращения внутренних масс, но на порядок превышает теоретическое значение. Теоретические значения скорости движения на данном графике умножены для масштабирования на 100.

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что качественный характер траектории движения БНР совпадает с теоретическими результатами моделирования движения в идеальной жидкости. Однако количественные характеристики движения существенно отличаются. Эксперимен-

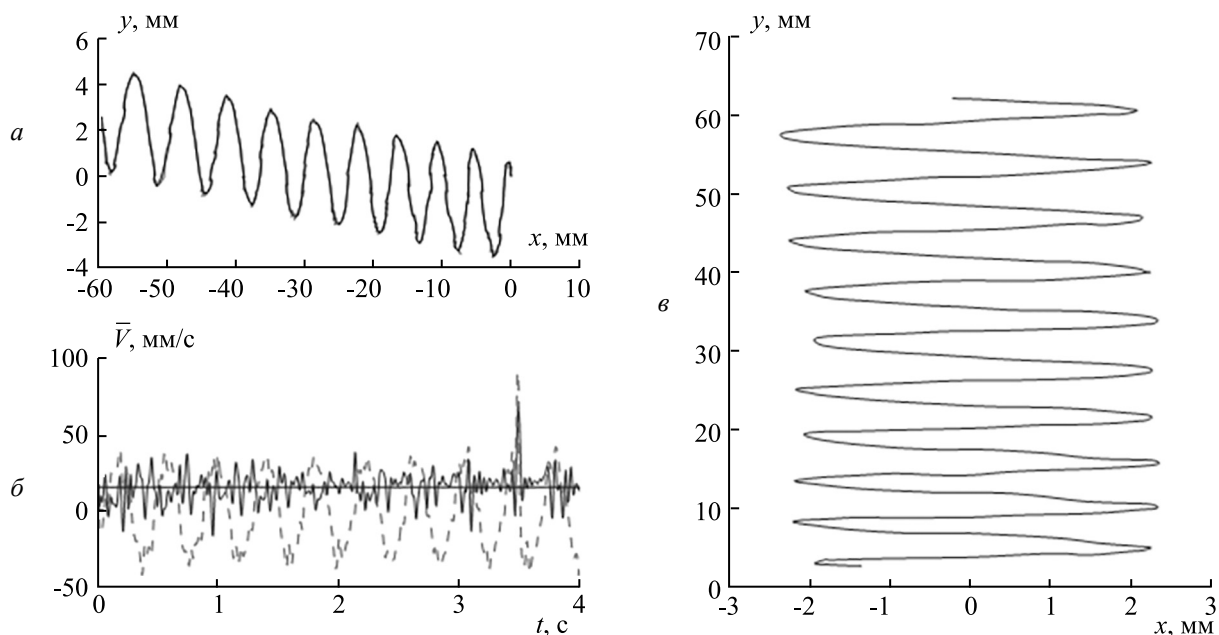


Рис. 3. Экспериментальные данные, полученные при движении БНР со скоростью вращения внутренних масс $\Omega = 100$ об/мин:

a – исходная траектория движения; b – зависимость компонент скорости движения V_x , V_y от времени; v – траектория движения БНР после поворота системы координат; ———— V_x ; ---- V_y ; $\bar{V}$

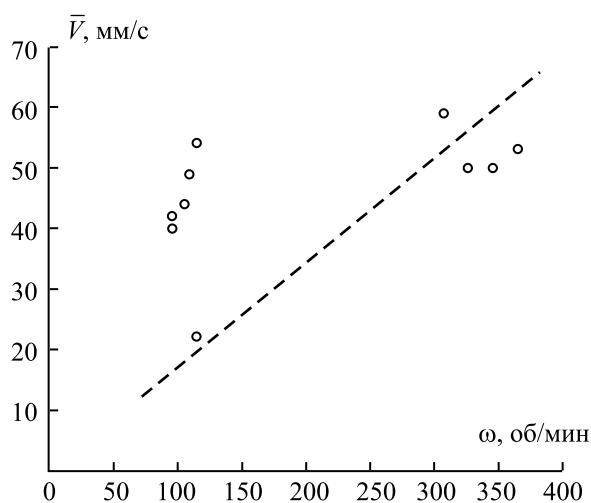


Рис. 4. Средняя (поступательная) скорость движения БНР:

○ – экспериментальные данные;
----- – идеальная жидкость ($\times 100$)

тальные значения средней скорости движения БНР в 100 раз больше теоретических значений и имеют нелинейную зависимость от частоты вращения.

Для дальнейшего исследования продвижения тела в жидкости за счет перемещения внутренних масс была рассмотрена модель движения, учитывающая трехмерный колебательный режим, силу тяжести, выталкивающую силу

Архимеда и силу сопротивления со стороны вязкой жидкости. Экспериментальным путем определены коэффициенты сопротивления движения тела в жидкости. На основе численного решения уравнений Навье – Стокса определена величина сил вязкости. Подробнее с данной математической моделью движения и определением коэффициентов сопротивления движения тела в жидкости можно ознакомиться в работе [17]. Подставив все параметры системы в математическую модель и решив ее численно, получим траекторию движения центра масс (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что тело также совершает периодические колебания. Амплитуда этих колебаний $A = 13,286$ мм по оси Ox . Средняя скорость продвижения $\bar{V} = 51,85$ мм/с.

На рис. 6 представлен график зависимости скорости перемещения от частоты вращения внутренних масс, полученной экспериментально, и значения, полученные в рамках математической модели вязкой жидкости.

Графики на рис. 6 свидетельствуют, что с ростом частоты вращения внутренних масс расчетная средняя скорость продвижения устройства, полученная с использованием предложенной математической модели, согласуется с результатами экспериментов и возрастает, причем нелинейно.

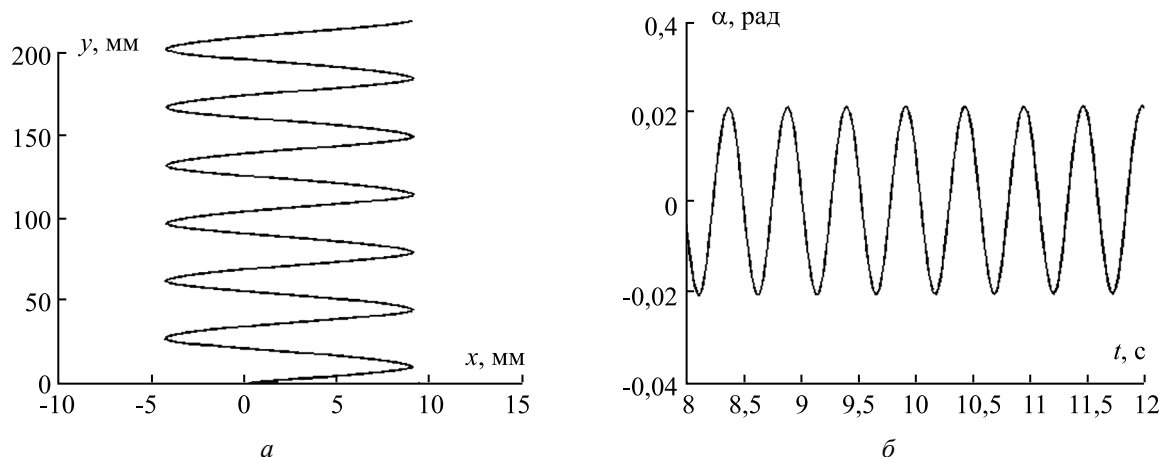


Рис. 5. Траектория движения БНР в модели вязкой жидкости при $\Omega = 100$ об/мин:

a – перемещение центра масс; b – изменение угла ориентации α

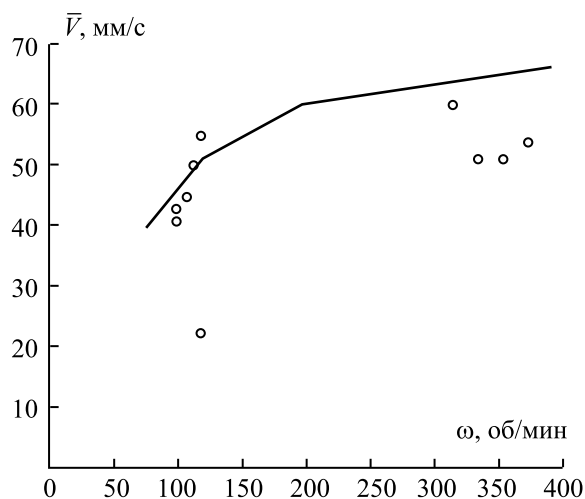


Рис. 6. Средняя (поступательная) скорость движения БНР:

○ – экспериментальные данные;
— – вязкая жидкость

Заключение

В результате проделанной работы выявлено, что математическая модель движения БНР в идеальной жидкости, не учитывающая трехмерный колебательный режим движения, дает по скорости продвижения отличие на 2 порядка от экспериментальных значений. Математическая модель движения БНР в вязкой жидкости с учетом трехмерных колебаний системы и внешних сил (силы тяжести, выталкивающей силы Архимеда, силы сопротивления со стороны вязкой жидкости) дает хорошее совпадение расчетных характеристик движения с результатами экспериментов как качественно, так и количественно.

Таким образом, можно сделать вывод, что математическая модель учитывающая трехмерные колебания БНР и вязкость жидкости, применима для описания движения твердого тела с перемещающимися внутренними массами по поверхности жидкости.

Дальнейшее направление исследования связано с разработкой конструкции и системы управления БНР с двумя независимыми вращающимися эксцентриками, позволяющими провести исследования различных траекторий движения.

Список литературы

1. Anderson J.M., Chhabra N.K. Maneuvering and Stability Performance of a Robotic Tuna // Integ. and Comp. Biol. 42: 118–126 (2002).
2. Черноусько Ф.Л. Управляемые движения двузвенника по горизонтальной плоскости // Прикладная математика и механика. 2001. Т. 65. Вып. 4. С. 578–591.
3. Черноусько Ф.Л. О движении трехзвенника по плоскости // Прикладная математика и механика. 2001. Т. 65. Вып. 1. С. 15–20.
4. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Б.В. Лушников, С.И. Савин, К.Г. Казарян, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. Ч. 2. / С.Ф. Яцун (отв. ред.). – Курск: ЮЗГУ, 2012. С. 107–111.
5. Моделирование безвинтового подводного робота / Е.В. Ветчанин, Ю.Л. Караваев, А.А. Калинин, А.В. Клековкин, Е.Н. Пивоварова // Вестник удмуртского университета. 2015. Т. 25. № 4. С. 546–553.

6. Черноусько Ф.Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы // Прикладная математика и механика. 2006. Т. 70. Вып. 6. С. 915–941.
7. Черноусько Ф.Л. Оптимальные периодические движения двухмассовой системы в сопротивляющейся среде // Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72, Вып. 2. С. 202–215.
8. Патент на полезную модель № 92646 Российская Федерация, МПК В62D57/00. Яцун С.Ф., Климов Г.В., Савин С.И. Вибрационный водный робот; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Курский государственный технический университет»; заявл. 26.10.2009; опубл. 27.03.2010.
9. Козлов В.В., Рамоданов С.М. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости ПММ. 2001. Т. 65. Вып. 4. С. 592–601.
10. Козлов В.В., Онищенко Д.А. О движении в идеальной жидкости тела, содержащего внутри себя подвижную сосредоточенную массу // ПММ, 2003. Т. 67. № 4. С. 620–633.
11. Galper A., Miloh T. Dynamical equations for the motion of a rigid or deformable body in an arbitrary potential nonuniform flow field // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 295. P. 91–120.
12. Килин А.А., Ветчанин Е.В. Управление движением твердого тела в жидкости с помощью двух подвижных масс// Нелинейная динамика. 2015. Т. 11. № 4. С. 633–645.
13. Ветчанин Е.В., Килин А.А. Управляемое движение твердого тела с внутренними механизмами в идеальной несжимаемой жидкости // Труды математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2016. Т. 295. С. 321–351.
14. Патент на полезную модель № 153711 Российская Федерация, МПК В62D57/04. Борисов А.В., Килин А.А. Безвинтовой надводный робот; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»; заявл. 03.10.2014; опубл. 27.07.2015.
15. Кленов А.И., Ветчанин Е.В., Килин А.А. Экспериментальное определение присоединенных масс тела методом буксировки// Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. мех. компьют. науки. 2015. Т. 25. Вып. 4. С. 568–582.
16. Klenov A.I., Kilin A.A. Influence of vortex structures on the controlled motion of an above-water screwless robot// Regular and Chaotic Dynamics. 2016. Т. 21. № 7–8. P. 927–938.
17. Кленов А.И., Килин А.А., Тенев В.А. Управление движением тела с помощью внутренних масс в вязкой жидкости // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 11. (принята в печать).

**КЛЕНОВ
Анатолий Игоревич**

E-mail: tolik-klenov@mail.ru
Тел.:

Аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Мобильные системы» Ижевского Государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: моделирование мобильных роботов; численные методы; динамические системы; экспериментальная гидродинамика; теория управления; приложения теории управления и гидродинамики в робототехнике.

**КИЛИН
Александр
Александрович**

E-mail: lab@ics.org.ru
Тел.: (3412) 500-295

Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теоретической физики Удмуртского государственного университета (УдГУ), ведущий научный сотрудник лаборатории «Нелинейного анализа и конструирования новых средств передвижения» УдГУ, ведущий научный сотрудник Математического института им. В.А. Стеклова РАН, главный программист отдела математических методов нелинейной динамики Института математики и механики УрО РАН. Сфера научных интересов: теория динамических систем; проблемы интегрируемости, динамический хаос; точно интегрируемые нелинейные системы; алгебры Ли, гамильтонов формализм; топологические методы исследования динамических систем; динамика твердого тела; неголомомная механика; динамика вихревых структур; небесная механика; динамика в пространствах постоянной кривизны; сценарии перехода к хаосу и компьютерные эксперименты; тензорные инварианты в уравнениях динамики; интегрируемые системы; устойчивость и управление движением; моделирование мобильных роботов. Автор более 150 научных работ, 3 монографий, 13 патентов и авторских свидетельств.