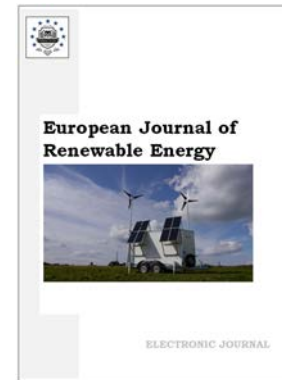


Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA  
 European Journal of Renewable Energy  
 Issued since 2016.  
 E-ISSN: 2454-0870  
 2025. 10(1): 8-24

DOI: 10.13187/ejre.2025.1.8  
<https://ejre.cherkasgu.press>



### Letters to the Editorial Office

## The Problem of Energy-Based Classification of Mini-, Micro- and Nanorotators Based on Su-Field Analysis Criteria: From Controlling Physical Fields to Non-Conservative Self-Organization Principles

Oleg V. Gradov <sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> Semenov Institute of Chemical Physics, RAS (ICP RAS), Moscow, Russian Federation

#### Abstract

This article addresses the problem of energy-based classification of rotational elements such as propellers, rotors, or gyroscopes within the global trend of technical systems miniaturization. Many microminiaturization principles used in MEMS design can be related to Su-Field Analysis, which explicitly utilizes substance-field interaction principles widely applied in system engineering. The classification of microrotators based on controlling physical fields is presented according to Su-Field ("vepol") Analysis criteria. 1. Optical control methods, including laser activation and light harvesting, involving complex mechanisms beyond classical theories/models (thermal, convective, and plasmonic effects emerge when metallic nanoparticles are heated by light, leading to chaotic dynamics). 2. Acoustic control methods (including based on cavitation bubbles). 3. Magnetically controlled systems for biomedical applications and swarm robotics (classical Altshuller's "fepol"). 4. Chemical control and actuation methods encompass catalytic micro- and nanopropellers and enzyme-catalyzed rotor systems. Finally, challenges associated with manufacturing processes for nanorotational devices (due to self-organization mechanisms in active heterogeneous media) are highlighted. Classical 3D fabrication techniques applicable to industrial-scale propellers become senseless for nanostructures. This necessitates reconsideration of design and testing methodologies (particularly considering size-dependent effects and modified similarity criteria).

**Keywords:** microrotators, nanorotators, su-field analysis, optical control, acoustic control, magnetically controlled systems, chemical control and actuation, catalytic control, size-dependent effects, similarity criteria, multiphysical modeling.

#### 1. Введение: проблема микроминиатюризации ротационных элементов.

Проблема микроминиатюризации ротационных элементов, таких, как пропеллеры, роторы или гироскопы, является элементом глобального тренда микроминиатюризации технических систем, начатого в конце 1950-х гг. в электронике (переходом к твердотельной микроэлектронике, литографическим техникам (Finkelstein, 1959; Danko et al., 1959; Liimatainen, 1959; Herwald, Angello, 1960), что было зафиксировано ещё в 1958 году в трудах "Symposium on Microminiaturization of Electronic Assemblies", отчасти легших в основу

\* Corresponding author

E-mail addresses: [gradov.chph.ras@gmail.com](mailto:gradov.chph.ras@gmail.com) (O.V. Gradov)

цитированных работ). В область электромеханики микроминиатюризация пришла в 1960-е гг., однако долгое время она не затрагивала вращательную динамику, в силу сложности изготовления соответствующих структур.

Первоначально, микроминиатюризованные электромеханические системы, такие, как резонисторы (Nathanson, Wickstrom, 1965; Wilfinger et al., 1968), как очевидно следует из определения, использовали принципы резонанса. Сам термин MEMS был предложен только в 1980-е годы и официализирован в публикациях DARPA и IEEE. До середины 1980-х гг. этот термин (MicroElectroMechanical Systems) не обозначал определенно соответствующий класс приборов, хотя первые входящие в него устройства уже существовали в разработках с конца 1970-х гг. (Muro, 2013). Многие принципы микроминиатюризации, используемые в дизайне MEMS могут быть отнесены к области приложения вепольного анализа (известного за рубежом как "su-field analysis"/SFA или "vepol methodology"/SFM), так как в явном виде используют принципы взаимодействия вещества и управляющего его динамикой поля или же нескольких полей (что широко используется в системотехнике) (Dung, 1995; Dung, 1997; Heller et al., 2013; Souchkov, 2016; Kaliteevskii et al., 2021; Gradov, 2025).

Также с 1960-х гг. развивается, независимо от электромеханики, область приложений микроминиатюризации и миниатюризации чисто механических ротационных элементов. Работы в области создания и исследования динамики небольших пассивных ротационных элементов, также как и работы по исследованию продольных колебаний скорости в потоках в каналах над неровным дном, исследованных путем измерения статистических изменений скорости с помощью минипропеллеров (называемых "микропропеллерами"), являются примерами чисто инженерных работ в этой области для 1960-х гг., находящими целевую аудиторию читателей и источники цитирования в изданиях по гидроинженерии, прикладной гидравлике, гражданской строительной инженерии и инженерной механике, гидроседиментологии и гидросейсмологии (Jonsson, 1965, 1980; Yokosi, 1967; Plate, Bennett, 1969; Cederwall, 1971; Imamoto, 1972; Hansen, 1972; Jonsson, Carlsen, 1976; Bartholdy, 1982; Justesen, 1988).

Такие работы не находят приложений в микроинженерии создания управляемых актуаторов, зато являются инспиративными для множества механических/гидравлических/ (аэро-)гидродинамических сенсоров. Этот тренд господствует с конца 1960-х гг. по 1980-е гг., распространяясь от отдельных лабораторий (Dutch Waterloopkundig Laboratorium) до общепромышленного применения подобных устройств, лидером в разработке и изготовлении которых являются Голландские и Датские специалисты (Pedersen, 1969; Brolsma, 1973; Jensen, 1973; Basco et al., 1982). Специалисты в области истории науки и техники обычно связывают прогресс данных исследований в Голландии и Дании с гидроинженерными и гидроклиматическими факторами данных территорий, так как строительство дамб (в Нидерландах общая длина защитных дамб – около 3500 км) для защиты от наводнений и использование энергии воды – от механических мельниц до простых гидроэлектростанций начала XX века (например, как Gudenaacentralen в Дании между Kongensbro и Bjerringbro, запущенная в 1921 г.) сформировали высокую гидроинженерную культуру, потребовавшую совершенствования как средств гидродинамических, гидравлических измерений, так и математического аппарата, позволяющего интерпретировать эти измерения, моделировать и прогнозировать динамику естественных гидравлических систем.

## 2. Микропропеллеры для микрогидродинамических исследований

Проблематика использования пропеллеров для микрогидродинамических задач и приложений ("for micro-hydro-applications") является активной и сейчас (Singh, Nestmann, 2009; Kim, 2014a; Kim, 2015), но её акценты переместились в область микрофлюидных приложений (Shih, 2016), а также, в силу сдвига "технологических полюсов" развития из Европы в Азию, в частности – в Корею и КНР, перешли из сектора университетской науки в сферу корпоративных изысканий из спин-оффов.

Так, например, крупнейшими специалистами в этой области может похвастаться Korean Society for Fluid Machinery, в котором, в свою очередь, наиболее ярким и активно публикующимся специалистом является Kim Byung-Kon, печатающийся с аффилиацией DSK Engineering Co. С использованием прогрессивных компьютерных методов (уровня CFD – Computational Fluid Dynamics) им рассчитаны микропропеллерные гидротурбины (Park et

al., 2012a; Park et al., 2012b; Kim, 2014b). Другим новым центром данных работ может считаться Тайвань. Однако, по мере продвижения терминов вглубь материка, теряется смысл, вкладываемый в них (известные механизмы метонимии и реификации); поэтому к настоящему времени термины типа "micropopeller" трактуются весьма широко, включая в себя как автономные, так и неавтономные агенты/как активные, так и пассивные системы/как сенсорные и трансдюсерные, так и актуаторные элементы/как микронные и декамикронные структуры, так и едва ли не сантиметровые элементы для беспилотных летательных аппаратов, нередко используемых для губительных и неприемлемых для цивилизации приложений (другими словами, использование подобной терминологии переводится из строгого инженерного и метрологического лексикона в область рекламных "hot labels"). Поэтому мы, к сожалению, вынуждены призывать читателей, несмотря на обилие работ в этой области, игнорировать существенную часть библиографического пула информации в этой области, становящейся областью "информационного шума".

Кроме того, мы сознательно выводим из рассмотрения области прикладной, в том числе военной применимости, типа разработок Micro Air Vehicles – MAV, движимых с использованием микропропеллерных моторов (powered by electric motor driven micro propellers and micro-DC-motor-driven propeller–thrusters (Yang, Chou, 2009; Boscoianu, Cîrciu, 2011; Ranjanagi et al., 2013)).

Можно сделать вывод, что если какая-то область приложимости выходит за рамки лаборатории и становится инженерной, то информационный шум, который возникает в ней и предельно расширяет значения терминов, препятствует развитию всего направления, так как критерии научной новизны подменяются критериями экономики и практики.

### **3. Классификация микропропеллеров и микропропеллеров и микророторов/микророторов по вепольным и энергетическим критериям управляемости.**

В рамках su-field analysis (вепольный анализ) можно классифицировать управляемые технические системы по управляющим ими физическим полям. Так для микропропеллеров можно выделить следующие физические и химические формы управления:

#### **3.1. Оптическое управление.**

Оптическое управление микророторами может использоваться в разных формах – таких как лазерная активация (laser light activation) или light harvesting (Shih, 2016; Elwood, 2016; Rao et al., 2017).

Механизмы опосредованной реализации данного принципа управления могут быть намного сложнее, чем предполагается классической теорией, используемой для описания опыта Р.Н. Лебедева, и для других классических моделей (Chaumet, Billaudeau, 2007). Так, вычисления на MATLAB с использованием доступного тулбокса MNPBEM (Metallic Nano-Particle Boundary Element Method), в которых принимают во внимание также геометрию активных микропропеллеров (Shih, 2016), а также модели на COMSOL, обеспечивающие учет эффектов конвекции при световом нагреве наночастиц, позволяют промоделировать причины возникновения хаотической динамики в ротации микропропеллеров на основе металлических наночастиц. В экспериментальной части работы (Elwood, 2016) показано, что «сочетание поверхностного плазмонного резонанса, термофоретических и конвективных сил позволяет вращать микропропеллер в водной среде» («a combination of surface plasmon resonance, thermophoretic and convective forces enable rotation of the micropopeller in an aqueous environment») и «было обнаружено, что силы, обусловленные вектором Пойнтинга, возникающие при генерации электрического поля, и сила, возникающая при конвективном течении, возможны в водной среде при температуре 50 °C» («forces from the Poynting vector caused by electric field generation and the force from the convective current were found to be possible in a 50°C aqueous environment»). Таким образом, отчасти такие микропропеллеры, управляемые оптическими когерентными источниками, могут рассматриваться также как термоуправляемые, конвективно-управляемые или плазмонно-управляемые системы. Тем не менее, как правило, подобные структуры рассматриваются как "light driven" и как "non-reactive" микропропеллеры и микропропеллеры или микророторы и нанороторы (см. статью (Mitra, Basak, 2023), где «термофоретическая миграция и активная коллоидная динамика световых наноструктур» и «опосредованное поляризацией света выявление плазмонной

наноструктуры» рассмотрены, но соответствующие микропропеллеры и нанопрпеллеры называются «нерактивными» и «light driven»).

### 3.2. Акустическое управление

Известны также акустически управляемые/акустически активируемые вращающиеся микропропеллеры, приводимые в движение пузырьками воздуха («acoustically-controllable» /«acoustically-actuated bubble-powered») (Mohanty et al., 2021). По сути, в данном случае в качестве движущих сил могут рассматриваться не только и не столько движущие сигналы акустического поля<sup>1</sup>, сколько пузырьки в явлениях кавитации.

Нужно отметить, что микропропеллеры, приводимые в движение пузырьками воздуха и микророторы, приводимые в движение пузырьками, известны со второй половины 2000-х гг. (Kao et al., 2006, 2007; Jang et al., 2018), но, в действительности, сама концепция bubble powered microactuators зародилась ещё в первой половине 1990-х гг. (Lin, Pisano, 1994), а в работе L. Lin 1998 года (Lin, 1998) логично показывалось, что исследование механизмов образования микропузырьков открывает новые возможности для научных исследований в области теплопередачи в микромасштабе и проектировании микромашин, работающих за счет энергии пузырьков («Characterization of microbubble formation mechanisms leads to new scientific research in microscale heat transfer and provides design guidelines for bubble-powered micromachines»). С тех пор было создано много устройств на данных принципах управления и энергообеспечения, в частности, известные в англоязычной литературе как:

- Bubble-powered actuators (Dijkink et al., 2006);
- Bubble powered motors (Dincel et al., 2019; Zhou et al., 2020);
- //- micropumps (Jung, Kwak, 2007);
- //- microswimmers (Feng et al., 2016; Liu et al., 2021).

Микропропеллеры с элементами, приводимыми в движение акустическим способом за счет пузырьков, являются лишь частным случаем таких микроструктур или микроустройств, работающих за счет пузырьков.

### 3.3. Магнитное управление.

Магнитное управление динамикой микророторов, микроротаторов, микропропеллеров – одна из наиболее простых форм управления ротационной динамикой, не требующая пояснений (за исключение случаев фотоманнитных, акустоманнитных и других гибридных механизмов управления), известная со времен опытов Фарадея. Магнитно-управляемые роторы/пропеллеры могут быть произвольной формы и динамичной симметрии – для обеспечения переключения между направлениями движения/траекториями перемещения (Vach et al., 2015a; Vach et al., 2015b; Codutti et al., 2018; Bachmann et al., 2019). В то же время возможны нелинейные магнитные микропропеллеры, применимые в практике (например, прекрасные разработки Потсдамского университета (Bachmann, 2019)). Принципиальной особенностью и отличительной чертой магнитного управления, в силу давности его использования в науке и технике (ещё Генрих Альтшулер имел склонность к описанию работы «феполей» на базе магнитных полей в 1970-е гг.), является его готовность к внедрению в практику и высшая, относительно многих других полевых форм управления актуаторами, готовность к вводу в практические инженерные конструкции (Schwarz et al., 2016). На основе магнитных систем управления можно не только обеспечивать регуляцию движения в среде, но и обеспечивать адресную доставку в биомедицине, тераностике или персонализированной фармакологии, использующую принцип управляемых магнитным

<sup>1</sup> Хотя разнообразные акустически активные динамические агенты, такие как «микроплавательные» структуры (Ahmed et al., 2015, 2016; Ren et al., 2019; Chen et al., 2019; Liu, Ruan, 2020; Cui et al., 2021; Katuri et al., 2022; Liu et al., 2023), (микро)актуаторы и микророботы (Aghakhani et al., 2020; Xiao et al., 2022) хорошо известны и применимы не только для гетерогенных, но и для частично упорядоченных сред, а разнообразие гибридных систем, включающих управление или энергообеспечение этих систем энергией акустического поля, крайне велико и включает в себя акустоманнитные и оптоакустические, а также электроакустические вариации (Ahmed et al., 2017, Ahmed et al., 2021; Chen et al., 2019a; Tang et al., 2019).

полем *microswimmers/nanoswimmers*, в том числе - на основе самоорганизующихся магнитных микропропеллеров (*self-assembled magnetic micropropellers*) (Calero et al., 2018). За счет возникновения гидродинамических связей между магнитно-управляемых и магнитно-активируемых микропропеллеров в рое становится возможным создание систем роевого интеллекта и мультиагентных систем типа “*swarm robotics*”/“*swarm intelligence*” на основе роев автономных коллективных агентов с магнитными принципами управления (Martinez-Pedrero et al., 2018).

### **3.4. Химические методы управления динамикой**

Различные химические методы управления динамикой, начиная с *ion micropropellers* (ионных микропропеллеров) 1980-х гг. (Sandonato et al., 1986) (которые, при использовании ионных пучков уже становятся физическими, а не химическими по природе воздействия, как и обычные управляемые электростатикой или ионными пучками микропропеллеры или микророторы (Elfimov et al., 2025; Gradov et al., 2025a; Gradov et al., 2025b), заканчивая многофункциональные хиральные микропропеллеры с химическим ротором, применяемые для транспортировки и манипулирования ультрамикроскопическими грузами (McGovern et al., 2023). По терминологии эти системы относятся к микропропеллерам, но, по принципу организации и управляемости, они относятся почти к нанотехнологиям в футуристической трактовке Дрекслера двадцатилетней давности.

#### **3.4.1. В том числе каталитические микропропеллеры и микророторы.**

Частным случаем этого являются каталитические, в частности, энзиматические каталитические микропропеллеры (Walker et al., 2015). В области феноменологического и эпифеноменологического моделирования энзиматического катализа возможно применять как органические, так и неорганические носители и моделирующие структуры (известные с 1960-х гг. обзорные работы Николаева по биокатализаторам и их моделям). В связи с этим, модели каталитически движимых микропропеллеров даже при «энзимологии в прототипе» могут являться неорганическими или крайне далекими от биологии формами продуктов синтетической органической или металлорганической химии. При этом, в ряде случаев, в основе микроскопической/субмикроскопической подвижности таких систем лежит уровень наноразмерной подвижности неорганических кластеров и металлолигандов, в силу чего, в сущности, при наблюдении физической подвижности на микроуровне, мы сталкиваемся с подлежащими и обеспечивающими механизмами на уровнях от фемтохимии (в аргументе времени) до динамики наноструктур (в аргументе характеристических масштабов) (Gao, Wang, 2004; Fortenberry, 2016; Kephart et al., 2020).

### **3.5. Биологические и биоуправляемые микророторы/микророторы и микропропеллеры.**

Отметим, что несмотря на обилие биомедприменений (Jagani, Untaroiu, 2017; Wu et al., 2018; Schnichels et al., 2022), специально не выделяются специфические биологические (по методам управления) микророторы и микропропеллеры – так как они базируются на обычно редуционистски трактуемых принципах физической химии / химической физики / обычной физики и биофизики. Это дает возможности бионического / биомиметического воспроизведения их активности. Как пример данных редуционистских разработок можно рассматривать недавнюю статью «*Synthetic and living micropropellers for convection-enhanced nanoparticle transport*» в «*Science advances*» (Schuerle et al., 2019).

#### **3.5.1. Проблема скейлинга и размерности моделей в контексте проблемы функционального биоподобия и биомимезиса.**

Строго говоря, принципиальным, с точки зрения зарядовых и размерных эффектов и критериев подобия, является масштаб, на котором происходят управляемые явления, в силу чего явления, реализуемые на наноуровне, не имеет смысла сводить к микромасштабам, даже если реализующие их в конкретном случае устройства являются микромасштабными или более крупными системами. Так, говоря о каталитических микропропеллерах, можно, апеллируя к масштабам проявления каталитических механизмов, сразу сводить проблему к феноменологии наноуровня (Kephart et al., 2019), точно также, как и, говоря о хиральных

микропропеллерах, мы должны оперировать на уровне проявления хиральности, то есть, начиная с нануровня по характеристическим масштабам самосборки (Zheng et al., 2023).

Соответственно, переходя к бионическим критериям воспроизведения механизмов динамики таких молекулярных наномашин и супрамолекулярных машин, мы не сделаем логических ошибок экстраполяции и ложного, по сути, реифицирования, а воспроизведем первичные каталитические и нелинейно-(био)-физические механизмы и через это получим достаточную степень механического подобия в действии искусственных и естественных биологических машин или микропропеллеров с одинаковыми вепольными движущими стимулами. При этом необходим будет учет всего комплекса критериев подобия и теории размерности, применимых в моделировании. Так, в случае моделирования бактериального флагелляционного движения, обеспечивающего в бактериальных клетках действия нанопротопеллеров (Soong et al., 2001; Gupta et al., 2006; Mittal et al., 2011), целесообразен учет не только механики, но и гидродинамики, биоэнергетической электрогенной машинерии, тейнохимических явлений в полимерах и конформационной подвижности соответствующих биомакромолекул или их моделей – в противном случае, построенные без соблюдения подобия на уровне базовых механизмов модели не только не будут обладать должным КПД прототипа, но и не будут обеспечивать в полноте все феномены прототипа (неизбежно связанные физически с порождением моделируемого эффекта с учетом критериев подобия и эффективности действия в конкретной среде (пример: гидродинамика и реология (Wada, 2009; Schamel et al., 2014; Walker et al., 2015))).

#### **4. Проблема адекватности методов изготовления микророторов.**

Отсюда следует необходимость перестройки технологических процессов изготовления микроротационных устройств. И если в вопросах «минипропеллеростроения», относящихся к промышленно производимым миниротаторам, представляется возможным использование классических методов 3D изготовления и обработки деталей (достижение минимальных микрошероховатостей с помощью шлифовки и т.д. (Takeuchi et al., 1997; Cîrciu et al., 2009; Cooke, et al., 2023)), то в случае нанопротопеллеров и нанороторов классическими являются проблемы самоорганизации или самосборки, а возникновение таких деталей, как правило, связано с естественными или воспроизводимыми в лаборатории физическими процессами уровня агрегации, адгезии и когезии, агломерации, агглютинации и т.д. одиночных частиц разной формы. Стандартные подходы к динамическому тестированию подобных структур как пропеллеров и роторов, заимствуемые из «сходно звучащих» отраслей техники, обычно не являются применимыми к реальным естественно самоорганизующимся пропеллерам и роторам в декамикронной, микронной и субмикронной/ультрамикроскопической областях (Deters, Selig, 2008; Smedresman et al., 2011). Принципы дизайна 3D пропеллеров на уровне «микроустройств» (фактически как рекламного термина, основанного на использовании при их изготовлении принципов микро и, изредка, нанотехнологии) зачастую не являются применимыми в массовой сборке и обеспечении функции реальных микропропеллеров, в силу ограничений микрогидродинамики (по критериям подобия) и размерных эффектов, а также ряда специфических причин (Lee et al., 2007; Zhang et al., 2021). Управляемость их, как и их изготовление, лимитируется вышерассмотренными физическими ограничениями и критериями подобия. Поэтому выбор механизмов технологической обработки и управления динамикой микророторов равнозначно должен исходить из физических/энергетических и масштабных (сопоставимость размеров объекта как «принимающей антенны» с длиной волны управляющего сигнала конкретного диапазона и т. д.). Все эти проблемы могут быть эффективно решены в рамках вепольного анализа.

#### **5. Благодарности**

Данная заметка построена на основе небольшого популярного англоязычного доклада, сделанного автором на виртуальном семинаре по ТРИЗ несколько лет назад и вызвавшего у слушателей много вопросов, перешедших в активную и позитивную дискуссию с коллегами. Автор искренне благодарит слушателей, проявивших интерес к данной постановке задачи за стимулирование интеллектуальной работы в данном направлении.

**Литература**

- Aghakhani et al., 2020** – Aghakhani, A., Yasa, O., Wrede, P., Sitti, M. Acoustically powered surface-slipping mobile microrobots // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. 117(7): 3469-3477.
- Ahmed et al., 2015** – Ahmed D., Lu M., Nourhani A., Lammert P.E., Stratton Z., Muddana H.S., Crespi V.H., Huang T.J. (2015). Selectively manipulable acoustic-powered microswimmers // *Scientific reports*. 2015. 5(1): 9744.
- Ahmed et al., 2016** – Ahmed D., Baasch T., Jang B., Pane S., Dual J., Nelson B.J. (2016). Artificial swimmers propelled by acoustically activated flagella // *Nano letters*. 2016. 16(8): 4968-4974.
- Ahmed et al., 2017** – Ahmed D., Dillinger C., Hong A., Nelson B.J. Artificial acousto-magnetic soft microswimmers // *Advanced Materials Technologies*. 2017. 2(7): 1700050.
- Ahmed et al., 2021** – Ahmed D., Sukhov A., Hauri D., Rodrigue D., Maranta G., Harting J., Nelson B.J. Bioinspired acousto-magnetic microswarm robots with upstream motility // *Nature machine intelligence*. 2021. 3(2): 116-124.
- Bachmann et al., 2019** – Bachmann F., Bente K., Codutti A., Faivre D. Using shape diversity on the way to structure-function designs for magnetic micropropellers // *Physical Review Applied*. 2019. 11(3): 034039.
- Bachmann, 2019** – Bachmann F. Non-linearity of magnetic micropropellers (Doctoral dissertation, Universität Potsdam). 2019.
- Bartholdy, 1982** – Bartholdy J. On measuring time-averaged velocities in open channel flow // *Sedimentology*. 1982. 29(1): 91-94.
- Basco et al., 1982** – Basco D.R., Svendsen I.A., Christensen J. 3. Measurements with a bi-directional micro-propeller current meter // *Inst. of Hydrodyn. and Hydraulic Engng. (ISVA), Tech. Univ. Denmark, Prog. Rep.* 1982. 57: 25-32.
- Boscoianu, Cîrciu, 2011** – Boscoianu M., Cîrciu I. An analysis of the efficiency of the functional matching between a flying wing MAV airframe and different types of micro propellers // *Incas Bulletin*. 2011. 3(1): 23-29.
- Brolsma, 1973** – Brolsma P. Temperature correction for micro propeller measurements // *Dutch Waterloopkundig Laboratorium Informatie H.* 1973. 18: 1973.
- Calero et al., 2018** – Calero C., García Torres J.M., Sagués Mestres F., Pagonabarraga I., Tierno P. Swimming modes of self-assembled magnetic micropropeller // *BIMS 2018: Bio-inspired magnetic systems*. 2018. Pp. 18-18.
- Cederwall, 1971** – Cederwall K. A float diffusion study // *Water Research*. 1971. 5(10): 889-907.
- Chaumet, Billaudeau, 2007** – Chaumet P.C., Billaudeau C. Coupled dipole method to compute optical torque: Application to a micropropeller // *Journal of applied physics*. 2007. 101(2): 023106.
- Chen et al., 2019** – Chen Q., Liu F.W., Xiao Z., Sharma N., Cho S.K., Kim K. Ultrasound tracking of the acoustically actuated microswimmer // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2019. 66(11): 3231-3237.
- Chen et al., 2019a** – Chen X.Z., Liu J.H., Dong M., Müller L., Chatzipirpiridis G., Hu C., Terzopoulou A., Torlakcik H., Wang X., Mushtaq F., Puigmartí-Luis J. Magnetically driven piezoelectric soft microswimmers for neuron-like cell delivery and neuronal differentiation // *Materials Horizons*. 2019. 6(7): 1512-1516.
- Cîrciu et al., 2009** – Cîrciu I., Pahonie R., Boscoianu M. Considerations about the micro propeller design and its interaction with the aerodynamic surfaces // *Review of the Air Force Academy*. 2009. 1: 49.
- Codutti et al., 2018** – Codutti A., Bachmann F., Faivre D., Klumpp S. Bead-based hydrodynamic simulations of rigid magnetic micropropellers // *Frontiers in Robotics and AI*. 2018. 5: 109.
- Cooke et al., 2023** – Cooke J.P., Campbell M.F., Steager E.B., Bargatin I., Yim M.H., Park G.I. Numerical and experimental study on the addition of surface roughness to micro-propellers // *Physics of Fluids*. 2023. 35(11).
- Cui et al., 2021** – Cui M., Kim M., Weisensee P.B., Meacham J.M. Thermal considerations for microswimmer trap-and-release using standing surface acoustic waves // *Lab on a Chip*. 2021. 21(13): 2534-2543.

- Danko et al., 1959** – Danko S.F., Doxey W.L., McNaul J.P. The micro-module: a logical approach to microminiaturization / *Proceedings of the IRE*. 1959. 47(5): 894-903.
- Deters, Selig, 2008** – Deters R., Selig M. Static testing of micro propellers / *26th AIAA applied aerodynamics conference*. 2008, August. P. 6246.
- Dijkink et al., 2006** – Dijkink R.J., Van Der Dennen J.P., Ohl, C.D., Prosperetti A. The 'acoustic scallop': a bubble-powered actuator // *Journal of micromechanics and microengineering*. 2006. 16(8): 1653.
- Dincel et al., 2019** – Dincel O., Ueta T., Kameoka J. Acoustic driven microbubble motor device // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. 295: 343-347.
- Dung, 1995** – Dung P. TRIZ: inventive creativity based on the laws of systems development // *Creativity and Innovation Management*. 1995. 4(1): 19-29.
- Dung, 1997** – Dung P. Dialectical systems thinking for problem solving and decision making. / *The 7th International Conference On Thinking, National Institute of Education, Nanyang Technological University, Singapore*. 1997, June.
- Elfimov et al., 2025** – Elfimov A., Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Sergeev, A.I. Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents // *Advanced Structured Materials*. 2025. 221: 157-189.
- Elwood, 2016** – Elwood J. Optimization and Modeling of an Energy Harvesting Optical Micropropeller for Microfluidic Applications. (Honor Thesis; College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, State University of New York & SUNY Polytechnic Institute). 2016.
- Feng et al., 2016** – Feng J., Yuan J., Cho S.K.. 2-D steering and propelling of acoustic bubble-powered microswimmers // *Lab on a Chip*. 2016. 16(12): 2317-2325.
- Finkelstein, 1959** – Finkelstein M. Microminiaturization Techniques // *IRE Transactions on Production Techniques*. 1959. 5(1): 50-50.
- Fortenberry, 2016** – Fortenberry R.C. Analysis of a bicyclic, triple disulphide molecular nanopropeller // *RSC advances*. 2016. 6(49): 43509-43517.
- Gao, Wang, 2004** – Gao P.X., Wang Z.L. Nanopropeller arrays of zinc oxide // *Applied physics letters*. 2004. 84(15): 2883-2885.
- Gradov et al., 2025a** – Gradov O.V., Maklakova I.A., Sergeev A.I. Time-resolved scanning electron microscopy, time-resolved 2D FFT analysis and high-speed line scanning oscilloscopic measurements in electrostatic sand saltation registration // *Aspects in Mining & Mineral Science*. 2025. 14(3): 1745-1748.
- Gradov et al., 2025b** – Gradov O.V., Maklakova I.A., Sergeev A.I. Time-Resolved Scanning Electron Microscopy for Sand Saltation Measurements // *European Geographical Studies*. 2025. 12(1): 62-67.
- Gradov, 2025** – Gradov O.V. Novel approaches to 4D (time-resolved + position-sensitive) monitoring and controlled measurement of vacuum MEMS / MOEMS dynamics under the electron beam, based on the stroboscopic SEM and YMD-EM surface charge mapping / *World Congress on Intelligent Materials Technology (April 18-20, 2025; Zhengzhou, China) [Abstract Book]*, p. 14, Zhengzhou·China. 2025.
- Gupta et al., 2006** – Gupta R., Sharma M., Mittal A. Effects of membrane tension on nanopropeller driven bacterial motion // *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2006. 6(12): 3854-3862.
- Hansen, 1972** – Hansen E. Lagrangian characteristics of surface turbulence // *Journal of the Hydraulics Division*. 1972. 98(7): 1255-1273.
- Heller et al., 2013** – Heller J.E., van der Beek J., Dittmann C., Feldhusen J. A methodical approach for designing innovative products based on computer aided functional modeling / *DS 75-1: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies, Vol. 1: Design Processes, Seoul, Korea, 19-22.08. 2013*.
- Herwald, Angello, 1960** – Herwald S.W., Angello S.J. Integration of Circuit Functions into Solids: The trend in electronic circuit construction is toward microminiaturization and molecular electronics // *Science*. 1960. 132(3434): 1127-1133.
- Imamoto, 1972** – Imamoto H. On the basic characteristics of turbulence in free surface shear flows // *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 1972. 197: 83-91.

**Jagani, Untaroiu, 2017** – Jagani J., Untaroiu A. Design of a Dual Propeller Micro-Pump in Conjunction With Flared TCPC for Cavopulmonary Assist in Fontan Patients // *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vol. 58066. P. V01CT21A006. American Society of Mechanical Engineers. 2017, July.

**Jang et al., 2018** – Jang D., Jeon J., Chung S.K. Acoustic bubble-powered miniature rotor for wireless energy harvesting in a liquid medium // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018. 276: 296-303.

**Jensen, 1973** – Jensen P. Experimental Investigations of Breaking Waves Using a Micro-Propeller (Doctoral dissertation, M. Sc thesis (in Danish), ISVA, Techn. Univ., Denmark). 1973.

**Jonsson, 1965** – Jonsson I.G. On turbulence in open channel flow. Statistical theory applied to micropeller measurements // *Acta Polytechnica Scandinavica: Civil engineering and building construction series (Finnish Academy of Technical Sciences)*. 1965. 31: 3-49.

**Jonsson, 1980** – Jonsson I.G. A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers // *Ocean Engineering*. 1980. 7(1): 109-152.

**Jonsson, Carlsen, 1976** – Jonsson I.G., Carlsen N.A. Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer // *Journal of Hydraulic Research*. 1976. 14(1): 45-60.

**Jung, Kwak, 2007** – Jung J.Y., Kwak H.Y. Fabrication and testing of bubble powered micropumps using embedded microheater // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2007. 3: 161-169.

**Justesen, 1988** – Justesen P. Prediction of turbulent oscillatory flow over rough beds // *Coastal Engineering*. 1988. 12(3): 257-284.

**Kaliteevskii et al., 2021** – Kaliteevskii V., Bryksin M., Chechurin L.. TRIZ application for digital product design and management // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2021. 635: 245-255.

**Kao et al., 2006** – Kao J., Warren J., Xu J., Attinger D. A bubble-powered micro-rotor: Manufacturing, assembly and characterization // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2006, January. 47756: 611-615.

**Kao et al., 2007** – Kao J., Wang X., Warren J., Xu J., Attinger D. A bubble-powered micro-rotor: conception, manufacturing, assembly and characterization // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007. 17(12): 2454.

**Katuri et al., 2022** – Katuri J., Snezhko A., Sokolov A. Motility of acoustically powered micro-swimmers in a liquid crystalline environment // *Soft Matter*. 2022. 18(45): 8641-8646.

**Kephart et al., 2019** – Kephart J.A., Mitchell B.S., Chirila A., Anderton K.J., Rogers D., Kaminsky W., Velian A. Atomically defined nanopropeller Fe<sub>3</sub>Co<sub>6</sub>Se<sub>8</sub> (Ph2PNTol) 6: Functional model for the electronic metal-support interaction effect and high catalytic activity for carbodiimide formation // *Journal of the American Chemical Society*. 2019. 141(50): 19605-19610.

**Kephart et al., 2020** – Kephart J.A., Boggiano A.C., Kaminsky W., Velian A. Inorganic clusters as metalloligands: ligand effects on the synthesis and properties of ternary nanopropeller clusters // *Dalton Transactions*. 2020. 49(45): 16464-16473.

**Kim, 2014a** – Kim B.K. Optimization of Micro Hydro Propeller Turbine blade using NSGA-II // *The KSFM Journal of Fluid Machinery (한국유체기계학회 논문집)*. 2014. 17(4): 19-29.

**Kim, 2014b** – Kim B.K. Performance Characteristics of Micro Propeller Turbine // *The KSFM Journal of Fluid Machinery (한국유체기계학회 논문집)*. 2014. 17(3): 25-32.

**Kim, 2015** – Kim B.K. Development of a submerged propeller turbine for micro hydro power // *The KSFM Journal of Fluid Machinery (한국유체기계학회 논문집)*. 2015. 18(6): 45-56.

**Lee et al., 2007** – Lee K.H., Jeon Y.H., Kim K.H., Lee D.H., Lee K.T. Three-Dimensional Micro Propeller Design by Using Efficient Two Step Optimization // *Journal of Fluid Science and Technology*. 2007. 2(2): 334-345.

**Liimatainen, 1959** – Liimatainen T.M. Recent advances in the application of photolithographic techniques to semiconductor devices and microminiaturization / *Proceedings of the IEE-Part B: Electronic and Communication Engineering*. 1959. 106(15S): 385-390.

**Lin, 1998** – Lin L. Microscale thermal bubble formation: thermophysical phenomena and applications // *Microscale Thermophysical Engineering*. 1998. 2(2): 71-85.

**Lin, Pisano, 1994** – Lin L., Pisano A.P. Thermal bubble powered microactuators // *Microsystem Technologies*. 1994. 1: 51-58.

- Liu et al., 2021 – Liu F.W., Zhan Y., Cho S.K. Propulsion reversal in oscillating-bubble powered micro swimmer // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2021. 31(8): 084001.
- Liu et al., 2023 – Liu B., Zhang S., Yang J., Li D., Liu H. Acoustically driven microswimmer with real-time controllable motion direction // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2023. 396: 134603.
- Liu, Ruan, 2020 – Liu J., Ruan H. Modeling of an acoustically actuated artificial micro-swimmer // *Bioinspiration & Biomimetics*. 2020. 15(3): 036002.
- Martinez-Pedrero et al., 2018 – Martinez-Pedrero F., Navarro-Argemí E., Ortiz-Ambriz A., Pagonabarraga I., Tierno P. Emergent hydrodynamic bound states between magnetically powered micropropellers // *Science advances*. 2018. 4(1): eaap9379.
- McGovern et al., 2023 – McGovern A.D., Huang M.J., Wang J., Kapral R., Aranson I.S. Multifunctional Chiral Chemically-Powered Micropropellers for Cargo Transport and Manipulation // *Small*. 2023. 2304773.
- Mitra, Basak, 2023 – Mitra S., Basak M. Recent trends in non-reactive light driven Micro/nano propellers and rotors // *Applied Materials Today*. 2023. 31: 101748.
- Mittal et al., 2011 – Mittal A., Hasija V., Bhat V., Arora S., Sharma M., Gupta R. Bacterial Nanopropellers / *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. 2011. 11(448): 439-448. American Scientific Publishers.
- Mohanty et al., 2021 – Mohanty S., Zhang J., McNeill J.M., Kuenen T., Linde F.P., Rouwkema J., Misra S. Acoustically-actuated bubble-powered rotational micro-propellers // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021. 347: 130589.
- Muro, 2013 – Muro H. History and recent progress of MEMS physical sensors // *Advances in science and technology*. 2013. 81: 1-8.
- Nathanson, Wickstrom, 1965 – Nathanson H.C., Wickstrom R.A. A resonant-gate silicon surface transistor with high-Q band-pass properties // *Applied physics letters*. 1965. 7(4): 84-86.
- Park et al., 2012a – Park J., Kim Y., Kim B., Lee Y. Variable flow rate characteristics of a low micro propeller-type hydro turbine by CFD // *Abstracts of the Korean Society for New and Renewable Energy Conference (한국신. 재생에너지학회 학술대회 초록집)*. 2012. 145-145.
- Park et al., 2012b – Park J.H., Kim Y.T., Kim B.G., Lee Y.H. CFD analysis of a micro propeller-type hydro Turbine by varying the number of runner and guide vanes / *Proc. AFORE – 2012*. 2012. 237.
- Pedersen, 1969 – Pedersen F.B. Turbulence Measurement in Water by Means of Micro-Propellers // *Educations Fluid Mech. Bulletin*. 1969. 7.
- Plate, Bennett, 1969 – Plate E.J., Bennett J.P. Rotary flow meter as turbulence transducer // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1969. 95(6): 1307-1329.
- Ranjanagi et al., 2013 – Ranjanagi S., Nagpurwala Q.H., Subbaramu S. Numerical Studies on the Effect of Design Trim on Aerodynamic Performance of a Micro Propeller for MAV Application / *Proc. ASME*. 2013, December. 35161: V001T01A015.
- Rao et al., 2017 – Rao Q., Si T., Wu Z., Xuan M., He Q. A light-activated explosive micropropeller // *Scientific Reports*. 2017. 7(1): 4621.
- Ren et al., 2019 – Ren L., Nama N., McNeill J.M., Soto F., Yan Z., Liu W., Wang W., Wang J., Mallouk T.E. 3D steerable, acoustically powered microswimmers for single-particle manipulation // *Science advances*. 5(10): eaax3084.
- Sandonato et al., 1986 – Sandonato G.M., Ferreira J.L., Ferreira J.G., Ludwig G.O. Preliminary results of an ion micropropeller // *Cienc. Cult. (Sao Paulo), Supl.; (Brazil)*. 1986. 38(7).
- Sandonato et al., 1986a – Sandonato G.M., Ferreira J.L., Ferreira J.G., Ludwig G.O. Preliminary results of an ion micropropeller // *Ciencia e Cultura. Suplemento*. 1986. 38(7): 392.
- Schamel et al., 2014 – Schamel D., Mark A.G., Gibbs J.G., Miksch C., Morozov K.I., Leshansky A.M., Fischer P. Nanopropellers and their actuation in complex viscoelastic media // *ACS nano*. 2014. 8(9): 8794-8801.
- Schnichels et al., 2022 – Schnichels S., Peter F., Kadiri V.M., Muehl H., Löscher M., Fischer P., Hurst J. Customized magnetic nanopropellers grant targeted delivery to the retina // *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2022. 63(7): 4150-F0142.
- Schuerle et al., 2019 – Schuerle S., Soleimany A.P., Yeh T., Anand G.M., Häberli M., Fleming H.E., Mirkhani N., Qiu F., Hauert S., Wang X., Nelson B.J. Synthetic and living

micropropellers for convection-enhanced nanoparticle transport // *Science advances*. 2019. 5(4): eaav4803.

[Schwarz et al., 2016](#) – Schwarz L., Medina-Sánchez M., Schmidt O.G. Easily scalable high speed magnetic micropropellers / *2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. 2016, July. Pp. 1-4. IEEE.

[Shih, 2016](#) – Shih J. Optimization and Modeling of an Energy Harvesting Micro-propeller for Microfluidic Applications (Honor Thesis; College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, State University of New York & SUNY Polytechnic Institute). 2016.

[Singh, Nestmann, 2009](#) – Singh P., Nestmann F. Experimental optimization of a free vortex propeller runner for micro hydro application // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2009. 33(6): 991-1002.

[Smedresman et al., 2011](#) – Smedresman A., Yeo D., Shyy W. Design, fabrication, analysis, and dynamic testing of a micro air vehicle propeller / *29th AIAA applied aerodynamics conference*. 2011. P. 3817.

[Soong et al., 2001](#) – Soong R.K., Neves H.P., Schmidt J.J., Montemagno C.D. Engineering Issues in the Fabrication of a Hybrid Nano-Propeller System Powered by F 1-ATPase // *Biomedical Microdevices*. 2001. 3: 71-73

[Souchkov, 2016](#) – Souchkov V. A Glossary of Essential TRIZ Terms. Research and Practice on the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) Linking Creativity, Engineering and Innovation. 2016. Pp. 265-281.

[Takeuchi et al., 1997](#) – Takeuchi Y., Sawada K., Sata T. Manufacture of micropropellers by means of ultraprecision milling machine // *Journal of Robotics and Mechatronics*. 1997. 9(6): 475-479.

[Tang et al., 2019](#) – Tang S., Zhang F., Zhao J., Talaat W., Soto F., Karshalev E., Chen C., Hu Z., Lu X., Li J., Lin Z. (2019). Structure-dependent optical modulation of propulsion and collective behavior of acoustic/light-driven hybrid microbowls // *Advanced Functional Materials*. 2019. 29(23): 1809003.

[Vach et al, 2015a](#) – Vach, P.J., Fratzl P., Klumpp S., Faivre D. Fast magnetic micropropellers with random shapes // *Nano letters*. 2015. 15(10): 7064-7070.

[Vach et al, 2015b](#) – Vach P.J., Klumpp S., Faivre D. Steering magnetic micropropellers along independent trajectories // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2015. 49(6): 065003.

[Wada, 2009](#) – Wada H. A semiflexible polymer ring acting as a nano-propeller // *The European Physical Journal E*. 2009. 28: 11-16.

[Walker et al., 2015](#) – Walker D., Käs Dorf B.T., Jeong H.H., Lieleg O., Fischer P. Enzymatically active biomimetic micropropellers for the penetration of mucin gels // *Science Advances*. 2015. 1(11): e1500501.

[Walker et al., 2015a](#) – Walker D., Kubler M., Morozov K.I., Fischer P., Leshansky A.M. (2015). Optimal length of low Reynolds number nanopropellers // *Nano letters*. 2015. 15(7): 4412-4416.

[Wilfinger et al., 1968](#) – Wilfinger R.J., Bardell P.H., Chhabra D.S. The resonistor: a frequency selective device utilizing the mechanical resonance of a silicon substrate // *IBM Journal of Research and Development*. 1968. 12(1): 113-118.

[Wu et al., 2018](#) – Wu Z., Troll J., Jeong H.H., Wie Q., Stang M., Ziemssen F., Wang Z., Dong M., Schnichels S., Qiu T., Fischer P. A swarm of slippery micropropellers penetrates the vitreous body of the eye // *Science advances*. 2018. 4(11): eaat4388.

[Xiao et al., 2022](#) – Xiao Y., Zhang J., Fang B., Zhao X., Hao N. Acoustics-actuated microrobots // *Micromachines*. 2022. 13(3): 481.

[Yang, Chou, 2009](#) – Yang S.F., Chou J.H. A mechatronic positioning system actuated using a micro DC-motor-driven propeller-thruster // *Mechatronics*. 2009. 19(6): 912-926.

[Yokosi, 1967](#) – Yokosi S. The structure of river turbulence // *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*. 1967. 17(2): 1-29.

[Zhang et al., 2021](#) – Zhang Y., Tan X., Li X., Lv P., Huang T.Y., Yang J., Duan H. 3D Propulsions of Rod-Shaped Micropropellers // *Advanced Intelligent Systems*. 2021. 3(11): 2100083.

[Zheng et al., 2023](#) – Zheng Y., Li X., Huang L., Li X., Yang S., Wang Q., Du J., Wang Y., Ding W., Gao B., Chen H. Homochiral Nanopropeller via Chiral Active Surface Growth // *Journal of the American Chemical Society*. 2023. 146(1): 410-418.

Zhou et al., 2020 – Zhou C., Gao C., Lin Z., Wang D., Li Y., Yuan Y., Zhu B., He Q. Autonomous motion of bubble-powered carbonaceous nanoflask motors // *Langmuir*. 2020. 36(25): 7039-7045.

## References

Aghakhani et al., 2020 – Aghakhani, A., Yasa, O., Wrede, P., Sitti, M. (2020). Acoustically powered surface-slipping mobile microrobots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(7): 3469-3477.

Ahmed et al., 2015 – Ahmed, D., Lu, M., Nourhani, A., Lammert, P.E., Stratton, Z., Muddana, H.S., Crespi, V.H., Huang, T.J. (2015). Selectively manipulable acoustic-powered microswimmers. *Scientific reports*. 5(1): 9744.

Ahmed et al., 2016 – Ahmed, D., Baasch, T., Jang, B., Pane, S., Dual, J., Nelson, B.J. (2016). Artificial swimmers propelled by acoustically activated flagella. *Nano letters*. 16(8): 4968-4974.

Ahmed et al., 2017 – Ahmed, D., Dillinger, C., Hong, A., Nelson, B.J. (2017). Artificial acousto-magnetic soft microswimmers. *Advanced Materials Technologies*. 2(7): 1700050.

Ahmed et al., 2021 – Ahmed, D., Sukhov, A., Hauri, D., Rodrigue, D., Maranta, G., Harting, J., Nelson, B.J. (2021). Bioinspired acousto-magnetic microswarm robots with upstream motility. *Nature machine intelligence*. 3(2): 116-124.

Bachmann et al., 2019 – Bachmann, F., Bente, K., Codutti, A., Faivre, D. (2019). Using shape diversity on the way to structure-function designs for magnetic micropropellers. *Physical Review Applied*. 11(3): 034039.

Bachmann, 2019 – Bachmann, F. (2019). Non-linearity of magnetic micropropellers (Doctoral dissertation, Universität Potsdam).

Bartholdy, 1982 – Bartholdy, J. (1982). On measuring time-averaged velocities in open channel flow. *Sedimentology*. 29(1): 91-94.

Basco et al., 1982 – Basco, D.R., Svendsen, I.A., Christensen, J. (1982). 3. Measurements with a bi-directional micro-propeller current meter. *Inst. of Hydrodyn. and Hydraulic Engng. (ISVA), Tech. Univ. Denmark, Prog. Rep.* 57: 25-32.

Boscoianu, Cîrciu, 2011 – Boscoianu, M., Cîrciu, I. (2011). An analysis of the efficiency of the functional matching between a flying wing MAV airframe and different types of micro propellers. *Incas Bulletin*. 3(1): 23-29.

Brolsma, 1973 – Brolsma, P. (1973). Temperature correction for micro propeller measurements. *Dutch Waterloopkundig Laboratorium Informatie H*. 18: 1973.

Calero et al., 2018 – Calero, C., García Torres, J.M., Sagués Mestres, F., Pagonabarraga, I., Tierno, P. (2018). Swimming modes of self-assembled magnetic micropropeller. *BIMS 2018: Bio-inspired magnetic systems*. Pp. 18-18.

Cederwall, 1971 – Cederwall, K. (1971). A float diffusion study. *Water Research*. 5(10): 889-907.

Chaumet, Billaudeau, 2007 – Chaumet, P.C., Billaudeau, C. (2007). Coupled dipole method to compute optical torque: Application to a micropropeller. *Journal of applied physics*. 101(2): 023106.

Chen et al., 2019 – Chen, Q., Liu, F. W., Xiao, Z., Sharma, N., Cho, S. K., Kim, K. (2019). Ultrasound tracking of the acoustically actuated microswimmer. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 66(11): 3231-3237.

Chen et al., 2019a – Chen, X.Z., Liu, J.H., Dong, M., Müller, L., Chatzipirpiridis, G., Hu, C., Terzopoulou, A., Torlakcik, H., Wang, X., Mushtaq, F., Puigmartí-Luis, J. (2019). Magnetically driven piezoelectric soft microswimmers for neuron-like cell delivery and neuronal differentiation. *Materials Horizons*. 6(7): 1512-1516.

Cîrciu et al., 2009 – Cîrciu, I., Pahonie, R., Boscoianu, M. (2009). Considerations about the micro propeller design and it's interaction with the aerodynamic surfaces. *Review of the Air Force Academy*. 1: 49.

Codutti et al., 2018 – Codutti, A., Bachmann, F., Faivre, D., Klumpp, S. (2018). Bead-based hydrodynamic simulations of rigid magnetic micropropellers. *Frontiers in Robotics and AI*. 5: 109.

Cooke et al., 2023 – Cooke, J.P., Campbell, M.F., Steager, E.B., Bargatin, I., Yim, M.H., Park, G.I. (2023). Numerical and experimental study on the addition of surface roughness to micro-propellers. *Physics of Fluids*. 35(11).

- Cui et al., 2021 – Cui, M., Kim, M., Weisensee, P.B., Meacham, J.M. (2021). Thermal considerations for microswimmer trap-and-release using standing surface acoustic waves. *Lab on a Chip*. 21(13): 2534-2543.
- Danko et al., 1959 – Danko, S.F., Doxey, W.L., McNaul, J.P. (1959). The micro-module: a logical approach to microminiaturization. *Proceedings of the IRE*. 47(5): 894-903.
- Deters, Selig, 2008 – Deters, R., Selig, M. (2008, August). Static testing of micro propellers. *26th AIAA applied aerodynamics conference*. P. 6246.
- Dijkink et al., 2006 – Dijkink, R.J., Van Der Dennen, J.P., Ohl, C.D., Prosperetti, A. (2006). The ‘acoustic scallop’: a bubble-powered actuator. *Journal of micromechanics and microengineering*. 16(8): 1653.
- Dincel et al., 2019 – Dincel, O., Ueta, T., Kameoka, J. (2019). Acoustic driven microbubble motor device. *Sensors and Actuators A: Physical*. 295: 343-347.
- Dung, 1995 – Dung, P. (1995). TRIZ: inventive creativity based on the laws of systems development. *Creativity and Innovation Management*. 4(1): 19-29.
- Dung, 1997 – Dung, P. (1997, June). Dialectical systems thinking for problem solving and decision making. *The 7th International Conference On Thinking, National Institute of Education, Nanyang Technological University, Singapore*.
- Elfimov et al., 2025 – Elfimov, A., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Sergeev, A.I. (2025). Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents. *Advanced Structured Materials*. 221: 157-189.
- Elwood, 2016 – Elwood, J. (2016). Optimization and Modeling of an Energy Harvesting Optical Micropropeller for Microfluidic Applications. (Honor Thesis; College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, State University of New York & SUNY Polytechnic Institute).
- Feng et al., 2016 – Feng, J., Yuan, J., Cho, S.K. (2016). 2-D steering and propelling of acoustic bubble-powered microswimmers. *Lab on a Chip*. 16(12): 2317-2325.
- Finkelstein, 1959 – Finkelstein, M. (1959). Microminiaturization Techniques. *IRE Transactions on Production Techniques*. 5(1): 50-50.
- Fortenberry, 2016 – Fortenberry, R.C. (2016). Analysis of a bicyclic, triple disulphide molecular nanopropeller. *RSC advances*. 6(49): 43509-43517.
- Gao, Wang, 2004 – Gao, P.X., Wang, Z.L. (2004). Nanopropeller arrays of zinc oxide. *Applied physics letters*. 84(15): 2883-2885.
- Gradov et al., 2025a – Gradov, O.V., Maklakova, I.A., Sergeev, A.I. (2025). Time-resolved scanning electron microscopy, time-resolved 2D FFT analysis and high-speed line scanning oscilloscopic measurements in electrostatic sand saltation registration. *Aspects in Mining & Mineral Science*. 14(3): 1745-1748.
- Gradov et al., 2025b – Gradov, O.V., Maklakova, I.A., Sergeev, A.I. (2025). Time-Resolved Scanning Electron Microscopy for Sand Saltation Measurements. *European Geographical Studies*. 12(1): 62-67.
- Gradov, 2025 – Gradov, O.V. (2025). Novel approaches to 4D (time-resolved + position-sensitive) monitoring and controlled measurement of vacuum MEMS / MOEMS dynamics under the electron beam, based on the stroboscopic SEM and YMD-EM surface charge mapping. *World Congress on Intelligent Materials Technology (April 18-20, 2025; Zhengzhou, China) [Abstract Book]*, p. 14, Zhengzhou·China.
- Gupta et al., 2006 – Gupta, R., Sharma, M., Mittal, A. (2006). Effects of membrane tension on nanopropeller driven bacterial motion. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 6(12): 3854-3862.
- Hansen, 1972 – Hansen, E. (1972). Lagrangian characteristics of surface turbulence. *Journal of the Hydraulics Division*. 98(7): 1255-1273.
- Heller et al., 2013 – Heller, J.E., van der Beek, J., Dittmann, C., Feldhusen, J. (2013). A methodical approach for designing innovative products based on computer aided functional modelling. *DS 75-1: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies, Vol. 1: Design Processes, Seoul, Korea, 19-22.08. 2013*.
- Herwald, Angello, 1960 – Herwald, S.W., Angello, S.J. (1960). Integration of Circuit Functions into Solids: The trend in electronic circuit construction is toward microminiaturization and molecular electronics. *Science*. 132(3434): 1127-1133.

- Imamoto, 1972** – Imamoto, H. (1972). On the basic characteristics of turbulence in free surface shear flows. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 197: 83-91.
- Jagani, Untaroiu, 2017** – Jagani, J., Untaroiu, A. (2017, July). Design of a Dual Propeller Micro-Pump in Conjunction With Flared TCPC for Cavopulmonary Assist in Fontan Patients. *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 58066: V01CT21A006. American Society of Mechanical Engineers.
- Jang et al., 2018** – Jang, D., Jeon, J., Chung, S.K. (2018). Acoustic bubble-powered miniature rotor for wireless energy harvesting in a liquid medium. *Sensors and Actuators A: Physical*. 276: 296-303.
- Jensen, 1973** – Jensen, P. (1973). Experimental Investigations of Breaking Waves Using a Micro-Propeller (Doctoral dissertation, M. Sc thesis (in Danish), ISVA, Techn. Univ., Denmark).
- Jonsson, 1965** – Jonsson, I.G. (1965). On turbulence in open channel flow. Statistical theory applied to micropropeller measurements. *Acta Polytechnica Scandinavica: Civil engineering and building construction series (Finnish Academy of Technical Sciences)*. 31: 3-49.
- Jonsson, 1980** – Jonsson, I.G. (1980). A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers. *Ocean Engineering*. 7(1): 109-152.
- Jonsson, Carlsen, 1976** – Jonsson, I.G., Carlsen, N.A. (1976). Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer. *Journal of Hydraulic Research*. 14(1): 45-60.
- Jung, Kwak, 2007** – Jung, J.Y., Kwak, H.Y. (2007). Fabrication and testing of bubble powered micropumps using embedded microheater. *Microfluidics and Nanofluidics*. 3: 161-169.
- Justesen, 1988** – Justesen, P. (1988). Prediction of turbulent oscillatory flow over rough beds. *Coastal Engineering*. 12(3): 257-284.
- Kaliteevskii et al., 2021** – Kaliteevskii, V., Bryksin, M., Chechurin, L. (2021). TRIZ application for digital product design and management. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 635: 245-255.
- Kao et al., 2006** – Kao, J., Warren, J., Xu, J., Attinger, D. (2006, January). A bubble-powered micro-rotor: Manufacturing, assembly and characterization. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 47756: 611-615.
- Kao et al., 2007** – Kao, J., Wang, X., Warren, J., Xu, J., Attinger, D. (2007). A bubble-powered micro-rotor: conception, manufacturing, assembly and characterization. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 17(12): 2454.
- Katuri et al., 2022** – Katuri, J., Snezhko, A., Sokolov, A. (2022). Motility of acoustically powered micro-swimmers in a liquid crystalline environment. *Soft Matter*. 18(45): 8641-8646.
- Kephart et al., 2019** – Kephart, J.A., Mitchell, B.S., Chirila, A., Anderton, K.J., Rogers, D., Kaminsky, W., Velian, A. (2019). Atomically defined nanopropeller Fe<sub>3</sub>Co<sub>6</sub>Se<sub>8</sub> (Ph<sub>2</sub>PNTol) 6: Functional model for the electronic metal–support interaction effect and high catalytic activity for carbodiimide formation. *Journal of the American Chemical Society*. 141(50): 19605-19610.
- Kephart et al., 2020** – Kephart, J.A., Boggiano, A.C., Kaminsky, W., Velian, A. (2020). Inorganic clusters as metalloligands: ligand effects on the synthesis and properties of ternary nanopropeller clusters. *Dalton Transactions*. 49(45): 16464-16473.
- Kim, 2014a** – Kim, B.K. (2014). Optimization of Micro Hydro Propeller Turbine blade using NSGA-II. *The KSFM Journal of Fluid Machinery (한국유체기계학회 논문집)*. 17(4): 19-29.
- Kim, 2014b** – Kim, B.K. (2014). Performance Characteristics of Micro Propeller Turbine. *The KSFM Journal of Fluid Machinery (한국유체기계학회 논문집)*. 17(3): 25-32.
- Kim, 2015** – Kim, B.K. (2015). Development of a submerged propeller turbine for micro hydro power. *The KSFM Journal of Fluid Machinery (한국유체기계학회 논문집)*. 18(6): 45-56.
- Lee et al., 2007** – Lee, K.H., Jeon, Y.H., Kim, K.H., Lee, D.H., Lee, K.T. (2007). Three-Dimensional Micro Propeller Design by Using Efficient Two Step Optimization. *Journal of Fluid Science and Technology*. 2(2): 334-345.
- Liimatainen, 1959** – Liimatainen, T.M. (1959). Recent advances in the application of photolithographic techniques to semiconductor devices and microminiaturization. *Proceedings of the IEE-Part B: Electronic and Communication Engineering*. 106(15S): 385-390.
- Lin, 1998** – Lin, L. (1998). Microscale thermal bubble formation: thermophysical phenomena and applications. *Microscale Thermophysical Engineering*. 2(2): 71-85.

- [Lin, Pisano, 1994](#) – Lin, L., Pisano, A.P. (1994). Thermal bubble powered microactuators. *Microsystem Technologies*. 1: 51-58.
- [Liu et al., 2021](#) – Liu, F.W., Zhan, Y., Cho, S.K. (2021). Propulsion reversal in oscillating-bubble powered micro swimmer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 31(8): 084001.
- [Liu et al., 2023](#) – Liu, B., Zhang, S., Yang, J., Li, D., Liu, H. (2023). Acoustically driven microswimmer with real-time controllable motion direction. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 396: 134603.
- [Liu, Ruan, 2020](#) – Liu, J., Ruan, H. (2020). Modeling of an acoustically actuated artificial micro-swimmer. *Bioinspiration & Biomimetics*. 15(3): 036002.
- [Martinez-Pedrero et al., 2018](#) – Martinez-Pedrero, F., Navarro-Argemí, E., Ortiz-Ambriz, A., Pagonabarraga, I., Tierno, P. (2018). Emergent hydrodynamic bound states between magnetically powered micropropellers. *Science advances*. 4(1): eaap9379.
- [McGovern et al., 2023](#) – McGovern, A.D., Huang, M.J., Wang, J., Kapral, R., Aranson, I.S. (2023). Multifunctional Chiral Chemically-Powered Micropropellers for Cargo Transport and Manipulation. *Small*. 2304773.
- [Mitra, Basak, 2023](#) – Mitra, S., Basak, M. (2023). Recent trends in non-reactive light driven Micro/-nano propellers and rotors. *Applied Materials Today*. 31: 101748.
- [Mittal et al., 2011](#) – Mittal, A., Hasija, V., Bhat, V., Arora, S., Sharma, M., Gupta, R. (2011). Bacterial Nanopropellers. *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. 11(448): 439-448. American Scientific Publishers.
- [Mohanty et al., 2021](#) – Mohanty, S., Zhang, J., McNeill, J.M., Kuenen, T., Linde, F.P., Rouwkema, J., Misra, S. (2021). Acoustically-actuated bubble-powered rotational micro-propellers. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 347: 130589.
- [Muro, 2013](#) – Muro, H. (2013). History and recent progress of MEMS physical sensors. *Advances in science and technology*. 81: 1-8.
- [Nathanson, Wickstrom, 1965](#) – Nathanson, H.C., Wickstrom, R.A. (1965). A resonant-gate silicon surface transistor with high-Q band-pass properties. *Applied physics letters*. 7(4): 84-86.
- [Park et al., 2012a](#) – Park, J., Kim, Y., Kim, B., Lee, Y. (2012). Variable flow rate characteristics of a low micro propeller-type hydro turbine by CFD. *Abstracts of the Korean Society for New and Renewable Energy Conference (한국신·재생에너지학회 학술대회 초록집)*. 145-145.
- [Park et al., 2012b](#) – Park, J.H., Kim, Y.T., Kim, B.G., Lee, Y.H. (2012). CFD analysis of a micro propeller-type hydro Turbine by varying the number of runner and guide vanes. *Proc. AFORE – 2012*. 237.
- [Pedersen, 1969](#) – Pedersen, F.B. (1969). Turbulence Measurement in Water by Means of Micro-Propellers. *Educations Fluid Mech. Bulletin*. 7.
- [Plate, Bennett, 1969](#) – Plate, E.J., Bennett, J.P. (1969). Rotary flow meter as turbulence transducer. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 95(6): 1307-1329.
- [Ranjanagi et al., 2013](#) – Ranjanagi, S., Nagpurwala, Q.H., Subbaramu, S. (2013, December). Numerical Studies on the Effect of Design Trim on Aerodynamic Performance of a Micro Propeller for MAV Application. *Proc. ASME*. 35161: V001T01A015.
- [Rao et al., 2017](#) – Rao, Q., Si, T., Wu, Z., Xuan, M., He, Q. (2017). A light-activated explosive micropropeller. *Scientific Reports*. 7(1): 4621.
- [Ren et al., 2019](#) – Ren, L., Nama, N., McNeill, J.M., Soto, F., Yan, Z., Liu, W., Wang, W., Wang, J., Mallouk, T.E. (2019). 3D steerable, acoustically powered microswimmers for single-particle manipulation. *Science advances*. 5(10): eaax3084.
- [Sandonato et al., 1986](#) – Sandonato, G.M., Ferreira, J.L., Ferreira, J.G., Ludwig, G.O. (1986). Preliminary results of an ion micropropeller. *Cienc. Cult. (Sao Paulo), Supl.; (Brazil)*. 38(7).
- [Sandonato et al., 1986a](#) – Sandonato, G.M., Ferreira, J.L., Ferreira, J.G., Ludwig, G.O. (1986). Preliminary results of an ion micropropeller. *Ciencia e Cultura. Suplemento*. 38(7): 392.
- [Schamel et al., 2014](#) – Schamel, D., Mark, A.G., Gibbs, J.G., Miksch, C., Morozov, K.I., Leshansky, A.M., Fischer, P. (2014). Nanopropellers and their actuation in complex viscoelastic media. *ACS nano*. 8(9): 8794-8801.

[Schnichels et al., 2022](#) – Schnichels, S., Peter, F., Kadiri, V.M., Muehl, H., Löscher, M., Fischer, P., Hurst, J. (2022). Customized magnetic nanopropellers grant targeted delivery to the retina. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 63(7): 4150-F0142.

[Schuerle et al., 2019](#) – Schuerle, S., Soleimany, A.P., Yeh, T., Anand, G.M., Häberli, M., Fleming, H.E., Mirkhani, N., Qiu, F., Hauert, S., Wang, X., Nelson, B.J. (2019). Synthetic and living micropellers for convection-enhanced nanoparticle transport. *Science advances*. 5(4): eaav4803.

[Schwarz et al., 2016](#) – Schwarz, L., Medina-Sánchez, M., Schmidt, O.G. (2016, July). Easily scalable high speed magnetic micropellers. *2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)* (pp. 1-4). IEEE.

[Shih, 2016](#) – Shih, J. (2016). Optimization and Modeling of an Energy Harvesting Micropeller for Microfluidic Applications (Honor Thesis; College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, State University of New York & SUNY Polytechnic Institute).

[Singh, Nestmann, 2009](#) – Singh, P., Nestmann, F. (2009). Experimental optimization of a free vortex propeller runner for micro hydro application. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 33(6): 991-1002.

[Smedresman et al., 2011](#) – Smedresman, A., Yeo, D., Shyy, W. (2011). Design, fabrication, analysis, and dynamic testing of a micro air vehicle propeller. *29th AIAA applied aerodynamics conference*. P. 3817.

[Soong et al., 2001](#) – Soong, R.K., Neves, H.P., Schmidt, J.J., Montemagno, C.D. (2001). Engineering Issues in the Fabrication of a Hybrid Nano-Propeller System Powered by F 1-ATPase. *Biomedical Microdevices*. 3: 71-73

[Souchkov, 2016](#) – Souchkov, V. (2016). A Glossary of Essential TRIZ Terms. Research and Practice on the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) Linking Creativity, Engineering and Innovation. Pp. 265-281.

[Takeuchi et al., 1997](#) – Takeuchi, Y., Sawada, K., Sata, T. (1997). Manufacture of micropellers by means of ultraprecision milling machine. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 9(6): 475-479.

[Tang et al., 2019](#) – Tang, S., Zhang, F., Zhao, J., Talaat, W., Soto, F., Karshalev, E., Chen, C., Hu, Z., Lu, X., Li, J., Lin, Z. (2019). Structure-dependent optical modulation of propulsion and collective behavior of acoustic/light-driven hybrid microbowls. *Advanced Functional Materials*. 29(23): 1809003.

[Vach et al, 2015a](#) – Vach, P.J., Fratzl, P., Klumpp, S., Faivre, D. (2015). Fast magnetic micropellers with random shapes. *Nano letters*. 15(10): 7064-7070.

[Vach et al, 2015b](#) – Vach, P.J., Klumpp, S., Faivre, D. (2015). Steering magnetic micropellers along independent trajectories. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 49(6): 065003.

[Wada, 2009](#) – Wada, H. (2009). A semiflexible polymer ring acting as a nano-propeller. *The European Physical Journal E*. 28: 11-16.

[Walker et al., 2015](#) – Walker, D., Käs Dorf, B. T., Jeong, H. H., Lieleg, O., Fischer, P. (2015). Enzymatically active biomimetic micropellers for the penetration of mucin gels. *Science Advances*. 1(11): e1500501.

[Walker et al., 2015a](#) – Walker, D., Kubler, M., Morozov, K. I., Fischer, P., Leshansky, A.M. (2015). Optimal length of low Reynolds number nanopropellers. *Nano letters*. 15(7): 4412-4416.

[Wilfinger et al., 1968](#) – Wilfinger, R.J., Bardell, P.H., Chhabra, D.S. (1968). The resonistor: a frequency selective device utilizing the mechanical resonance of a silicon substrate. *IBM Journal of Research and Development*. 12(1): 113-118.

[Wu et al., 2018](#) – Wu, Z., Troll, J., Jeong, H.H., Wei, Q., Stang, M., Ziemssen, F., Wang, Z., Dong, M., Schnichels, S., Qiu, T., Fischer, P. (2018). A swarm of slippery micropellers penetrates the vitreous body of the eye. *Science advances*. 4(11): eaat4388.

[Xiao et al., 2022](#) – Xiao, Y., Zhang, J., Fang, B., Zhao, X., Hao, N. (2022). Acoustics-actuated microrobots. *Micromachines*. 13(3): 481.

[Yang, Chou, 2009](#) – Yang, S.F., Chou, J.H. (2009). A mechatronic positioning system actuated using a micro DC-motor-driven propeller-thruster. *Mechatronics*. 19(6): 912-926.

[Yokosi, 1967](#) – Yokosi, S. (1967). The structure of river turbulence. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*. 17(2): 1-29.

Zhang et al., 2021 – Zhang, Y., Tan, X., Li, X., Lv, P., Huang, T.Y., Yang, J., Duan, H. (2021). 3D Propulsions of Rod-Shaped Micropropellers. *Advanced Intelligent Systems*. 3(11): 2100083.

Zheng et al., 2023 – Zheng, Y., Li, X., Huang, L., Li, X., Yang, S., Wang, Q., Du, J., Wang, Y., Ding, W., Gao, B., Chen, H. (2023). Homochiral Nanopropeller via Chiral Active Surface Growth. *Journal of the American Chemical Society*. 146(1): 410-418.

Zhou et al., 2020 – Zhou, C., Gao, C., Lin, Z., Wang, D., Li, Y., Yuan, Y., Zhu, B., He, Q. (2020). Autonomous motion of bubble-powered carbonaceous nanoflask motors. *Langmuir*. 36(25): 7039-7045.

## Проблема энергетической классификации мини-, микро- и наноротаторов с использованием вепольного анализа: от управления физическими полями к неконсервативным принципам самоорганизации

Олег Валерьевич Градов <sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> Институт химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В данной статье рассматривается проблема классификации вращающихся элементов, таких как пропеллеры, роторы или гироскопы, на основе критериев энергетических управляющих факторов в рамках анализа глобального тренда микроминиатюризации технических систем (начавшегося ещё в конце 1950-х годов с переходом к твердотельной микроэлектронике). Многие принципы микроминиатюризации и управления, используемые в проектировании, могут быть классифицированы в соответствии с принципами вепольного (“su-field”) анализа, который явно использует принципы взаимодействия вещества и поля. Наша классификация микроротаторов на основе управления физическими полями была построена в соответствии с критериями вепольного анализа: 1. Методы оптического управления, включая лазерные и включающие сложные механизмы, выходящие за рамки классических теорий оптического управления (например – плазмонные и тепловые, в том числе конвективные механизмы). 2. Акустическое управление, в том числе посредством кавитационных пузырьков. 3. Системы с магнитным управлением (классические «феполи» Альтшуллера), несущие ряд преимуществ для биомедицинских приложений и «роевой микроробототехники». 4. Методы химического управления и энергообеспечения динамики, в том числе каталитические (ферментативные и на основе биомиметического катализа – в том числе). В завершении статьи освещаются проблемы, связанные с производственными процессами микро/наноротационных систем и предлагается переход для области приложимости размерных эффектов от классификации на основе методов обработки материалов к классификации по критериям неконсервативной или консервативной самоорганизации наноротационных элементов. Классические методы проектирования и изготовления структур, применимые к минипропеллерам, теряют смысл для наноструктур. Это требует пересмотра методологий проектирования и тестирования для данных наноструктур, с учетом ряда зарядовых и размерных эффектов, а также ограничений приложимости классических критериев подобия в нанообласти.

**Ключевые слова:** микроротаторы, наноротаторы, вепольный анализ, оптическое управление, акустическое управление, магнитно-управляемые системы, химическое управление, каталитическое управление, размерные эффекты, критерии подобия, мультифизическое моделирование.

\* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: [gradov.chph.ras@gmail.com](mailto:gradov.chph.ras@gmail.com) (О.В. Градов)