



European Journal of Renewable Energy

Issued since 2016.

E-ISSN 2454-0870
2025. 10(1). Issued once a year

EDITORIAL BOARD

Volkov Aleksandr – Sochi State University, Sochi, Russian Federation (Editor in Chief)

Kharchenko Valeriy – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation (Deputy Editor in Chief)

Avezov Rabbanakul – Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Arveladze Revaz – Academy of Energy of Georgia, Tbilisi, Georgia

Berzan Vladimir – Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Republic of Moldova, Kishinev, Moldova

Goudarzi Arman – College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China

Kose Utku – Suleyman Demirel University, Turkey

Kozyrskii Vladimir – The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

Marmolejo Jose Antonio – Panamerican University, Mexico

Sokolov Sergei – Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

Vasant Pandian – Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia

Weber Gerhard-Wilhelm – Poznan University of Technology, Poland

Journal is indexed by: CrossRef, OAJI

All manuscripts are peer reviewed by experts in the respective field. Authors of the manuscripts bear responsibility for their content, credibility and reliability.

Editorial board doesn't expect the manuscripts' authors to always agree with its opinion.

Postal Address: 13906, Polarstone Ct., Houston, TX, USA 77044

Passed for printing 05.12.25.
Format 21 × 29,7/4.

Website: <https://ejre.cherkasgu.press>
E-mail: office@cherkasgu.press

Headset Georgia.

Founder and Editor: Cherkas Global University

Order № 10.

© European Journal of Renewable Energy, 2025

European Journal of Renewable Energy

2025

Is. 1

C O N T E N T S

Articles

- The Evolution of the Content of the Smart City Concept
A.D. Mulyndin, V.Yu. Mironov, A.A. Milenkaya, S.A. Shikhova, R.V. Fayzullin 3

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
O.V. Gradov 8
- Problems of Energy Supply for Active Implants: Actuators, Energy Harvesting Systems and Sensors based on Reversible Energy Conversion Principles. 1. From Piezoelectric Polymer Materials to Implantable Thread-Based Acousto-Electrofluidics
O.V. Gradov 25

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): 3-7

DOI: 10.13187/ejre.2025.1.3
<https://ejre.cherkasgu.press>



Articles

The Evolution of the Content of the Smart City Concept

Artem D. Mulyndin ^a, Vladimir Yu. Mironov ^a, Alisa A. Milenkaya ^a, Sofya A. Shikhova ^a,
Rinat V. Fayzullin ^{a,*}

^aRussian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow,
Russian Federation

Abstract

The article traces the historical evolution of the Smart City concept from its initial technocratic understanding based on technological determinism to a modern holistic model focused on systemic sustainability and data-driven governance. Based on the analysis of scientific publications and practical cases, including the experience of implementing the Urban Environment Quality Index (ICGS) in Russia, the key phases of this transformation are identified. It is proved that the modern concept of a “Smart City” is a synthesis of technological tools, strategic planning data and socially oriented management, where technology serves not as an end in itself, but as a tool for achieving long-term sustainability and adaptability of the urban environment.

Keywords: smart city, sustainable development, technological determinism, data-driven governance, Urban Environment Quality Index (UEQI), strategic planning, sustainable smart city, digital transformation, urban studies, sociotechnical system.

1. Введение

Современная эпоха характеризуется беспрецедентными темпами урбанизации, что создает комплекс вызовов для городских систем жизнеобеспечения. В ответ на эти вызовы сформировалась концепция «Умного города» (Smart City), претерпевшая значительную смысловую эволюцию. Если изначально она сводилась к технологическому детерминизму и точечному внедрению цифровых решений, то современное понимание сместилось в сторону целостной философии управления городом как сложной, динамичной системой (Ганин, Ганин, 2014). Современный «Умный город» – это не город, насыщенный датчиками, а город, управляемый данными, ориентированный на человека и способный к непрерывному обучению и адаптации в условиях неопределенности (Саченков, Ржевская, 2021), где технологии занимают подчиненное, инструментальное положение по отношению к стратегическим целям устойчивого развития.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью осмысления этой трансформации и выявления ключевых факторов, определяющих переход от технократического подхода к модели системной устойчивости. Методологической основой

* Corresponding author
E-mail addresses: rf85@mail.ru (R.V. Fayzullin)

работы служит критический анализ научных публикаций, стратегических документов и практических кейсов, посвященных трансформации концепции «Умного города».

2. Обсуждение и результаты

Исторический путь концепции «Умного города» представляет собой пример эволюции урбанистической мысли – движение от упрощенных, технократических редукций к сложным, холистическим моделям, признающим фундаментальную взаимосвязь технологий, общества, экономики и окружающей среды. На заре своего концептуального оформления, приходящегося на конец XX – начало XXI века, «Умный город» практически синонимизировался с технологическим детерминизмом (Ганин, Ганин, 2014). В этом дискурсе город будущего виделся как безупречно отлаженный механизм, где «умные» светофоры ликвидируют пробки, сенсоры на фонарных столбах оптимизируют энергопотребление, а единые мобильные приложения обеспечат мгновенный доступ ко всем муниципальным сервисам. Технология в этой модели выступала в роли первичной и самодостаточной силы, способной точечными, пусть и высокоэффективными, интервенциями устранить системные сбои городского механизма.

По мере накопления практического опыта и углубления научных исследований стала проявляться ограниченность такого подхода. Стало очевидно, что внедрение даже самых передовых технологических решений в отрыве от трансформации управленческих практик, институциональной среды и учета социального контекста не только не дает ожидаемого синергетического эффекта, но порой и порождает новые проблемы (Ketova, 2025). «Умный» светофор, оптимизирующий поток на одном перекрестке, мог создавать затор на соседнем (Kasatkina, 2021). Система автоматического сбора мусора, эффективная с логистической точки зрения, могла игнорировать сложившиеся у жителей привычки, а повсеместное внедрение камер наблюдения, повышая безопасность, вызвало серьезные споры о приватности и гражданских свободах (Саченков, Ржевская, 2021). Технологический детерминизм начал изживать себя, уступая место более зрелому, комплексному пониманию.

Поворотным моментом в этой эволюции стало осознание того, что суть «умного» города заключается не в самих технологиях, а в тех данных, которые они генерируют, и, что еще важнее, в способности городской администрации эти данные анализировать, интерпретировать и превращать в осмысленные управленческие решения. На первый план вышла парадигма управления, основанного на данных (data-driven governance). Яркой иллюстрацией этого перехода служит опыт внедрения в России федеральной системы оценки – Индекса качества городской среды (Динамика индекса..., 2022). Этот кейс показал, что сама по себе методология, а не просто набор технологий, становится мощным катализатором изменений. Единый, прозрачный и методически обоснованный индекс, рассчитываемый с 2018 года, выполнил роль не просто инструмента измерения, а стал системой стратегического ориентирования, которая позволила:

- Сместить фокус с субъективных оценок на объективные, количественно измеримые показатели по шести ключевым типам городских пространств;
- Выявить структурные дисбалансы в развитии городов, когда, например, показатели «Жилье» существенно опережали показатели «Социально-досуговая инфраструктура» или «Озелененные пространства»;
- Создать систему здоровой конкуренции между муниципалитетами и обеспечить целевое, обоснованное распределение ресурсов на национальном и региональном уровнях.

Факт системного превышения установленных KPI¹, когда доля городов с благоприятной средой выросла с 23,5 % в 2018 году до 54 % в 2022 году при целевом показателе в 45 %, свидетельствует о том, что сам механизм публичного измерения и установления четких целей выступает мощным мобилизующим фактором, часто даже более значимым, чем прямое финансирование (Динамика индекса..., 2022). Технологии в этой модели – будь то ГИС² для сбора данных или платформы для их визуализации – являются важным вспомогательным инструментом в управлении умным городом.

¹ KPI (Key Performance Indicators) – ключевые показатели эффективности, измеримые числовые метрики, которые помогают оценивать, насколько успешно достигаются поставленные цели.

² ГИС – Государственная информационная система.

Следующей фазой эволюции, актуализированной нарастающими климатическими вызовами и глобальными потрясениями, такими как пандемия COVID-19, стало смещение акцента с операционной эффективности на системную устойчивость. Концепция «Умного города» начала сливаться с парадигмой «Устойчивого города», образуя новое понятие – «Устойчивый Умный Город» (Саченков, Ржевская, 2021). В этой модели ключевой КРІ смещается с вопросов «Как быстро и дешево оказать услугу?» к вопросам «Насколько городская система способна противостоять внешним потрясениям?» и «Способна ли она к трансформации, не теряя своей базовой функциональности?».

Это уже не город-механизм, а город-экосистема, сложный, адаптивный организм. Его «интеллект» измеряется не вычислительной мощностью, а способностью предвидеть кризисы, принимать их удары и восстанавливаться после них. Такой подход требует принципиально иных технологических решений и, что критически важно, их иной интеграции в систему управления. На первый план выходят:

- Предиктивная аналитика и цифровые двойники, позволяющие не просто реагировать на события, а моделировать будущие сценарии – от распространения вируса и последствий наводнения до нагрузки на энергосети в период аномальной жары (Приоритеты..., 2019);

- Ресурсная автономия и замкнутость циклов, что находит свое выражение в проектах, подобных «СберСити», с его отказом от центральных теплосетей в пользу децентрализованных решений и внедрением систем вакуумного сбора и переработки отходов, минимизирующих экологический след (Ахтямов, 2023);

- Адаптивное проектирование инфраструктуры, когда мосты, дороги и энергетические сети проектируются с запасом прочности и способностью к самодиагностике и самовосстановлению (Носов, 2022).

Современный взгляд на «Умный город» признает его не просто технологической или экологической системой, но системой социотехнической. Это означает неразрывную связь между технологической инфраструктурой и социальными практиками, человеческим капиталом, культурными нормами и институтами. Успешное внедрение «умной» системы управления водными ресурсами бессмысленно без программ просвещения населения об экономии воды; развитие «умного» транспорта требует изменения привычек горожан; а использование алгоритмов ИИ для распределения бюджетных средств невозможно без обеспечения публичного доверия к данному способу (Саченков, Ржевская, 2021).

3. Заключение

Таким образом, в статье описана эволюция концепции «Умного города», которая представляет собой восходящую спираль: от технологий как панацеи к пониманию их роли как инструмента управления; от стремления к сиюминутной эффективности к выстраиванию долгосрочной устойчивости; и, наконец, от технократического изоляционизма к признанию неразрывной связи технологических решений с социальным контекстом, этическими императивами и привычками городской жизни.

Литература

Ахтямов, 2023 – Ахтямов Р.Г. Разработка подходов к адаптации транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2023. Т. 9. № 1. С. 34-43.

Ганин, Ганин, 2014 – Ганин О.Б., Ганин И.О. "Умный город": перспективы и тенденции развития // *Ars Administrandi*. 2014. № 1. С. 124-135.

Динамика индекса..., 2022 – Динамика индекса качества городской среды российских городов в 2018–2022 годах. Институт экономики города. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.urbanecomomics.ru/sites/default/files/ikgs-2022.pdf>

Носов, 2022 – Носов А.Л. Повышение устойчивости транспортного комплекса к изменениям климата // *Вестник Вятского ГАТУ*. 2022. № 2 (12).

Приоритеты..., 2019 – Приоритеты климатической адаптации мегаполиса: люди, природа, техника: научно-методическое издание / Под ред. Е. Гашо. М.: ННФ «РиОС», 2019.

Саченков, Ржевская, 2021 – Саченков А.Б., Ржевская М.М. Взаимосвязь концепций «умного» и «устойчивого» города // *StudNet*. 2021. Т. 4. № 10.

Kasatkina, 2021 – Kasatkina E.V. Mathematical modeling and optimization of traffic flows // *Journal of Physics*. 2021. T. 2134. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2134/1/012002.

Ketova, 2025 – Ketova K. Application of mathematical methods to solving problems of digitization of population movement / *Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II-2023): Proceedings of the II International Workshop*. Krasnoyarsk, 2024. P. 2002.

References

Akhtyamov, 2023 – Akhtyamov, R.G. (2023) Razrabotka podkhodov k adaptatsii transportnoi infrastruktury k klimaticheskim izmeneniyam [Developing approaches to adapting transport infrastructure to climate change]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii*. 9(1): 34-43.

Dinamika indeksa..., 2022 – Dinamika indeksa kachestva gorodskoi sredy rossiiskikh gorodov v 2018–2022 godakh [Dynamics of the urban environment quality index of Russian cities in 2018–2022]. Institut ehkonomiki goroda. [Electronic resource]. URL: <https://www.urbanecomics.ru/sites/default/files/ikgs-2022.pdf> [in Russian]

Ganin, Ganin, 2014 – Ganin, O.B., Ganin, I.O. (2014) "Umnyi gorod": perspektivy i tendentsii razvitiya ["Smart city": prospects and development trends]. *Ars Administrandi*. 1: 124-135. [in Russian]

Kasatkina, 2021 – Kasatkina, E.V. (2021). Mathematical modeling and optimization of traffic flows. *Journal of Physics*. 2134: 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2134/1/012002.

Ketova, 2025 – Ketova, K. (2024) Application of mathematical methods to solving problems of digitization of population movement. *Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II-2023): Proceedings of the II International Workshop*. Krasnoyarsk.

Nosov, 2022 – Nosov, A.L. (2022). Povyshenie ustoichivosti transportnogo kompleksa k izmeneniyam klimata [Improving the resilience of the transport complex to climate change]. *Vestnik Vyatskogo GATU*. 2(12). [in Russian]

Prioritety..., 2019 – Prioritety klimaticheskoi adaptatsii megapolisa: lyudi, priroda, tekhnika: nauchno-metodicheskoe izdanie [Priorities of climate adaptation of a megacity: people, nature, technology: scientific and methodological publication]. Pod red. E. Gasho. M.: NNF «RIOS», 2019. [in Russian]

Sachenkov, Rzhhevskaya, 2021 – Sachenkov, A.B., Rzhhevskaya, M.M. (2021). Vzaimosvyaz' kontseptsii «umnogo» i «ustoichivogo» goroda [The relationship between the concepts of "smart" and "sustainable" cities]. *StudNet*. 4 (10). [in Russian]

Эволюция содержания концепции «Умного города»

Артём Данилович Мулындин ^a, Владимир Юрьевич Миронов ^a,
Алиса Александровна Миленская ^a, Софья Андреевна Шихова ^a,
Ринат Васильевич Файзуллин ^{a, *}

^a Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Аннотация. В статье прослеживается историческая эволюция концепции «Умного города» – от ее первоначального технократического понимания, основанного на технологическом детерминизме, к современной холистической модели, ориентированной на системную устойчивость и управление, основанное на данных. На основе анализа научных публикаций и практических кейсов, включая опыт внедрения Индекса качества городской среды (ИКГС) в России, выявляются ключевые фазы этой трансформации. Доказывается, что современная концепция «Умного города» представляет собой синтез технологического инструментария, данных стратегического планирования и социально-ориентированного

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: fayzullin-rv@ranepa.ru (Р.В. Файзуллин)

управления, где технологии служат не самоцелью, а инструментом для достижения долгосрочной устойчивости и адаптивности городской среды.

Ключевые слова: умный город, устойчивое развитие, технологический детерминизм, управление на основе данных (data-driven governance), Индекс качества городской среды (ИКГС), стратегическое планирование, устойчивый умный город, цифровая трансформация, урбанистика, социотехническая система.

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 ^{a, *}

^a 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 (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; Broolsma, 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, позволяющие 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 поля¹, 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, микророторов, 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

¹ 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 micropropeller 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 Fe₃Co₆Se₈ (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 Fe₃Co₆Se₈ (Ph₂PNTol) 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 ^{a, *}

^a 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 (О.В. Градов)

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): 25-58

DOI: 10.13187/ejre.2025.1.25
<https://ejre.cherkasgu.press>



Problems of Energy Supply for Active Implants: Actuators, Energy Harvesting Systems and Sensors based on Reversible Energy Conversion Principles. 1. From Piezoelectric Polymer Materials to Implantable Thread-Based Acousto-Electrofluidics

Oleg V. Gradov ^{a, *}

^a Semenov Institute of Chemical Physics, RAS (ICP RAS), Moscow, Russian Federation

Abstract

The article discusses the problem of power supply for excitable active polymer implants in regenerative medicine. It emphasizes the necessity to transition from traditional electronic schemes with external power sources towards systems mimicking biological structures. The focus is on piezoelectric materials like polyvinylidene fluoride (PVDF), which are biocompatible and capable of generating electricity and mechanical stimulation signals. This approach could lead to more efficient implantable devices that integrate seamlessly into living tissues. Future developments will likely involve exploring new methods for fabricating energy harvesting nanostructured biomaterials for active implants with multiparametric excitability features. By combining different types of fillers (such as metals or metal oxides) with PVDF, researchers aim to achieve multiparametric stimulation strategies where multiple stimuli (electromagnetic waves, temperature changes, etc.) converge onto single transducers. Incorporating novel energy conversion modalities beyond simple electromechanical feedback loops (for energy harvesting) in active polymer implants may help refine (physio)therapeutic interventions. Efforts have focused on designing composite scaffolds containing nanoparticles that enhance specific functionalities, including magnetic-electrical activation capabilities (PVDF-based multiferroics). For instance, iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) embedded in PVDF matrices show promise for stimulating neural cells by leveraging magnetoelectric coupling effects. Applications of PVDF-based technologies span across various domains within regenerative medicine. They range from bone healing applications supported by piezoresponse-mediated signals to cardiac muscle repair via electrically active PVDF fibers. All of them can be specifically "energized" by different ways of energy harvesting and activation of excitable biological tissues. By integrating acoustic wave manipulation principles alongside electrical signaling pathways, it becomes feasible to develop ultracompact implantable platforms capable to be activable by different pathways and energy conversion principles.

Keywords: energy harvesting for implants, piezoelectricity, ferroelectrics, pyroelectric effect, multiferroics, magnetoelectric coupling, active polymers, active implants, acoustoelectric and electro-acoustic theranostics, acoustofluidics, ferroelectric polymers, multiphysics, PVDF.

1. Введение: реверсивное преобразование энергии как путь энергообеспечения сенсоров и актуаторов в имплантируемых биомедицинских

* Corresponding author

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

изделиях. Прямой и обратный пьезоэффект как путь от терапии и диагностики к тераностике.

Имплантируемые актуаторы, энергособирующие системы и сенсоры, использующие реверсивное преобразование сигнала на PVDF, могут рассматриваться как перспективные стабильные имплантируемые элементы с обратной связью, сочетающие в себе функции искусственных мышц (Mirfakhrai et al., 2007; Brochu, Pei, 2010; Carpi et al., 2011) и биомиметических электромеханических рецепторов (Weiting et al., 2009; Li et al., 2010). С позиций технологии композитов, важно отметить, что существует возможность получения многокомпонентных blends PVDF с другими материалами для создания искусственных мускулов, например, на базе SPEEK/PVDF (Jeon et al., 2009), PSMI/PVDF (Wang et al., 2010), PVDF-HFP (Must et al., 2015), RTIL–PVdF–HFP (Tsuda et al., 2011), PPy–PVDF мультислоев (Gaihre et al., 2011). Аналогичное утверждение верно и для сенсоров.

Encyclopedia of Smart Materials (Zhang et al., 2002) сообщает, что: «пьезоэлектрический поливинилиденфторид может быть использован для создания не только сенсоров, но и актуаторов, таких как искусственные мускулы и искусственные органы, в том числе, мониторов тока крови (которые могут быть имплантируемыми), «умной кожи» («smart skins»), жидкостных насосов и клапанов (которые тоже могут быть имплантируемыми либо работающими в непосредственном контакте с организмом, например, являясь встроенными в микро-катетеры для ввода фармпрепаратов). Очевидно, что структуры на основе материала, обладающего реверсивным откликом и способного использоваться как в актуаторах, так и в сенсорах, могут явиться основой для нового функционального подхода комплексной биомеханической и электрофизиологической тераностике, то есть интеграции сенсинга/диагностики и воздействия на организм/терапии. При этом следует отметить, что возможна реализация мультипараметрической диагностики и, соответственно, мультипараметрической тераностике, в силу различных модальностей сенсинга на базе PVDF и различных форм преобразования сигнала. Так, известны:

1. Механические сенсоры:

1.1. Датчики силы (Wang et al., 2011; Ting et al., 2016) и микроактуаторы, прецизионность которых достаточна для работы на уровне одиночных клеток, включая эмбриональные – от бластомеров до перспективных стволовых клеток (Wejinya et al., 2006; Sun et al., 2013; Wei, Xu, 2017);

1.2. Датчики давления на базе PVDF (Shirinov, Schomburg, 2008; Wang, Xiao, 2014; Cong et al., 2019) и содержащих его композитов, таких как PE/PVDF (Jafer, Arshak, 2008), PVDF-TrFE (Sharma et al., 2012m 2013; Ahmed et al., 2019) (особенно, для использования в медицинских катетерах), TiO₂/PVDF (Al-Saygh et al., 2017), ZnO/PVDF (Lee et al., 2015);

1.3. Датчики деформации и движения на базе PVDF (Yi, Liang, 2008; Wan et al., 2016; Yang et al., 2017), включающие также миологические и тонкие биомеханические приложения; в том числе, мониторинг сигналов сердца, сосудов и дыхательной системы, в частности лёгких (Wang et al., 2002; Choi, Jiang, 2006; Rajala, Lekkala, 2010).

2. Сенсоры энергии/волн в различных спектральных диапазонах:

2.1. Ультразвуковые сенсоры, преобразователи и сонары, например: (Fiorillo, 1992; Toda, Dahl, 2007; Puthillath et al., 2010; Tone et al., 2014);

2.2. PVDF сенсоры для измерений оптического излучения – от вакуумного УФ до дальнего ИК диапазона (Odon, 2003; Dong et al., 2006);

2.2.1. Представляют интерес инфракрасные и тепловые сенсоры (в том числе – потенциально интегрируемые в микрофлюидные структуры (Pullano et al., 2017)), как правило, базирующиеся на пирозлектрических свойствах плёнок PVDF и 2D матриц на его основе (Hammes et al., 1992; Fujitsuka et al., 1998; Ploss et al., 1990); пирозлектрическое поведение свойственно также некоторым природным и искусственным биомолекулярным мембранным и связанным с ними структурам (Petty et al., 1992; Maeda, Katsura, 1993), а также некоторым белковым структурам, в зависимости от аминокислотного состава и молекулярно-кристаллографического состояния (Lemanov, 2000; Yarmarkin et al., 2005, 2007), поэтому такие сенсоры зачастую можно также считать биомиметическими;

2.2.2. Особый интерес представляют сенсоры, позволяющие картировать энергетические профили инфракрасных лазерных источников (Toci et al., 2000),

конвертируя их в электрический сигнал, в том числе, в экспериментах по лазерной абляции (Giao et al., 2004), где определенные формы PVDF проявляют способность электрострикции;

2.2.2.1. Также представляют интерес использующие PVDF химические сенсоры, основанные на принципе зависимости оптических параметров от концентрации (Mandelis, Garcia, 1998).

3. Химические и биохимические сенсоры на основе PVDF, которые мы не обсуждаем в данной работе, так как в их функционировании сегнетоэлектрические свойства PVDF играют чаще всего вспомогательную роль, что можно сравнить со свойствами иммуносенсоров на пьезоэлектрическом гидроксипатите и композитах на его основе (Ding et al., 2007; Ding et al., 2008a; Ding et al., 2008b)).

Все эти примеры, не исчерпывающие, но лишь иллюстрирующие применение PVDF в разных сенсорах, были приведены в целях демонстрации возможности моделирования возбудимых тканей с различным типом физиологического отклика, то есть, конвертирования некоторого физического сигнала или свойства среды в электрический сигнал. Из изложенного, несмотря на неполноту списка, очевидно, что на базе ПВДФ возможно моделирование: слуховых рецепторов (вплоть до ультразвука), фоторецепторов и зрительных рецепторов (расширенного диапазона – от ВУФ до дальнего инфракрасного диапазона), терморекцепторов, хеморецепторов, механорецепторов. Соответственно, возможна замена или дополнение функций биологических рецепторов организма синтетическими рецепторами на базе PVDF, расположенными в нужных участках организма, с соответствующей топографо-анатомической привязкой источников сигнала.

2. Проблема энергообеспечения активных имплантатов для обеспечения возбудимости

В публикациях, выпускаемых под эгидой «International Association for Structural Control and Monitoring, European Association for the Control of Structures», встречается ряд работ по использованию сенсоров на PVDF, в том числе беспроводных, в позиционно-чувствительном structural health monitoring (см., например, (Gu et al., 2005)). В силу достаточно громоздкого, с точки зрения возможности имплантации, характера многих сенсорных устройств подобного рода, связанного с дополнительной схемотехникой, необходимой для их функционирования, в особенности, для электрического питания, они находят применение в основном для обеспечения чувствительности вне организма, то есть, моделируют не интерорецепторы, а экстерорецепторы. Вследствие этого, сенсоры на базе PVDF широко используются в качестве компонентов искусственной «умной» кожи не только биомедицинского, но и робототехнического применения (Tanaka et al., 2003; Tanaka et al., 2005; Ottaviani et al., 2006; Hou et al., 2013; Chen et al., 2017). Это выводит проблему обеспечения аналитических функций PVDF-сенсоров в составе организма на уровень проблем направления “artificial life” (в широкой его трактовке).

Следовательно, наиболее перспективным подходом, исходящим из увеличения биоподобия PVDF-систем (хорошо коррелирующим с изложенными выше представлениями о мембраномиметическом его характере), является постепенный переход от схем, базирующихся на стандартной электронике и запитываемых от внешних источников (робототехника – механистическое функциональное подобие, без требований к структуре и масштабам подобия), к самоорганизующимся и самонастраивающимся (на основе подобия параметров согласования и импедансов) PVDF-структурам, масштабы которых соответствуют масштабам клеточных и тканевых структур соответствующего функционального назначения, а питание которых (также, как и у биологических структур) происходит за счёт собственных биоэнергетических источников организма. Этот подход неизбежно будет сопровождаться интернализацией соответствующих рецепторов и актуаторов, поскольку они перестанут иметь размеры и энергетические потребности, допускающие их постоянное использование только на поверхности организма, а в остальных случаях ограничивающие применение временным введением в организм.

В настоящее время (на начало 2020-х гг. – время данного доклада) эта проблема решена лишь частично (Machts et al., 2015; Machts et al., 2018) и не привела к достаточной микроминиатюризации устройств-прототипов. Отсутствие достаточно микроминиатюрных пьезоэлектрических систем для имплантируемых сенсоров, способных одновременно к генерации энергии, приводит пока лишь к попыткам использования естественных

биологических структур, способных к временному контакту с организмом человека, в качестве *energy harvesters*. Так, в работе (Ghosh, Mandal, 2017) самособирающиеся нанофибриллы коллагена из кожи рыб демонстрируют стабильную кристаллическую структуру и рассматриваются как системы для выработки и сбора энергии из пьезоэлектрического биоматериала для неинвазивного мониторинга физиологических сигналов в реальном времени и носимой электроники с автономным питанием, основанные на биомиметических пьезоэлектрических материалах, способных преобразовывать деформации кожи человека и обладающих нелинейной электрострикцией. В отличие от временной биосовместимости (апплицируемости) подобных систем, в регенеративной медицине и замещающей функции ткани эмерджентной имплантологии необходима постоянная биосовместимость пьезоэлектрических материалов, способствующая обрастанию их клетками при сохранении возбудимости ткани и материала во внешней среде и её электромагнитных полях (Ribeiro et al., 2018; Przekora, 2019; Kapat et al., 2020).

В общем случае, это утверждение касается любых обеспечивающих и поддерживающих возбудимость полимерных сред, а не только пьезоэлектрических. В этот перечень входят также магнитоэлектрически активируемые полимеры и биополимеры, в т.ч. биомультиферроики (в широкой трактовке термина), объединяющие в себе ферромагнетизм, сегнетоэлектричество и ферроэластичность (Saxena, Bhalla, 2013; Pal et al., 2015). К слову сказать, PVDF также может быть матрицей для реализации мультиферроиков (Altomare et al., 2020) (с обеспечивающей отклик неорганической основой, как правило, Fe_3O_4 (Jayakumar et al., 2013; Jayakumar et al., 2015; Abdelhamid et al., 2016; Gao et al., 2020) или MeFe_2O_4 , где Me – металл, например Mn, Co, Zn (Behera, Choudhary, 2017; Prasad, Hemalatha, 2019a, 2019b); реже – экзотическими, в том числе нестехиометрическими нанонаполнителями (Yadav, Kumar, 2012; Liu et al., 2015; Adhlakha et al., 2016; Behera et al., 2017; Nagaraja et al., 2019; Andrade et al., 2019)). Этот факт способствует мультипараметрической диверсификации набора принципов стимуляции и управления биологическими процессами с использованием разных комбинаций электромагнитных и механических факторов, получаемых с использованием одного и того же трансдьюсера.

При рассмотрении с таких позиций биомедицинских приложений PVDF выявляется особая логика в тренде использования его в регенеративной медицине. Действительно, соответствуя по акустическому импедансу в активном состоянии биологическим тканям и будучи в пассивном состоянии совместимым с ними (или биоинертным), он может действовать как согласованный с тканью приемопередатчик, возбуждаемый сообразно ей или подающий на неё сигнал, не вступающий в противоречие с её биофизической и физиологической функцией. Согласование ткани и полимера по импедансу может рассматриваться как критерий электрофизической биомиметики полимера по отношению к электрофизиологически активной ткани, однако, это характерно только для отдельных фаз PVDF, что позволяет, также как и в случае чередования возбудимых и невозбудимых тканей в организме, без изменения химического состава управлять функциональностью имплантатов и сенсоров на основе PVDF.

Это позволяет перейти от использования PVDF в качестве «имитатора» биологических возбудимых сред – нервной ткани (например, для создания мемристоров, как правило, противопоставляемых в инженерных работах как неорганическим, так и чисто биополимерным мемристорам (Jacobs et al., 2014; Jacobs et al., 2014; Georgakopoulos et al., 2015; Catenacci et al., 2017; Budaev et al., 2019; Ge et al., 2019)) или мышечной ткани (например, в робототехнических и накожно/подкожно имплантируемых искусственных мышцах, отличных по принципу действия от тейнохимического принципа хемомеханики (Mirfakhrai et al., 2007; Jeon et al., 2009; Brochu, Pei, 2010; Gaihe et al., 2011; Tsuda et al., 2011; Must et al., 2015; Carpi et al., 2011) – к эмерджентному подходу в разработке развивающихся кооперативно биосинтетических систем типа электроактивных скаффолдов с биологически регулируемой возбудимостью.

В практике использования PVDF как материала для изготовления гидрогелей для магнитной и электрической стимуляции тканей (Hermenegildo et al., 2019), скаффолдов, способных к электрическому отклику на наномеханическое воздействие, а также отклику на пульсирующее электромагнитное поле (Mirzaei et al., 2019a) (преимущественно, волокнистых, получаемых технологиями электроспиннинга (Prasad, Hemalatha, 2017), в том

числе, нановолокнистых (Motamedi et al., 2017a); реже 3D-принтируемых композитных (Roushangar Zineh et al., 2018)) основную индукционную электробиологическую функцию выполняет электрофизика β -фазы, обеспечивающей высокие пиро- и пьезоэлектрические свойства PVDF (за счёт ориентации диполей в одном направлении обеспечивается максимальный дипольный момент). Это позволяет рассматривать β -PVDF-скаффолд одновременно как сенсор и как актуатор, способный реализовать электрическое (электрофизиологическое) или акустическое/электроакустическое стимулирование ткани, а также регистрацию её собственных сигналов, что переводит контролируемую регенерацию ткани с использованием PVDF в раздел особого рода тераностики, где скаффолд сам является источником дескрипторов регенерации ткани, поддерживаемой им.

И, если для применимости PVDF при регенерации костной ткани (Abazari et al., 2019; Kitsara et al., 2019) этот подход встречается с трудностями интраостеальной регистрации сигнала, то для таких возбудимых тканей, как мышечная (в особенности, поперечнополосатая сердечная мышечная ткань (Hitscherich et al., 2016; Arumugam et al., 2019)), клетки желез (в особенности, при электростимуляции) (Bai et al., 2018) и нервная ткань (Lins et al., 2017) (с учётом леммоцитов – шванновских клеток (Lee et al., 2017a; Lee et al., 2017b; Wu et al., 2018)), инжиниринг которой часто производится на электроформованных микроволокнистых PVDF-скаффолдах (в том числе, композитных) (Motamedi et al., 2017b; Li et al., 2019), а также сократимые элементы стенки мочевого пузыря (Seifarth et al., 2017; Ardeshirylajimi et al., 2018)) это не является невозможным.

Электрический или магнитоэлектрический (Esmaili et al., 2019) отклик возбудимой ткани может являться предметом бесконтактных неинвазивных измерений, таких, как электромиография, ЭКГ и ЭЭГ, а также эквивалентных им методов магнитометрии – магнитомиографии, магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии. Таким образом, PVDF-скаффолд может сам являться репортером своей функциональной активности и источником квалитетических данных об эффективности и динамике процессов регенерации, поддерживаемых им.

3. Возбудимые стимулирующие скаффолды в регенеративной медицине

В силу того, что отличающим от всех пассивных полимерных скаффолодов свойством скаффолдов на PVDF является имитация возбудимости, мы уделим особое внимание нейро- и миофизиологическим аспектам приложений этого свойства, так как нервная и мышечная ткань являются возбудимыми тканями, а, следовательно, моделирующие или опосредующие их функции полимерные составы должны также обладать свойством возбудимости (например, для нейростимуляции).

Как показано в основополагающих работах, сегнетоэлектрические материалы можно использовать в сочетании с механическими сигналами для стимуляции различных возбудимых клеток (например, нейронов и мышечных клеток), причём (как это позиционировалось, исходя из моделирования Лейхтагом с соавт. (Leuchtag, 1987a; Leuchtag, 1987b; Leuchtag, 1995; Leuchtag, 2000; Bystrov, Leuchtag, 1994; Bystrov, Leuchtag, 1996; Bystrov et al., 1994; Leuchtag, Bystrov, 1999; Bystrov, 1997; Helluin et al., 2001) функций мембранных ионных каналов с использованием или на основе сегнетоэлектрических представлений) пьезоэлектрическая стимуляция нервных клеток хорошо описывается механизмами ионно-диффузионной природы, в частности, связанными со сдвигом баланса кальция и натрия при прорастании нейритов и микротрубочек (Marino et al., 2017). Согласно тезисам последней цитированной работы, в перспективе, по мере уменьшения размеров имплантируемых пьезоэлектрически и сегнетоэлектрически активных стимулирующих структур, для всех электрически возбудимых структур организма, начиная с нервной ткани, будет возможно использование таких материалов не только на тканевом, но и на клеточном и субклеточном (ультраструктурном) уровнях.

Действительно, в случае рассмотрения нейрогенеза, стимулированной нейрогенерации с уровня стволовых клеток, оказывается, что воздействие пьезоэлектрических скаффолдов на дифференцировку человеческих нервных клеток опосредовано биохимическими механизмами дифференциации стволовых клеток. Следовательно, без качественного изменения ультраструктуры и цитофизиологии клетки, реализуемой на субмикронном уровне, этот подход не может быть биофизически корректно интерпретирован (Lee, Arinze, 2012). Действительно, показано, что композитные

скаффолды на базе PVDF способны индуцировать дифференциацию плюрипотентных клеток, причём не только возбудимых тканей, но и биоминерализуемых впоследствии остеогенных структур (Abazari et al., 2020; Mirzaei et al., 2019b), причём состав наполнителя композита, частично инкорпорируемого в клетку и участвующего впоследствии в биоминерализации, качественно воздействует на микро/нано-структурные и кристаллографические характеристики продуктов биоминерализации. Помимо только что обозначенного факта стимуляции внеклеточной средой (в последней цитированной работе клетки имели наибольшую среднюю длину нейритов на пьезоэлектрических PVDF-каркасах микронного размера, расположенных вовне клеток), таким образом, существует возможность биофункционализации минеральных или искусственных наноконструкций, в перспективе, входящих в клетку, с использованием PVDF-скаффолдов (например, с нанодисперсными биоактивными стеклами (Shuai et al., 2016)).

О совместимости подходов регенеративной медицины на основе PVDF и иных пьезоэлектрических скаффолдов, как в случае биоминерализуемых тканей (например, костной), так и в случае мягких проводящих и возбудимых тканей (например, нервной), говорят работы (Gimenes et al., 2004; Boschini et al., 2006; Li et al., 2019). Это объясняют, как правило, ролью поверхностного потенциала (усиливаемого за счет сегнетоэлектрических свойств PVDF) в индукции пролиферации и минерализации (Szewczyk et al., 2018), однако, есть также объяснения, которые указывают на возможность электромеханического и акустического активирования процессов вблизи PVDF мембран, в силу возможности их действия как преобразователей электрофизического сигнала в акустический сигнал, в особенности, в форме поверхностных акустических волн (ПАВ) (Hoop et al., 2017).

4. Акустически-управляемая имплантируемая (био)микрофлюидика

Использование ПАВ позволяет интегрировать принцип «активного имплантата на основе PVDF» с идеологией акустофлюидики, то есть, точной науки (Bruus, 2011, 2012a) и инженерной практики, позволяющей осуществлять акустическое управление флюидными потоками, в том числе, микрогетерогенными, то есть, несущими дисперсные (микро-/нано-) частицы и пузыри (Sadhal, 2012a; Sadhal, 2012b; Sadhal, 2012c; Wiklund et al., 2012a), анизотропный акустофорез (Bruus, 2012b; Lenshof et al., 2012), манипуляцию, захват и сортировку частиц (Dual, Schwarz, 2012; Dual, Möller, 2012; Dual et al., 2012a; Bruus, 2012c; Glynne-Jones et al., 2012; Gedge, Hill, 2012; Evander, Nilsson, 2012; Glynne-Jones, Hill, 2013) не только в биоинертных полимерных микрофлюидных чипах, но также и в биосовместимых и благоприятствующих росту и развитию клеток условиях (Wiklund, 2012b), а также в системах специфического (супрамолекулярного) связывания и специфической экстракции на чипе/в капиллярных аналитических химических системах (Augustsson, Laurell, 2012; Wiklund et al., 2013). Первое, что в таком случае приходит в голову, если говорить о физиологическом аспекте – это управление потоками биожидкостей, таких, как кровь или лимфа. Чем больше форменных элементов с различающимися параметрами отклика на акустический сигнал находятся в системе (то есть, чем больше классов клеток или же калибровочных стандартов типа beads в цитометрии или латексов в лазерной аэрозольной спектроскопии), тем больше волн, мод/режимов сигнала требуется для реализации целевых функций (Hawkes, Radel, 2013). Поэтому полимерные излучатели на основе PVDF и ряда других сегнетоэлектрических полимеров с низкой добротностью (отличающей их от твердотельных пьезоэлектрических источников) хорошо подходят для этой задачи, в силу возможности перестройки по частотам/длинам волн. При этом соблюдается правило близости акустических импедансов PVDF и облучаемой клетки/ткани организма (в частности, кровь – жидкая соединительная ткань. Впрочем ограничений на характер частиц в акустической/акустофлюидной манипуляции не существует, ими могут быть и колонии протоклеток и гибридные ансамбли частиц типа протоклеток и живых клеток (Wang et al., 2019), и произвольные частицы или структуры, откликающиеся на акустическое управление и выполняющие в акустических резонаторах функции того, что в зарубежной науке относится к направлению «microrobotics» (Dual et al., 2012b)).

Рассмотрим приложения PVDF для регистрации и проточного мониторинга ключевых параметров крови. Известно, что поверхностные характеристики PVDF как материала, означенные в качестве критериев биосовместимости в первой части настоящего обзора, благоприятствуют его совместимости с кровью, в силу чего мембраны на основе PVDF и

содержащих его составов типа PVDF/PMMA активно используются в экспериментальных системах гематологического назначения (Ai et al., 2012). При этом, возможно интегрировать механо-/акусто- сенсорные измерения и химические измерения на единой платформе.

Среди методов анализа на PVDF можно выделить физическую и химическую группу методов. К первой группе можно отнести: определение кровяного давления, гемодинамики, реологических параметров крови и ритмов сердца (Tamez, 2009; Tamez et al., 2010; Yu-si, 2013; Li et al., 2016). На тех же принципах основан способ захвата энергии из кровяного потока (Fadhil et al., 2013). Ко второй группе можно отнести методы гемоглобинометрии на PVDF-подложках (Wu et al., 2014; Zhang et al., 2015), анализы на электролиты и измерения ионов, ключевых для электрофизиологической активности мембран и коагуляционной функции крови (например, калия) без атомно-эмиссионной спектроскопии (Tenjimbayashi et al., 2016), иммунохимические методы определения фармакологических препаратов и токсинов в крови (Prusa et al., 2009).

В силу возможности использования PVDF в инфузионных и перфузионных акустических микронасосах, микродозаторах и микроинъекторах биомедицинского назначения (Nabvai et al., 2007), данные измерения можно производить не только на образце крови, взятом у пациента, но и в режиме замкнутого контура или «on line», «point of care».

Отдельным пунктом можно записать не специфические для крови, но способные применяться в анализе гемодинамических процессов, особенно, в мониторинге наполнения сосудов и эффективности систол, техники ультразвуковой экспозиметрии, фотоакустического детектирования, оптоакустической томографии и т.д., производимые в контакте с кожей пациента (в частности, в задачах подкожной капилляроскопии), но неинвазивно (Zhang, Beard, 2004; Harris, 2009; Subochev et al., 2017). Косвенным критерием измерения насыщенности крови кислородом является температура тела, в силу чего к тому же пункту можно отнести подходы, использующие пирозлектрические свойства PVDF для создания тепловых сенсоров, используемых для мониторинга температуры мягких и хорошо васкуляризованных тканей (Acevedo et al., 2015). Не представляет труда сделать переход от диагностики к тераностике, заставив ультразвук управлять передвижением крови в чипе или лоскуте ткани, как это делается в означенных выше акустических микронасосах (для энцефальной гемодинамики это можно реализовать в формате транскраниальной терапии (O'Reilly et al., 2020)).

Единство принципов возбуждения движения частично упорядоченных сред (soft matter) под действием внешнего сигнала, исходящего от PVDF, говорит о возможности экстраполяции этих принципов с так называемых биологических жидкостей на любые частично упорядоченные среды биологического происхождения. В широкой трактовке, движение протоплазмы, исследовавшееся с 1940-х гг. (гениальные по мастерству японские работы, начатые Н. Камия (Kamiya, 1940; Kamiya, 1950; Kamiya, 1954; Kamiya, 1960; Kamiya, 1981; Kamiya, 1984; Kamiya, 1986; Kamiya, Seifriz, 1954; Kamiya, Kuroda, 1956; Kamiya, Kuroda, 1958; Kamiya, Kuroda, 1966; Kamiya et al., 1957a; Kamiya et al., 1957b; Kamiya et al., 1957c; Kamiya et al., 1957d; Kamiya, Tazawa, 1966; Takata et al., 1967; Nagai, Kamiya, 1977; Yoshimoto, Kamiya, 1978; Chen, Kamiya, 1981; Kuroda, Kamiya, 1981); см. также важнейшие разделы его монографии (Kamiya, 1959a; Kamiya, 1959b; Kamiya, 1959c)), можно отнести к флюидной динамике частично упорядоченных сред (soft matter microfluidics (Otten et al., 2005; Bartolo et al., 2012; Colin et al., 2012)). Соответственно этому, индуцированное акустическим сигналом движение или течение протоплазмы можно относить к акустофлюидике (Kharlanov, 2017), а акустическое измерение скорости течения протоплазмы (Litniewski, Bereiter-Hahn, 1992) – к методам обратной связи для саморегулируемой тераностике в этом способе воздействия на биологические структуры. На основе представлений, изложенных в предшествующем тексте, нетрудно заключить, что это можно реализовать с использованием PVDF. В случае электрической генерации с его использованием становится возможной интерпретация электрически индуцированной динамики протоплазмы как электрофлюидики, в частности, электрофлюидики частично упорядоченных сред (Tang et al., 2016; Cabot et al., 2020).

Особенностью таких систем является ключевая роль капиллярных явлений, связанных с поверхностным потенциалом, и особенно, явлений электрокапиллярности. В последней цитированной работе это явление было использовано для описания электрофлюидного

управления проникновением и адресной доставкой биологически активного вещества к целевой ткани по хирургической нити.

Использование представлений об электрически пассивных нитях неприменимо для регенеративной медицины, особенно в силу «фитильного» электрокапиллярного эффекта. Учитывая, что электрокапиллярный эффект является одним из наиболее важных эффектов в обеспечении движения клеток, то есть, в управлении течением протоплазмы (Girault, Schiffrin, 1986), можно, игнорируя контекст, согласиться с редуccionистским тезисом (Lyakhov, Raikhlin-Eisenkraft, 2002). Энергии адсорбции и растворения, а также осмотические и электрокапиллярные явления играют ключевую роль в метаболизме мозга.

5. Разработка имплантируемой нитчатой акустоэлектрофлюидики

Если учитывать, что PVDF используется для создания хирургических нитей (Urban et al., 1994; Laroche et al., 1995a; Laroche et al., 1995b; Mano et al., 2003; Parioikh et al., 2004; Kakoei et al., 2010; Lambertz et al., 2015; Schoeb et al., 2015; Sellei et al., 2015) и сеток (Klinge et al., 2002; Lynen Jansen et al., 2004; Conze et al., 2008; Klink et al., 2011; Sánchez-Arteaga et al., 2021; Birolini et al., 2022; Karalis et al., 2023), наряду с другими пьезоэлектрическими материалами, такими, как полигидроксибутират (пьезоэлектрические свойства которого известны с 1980-х гг. (Fukada, Ando, 1988)), логично рассмотреть проблему создания хирургических скаффолдов из материала соответствующих нитей в интегральную область ниточной капиллярной микрофлюидики (thread based microfluidics (Ballerini et al., 2011; Wei et al., 2013; Nilghaz et al., 2014; Mostafalu et al., 2016; Erenas et al., 2016; Agustini et al., 2018; Weng et al., 2019)), одними из создателей которой являлась группа самого цитируемого химика современности по состоянию на 2011 год G.M. Whitesides в Гарвардском университете (Reches et al., 2010)), включающую в себя явления электрокапиллярности, электрохимические и электрофизические методы детектирования.

Если рассматривать возможность возбуждения акустических колебаний на таких средах (например, на PVDF-нитях/волокнах), то можно прогнозировать создание новой области исследований – имплантируемой нитчатой акустофлюидики. Примеры электроактивируемых колебаний на нитях ПВДФ, применимых для создания имплантируемой нитчатой флюидики и акустофлюидики (implantable thread-based fluidics, implantable thread-based acoustofluidics) известны, в том числе из наших работ (Buryanskaya et al., 2023; Buryanskaya et al., 2024a; Buryanskaya et al., 2024b; Buryanskaya et al., 2025; Gradov et al., 2020a; Gradov et al., 2020b; Gradov et al., 2022; Gradov et al., 2025; Gradov, 2025). Предпосылки для создания имплантируемой нитчатой акусто(электро)флюидики можно аргументировать, в частности, тем, что отдельно имплантируемые акустические микрофлюидные объекты (Ryu et al., 2010) и отдельно имплантируемые устройства с высокой капиллярностью поверхности (замещающей роль гидрогелей-мембран в адресной доставке лекарственных препаратов (Takehara et al., 2016)) уже существуют. Предельным случаем интеграции акустических и электрокапиллярных свойств имплантируемых систем является создание нейрофизиологических скаффолдов-имплантатов рецепторов сенсорных систем, откликающихся на акустические и механические воздействия, например, культивация нейронов на пленках P(VDF-TrFE) для создания искусственной улитки (передний отдел перепончатого лабиринта), обладающей одновременно акустической чувствительностью и мембранным электрофизиологическим откликом (Shintaku et al., 2010). В таком случае, управление аксональным током нейронов и аксональное наведение в этих системах, управляемое электрическим полем, может рассматриваться как внутриклеточная электрофлюидика аксоплазмы или акусто-электрофлюидика в случае улитки.

При этом, поскольку эквивалентные схемы мембраны и поверхности PVDF-материала – мембраномиметика (рассматриваемого в данном случае как частный случай стимул-чувствительных пьезоэлектрических материалов мембранного типа (Tandon et al., 2019)) будут близки, а импедансы отдельных путей распространения аксонов адаптивны по отношению к конкретным частотным режимам воздействия (способы генерации различных частот с использованием широкополосных перестраиваемых преобразователей на базе PVDF хорошо известны с 1980-х гг. (Sanghvi et al., 1987)), в совокупности, механизм будет приводить к достаточно близкому к биологическому прототипу скоординированному морфогенезу нейронной структуры, использующему в качестве стимулов аксонального наведения, следовательно, синтеза коннектома нейронов, одновременно электрические и

акустические факторы (за счёт «электро-акустофлюидного» характера подхода, обеспечиваемого PVDF). При этом, можно программировать характер отклика клеток и, следовательно, формирования участков ткани с заданными свойствами, используя различные локальные различия фаз PVDF в разных участках имплантата, так как известно, что α - и β - PVDF индуцируют качественно различное клеточное поведение/клеточный отклик (Low et al., 2011). Более подробно с этим направлением можно ознакомиться в обзорных работах (Gradov et al., 2021; Kochervinskii et al., 2022) и цитируемых в них сравнительно современных зарубежных источниках. Подробнее на русском языке эти проблемы будут освещены в одной из следующих статей настоящего обзорно-аналитического цикла.

Литература

Abazari et al., 2019 – Abazari M.F., Soleimanifar F., Enderami S.E., Nematzadeh M., Nasiri N., Nejati F., Saburi E., Khodashenas S., Darbasizadeh B., Khani M.M., Ghoraeian P. Incorporated-bFGF polycaprolactone/polyvinylidene fluoride nanocomposite scaffold promotes human induced pluripotent stem cells osteogenic differentiation // *Journal of cellular biochemistry*. 2019. 120(10): 16750-16759.

Abazari et al., 2020 – Abazari M.F., Soleimanifar F., Amini Faskhodi M., Mansour R.N., Amini Mahabadi J., Sadeghi S., Hassannia H., Saburi E., Enderami S.E., Khani M.M., Zare Karizi S. Improved osteogenic differentiation of human induced pluripotent stem cells cultured on polyvinylidene fluoride/collagen/platelet-rich plasma composite nanofibers // *Journal of cellular physiology*. 2020. 235(2): 1155-1164.

Abdelhamid et al., 2016 – Abdelhamid E.H., Jayakumar O.D., Kotari V., Mandal B.P., Rao R., Naik V.M., Naik R., Tyagi A.K. Multiferroic PVDF–Fe₃O₄ hybrid films with reduced graphene oxide and ZnO nanofillers // *RSC advances*. 2016. 6(24): 20089-20094.

Acevedo et al., 2015 – Acevedo P., Vázquez M., Durán J., Petrearse R. The Measurement of Temperature Gradients in a Soft Tissue Phantom using PVDF arrays: A Simulation Case Using the Finite Element Method (FEM) // *Physics Procedia*. 2015. 70: 1100-1103.

Adhlakha et al., 2016 – Adhlakha N., Yadav K.L., Truccato M. Reduced leakage current and improved multiferroic properties of 0.5 ((1-x) BLPFO-xPZT)-0.5 PVDF composite films // *Ceramics International*. 2016. 42(16): 18238-18246.

Agustini et al., 2018 – Agustini D., Fedalto L., Bergamini M.F., Marcolino-Junior L.H. Microfluidic thread based electroanalytical system for green chromatographic separations // *Lab on a Chip*. 2018. 18(4): 670-678.

Ahmed et al., 2019 – Ahmed A., Jia Y., Huang Y., Khoso N.A., Deb H., Fan Q., Shao J. Preparation of PVDF-TrFE based electrospun nanofibers decorated with PEDOT-CNT/rGO composites for piezo-electric pressure sensor // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. 30(15): 14007-14021.

Ai et al., 2012 – Ai F., Li H., Wang Q., Yuan W.Z., Chen X., Yang L., Zhao J., Zhang Y. Surface characteristics and blood compatibility of PVDF/PMMA membranes // *Journal of Materials Science*. 2012. 47(12): 5030-5040.

Al-Saygh et al., 2017 – Al-Saygh A., Ponnamma D., AlMaadeed M.A., Vijayan P.P., Karim A., Hassan M.K. Flexible pressure sensor based on PVDF nanocomposites containing reduced graphene oxide-titania hybrid nanolayers // *Polymers*. 2017. 9(2): 33.

Altomare et al., 2020 – Altomare A., Bozorg M., Loos K. PVDF-based multiferroic / *Fascinating Fluoropolymers and Their Applications*. Pp. 45-81. Elsevier.

Andrade et al., 2019 – Andrade V.M., Amirov A., Yusupov D., Pimentel B., Barroca N., Pires A.L., Belo J.H., Pereira A.M., Valente M.A., Araújo J.P., Reis M.S.. Multicaloric effect in a multiferroic composite of Gd₅(Si, Ge)₄ microparticles embedded into a ferroelectric PVDF matrix // *Scientific reports*. 2019. 9(1): 1-10.

Ardeshiryajimi et al., 2018 – Ardeshiryajimi A., Ghaderian S.M.H., Omrani M.D., Moradi S.L. Biomimetic scaffold containing PVDF nanofibers with sustained TGF- β release in combination with AT-MSCs for bladder tissue engineering // *Gene*. 2018. 676: 195-201.

- [Arumugam et al., 2019](#) – Arumugam R., Srinadhu E.S., Subramanian B., Nallani S. β -PVDF based electrospun nanofibers – A promising material for developing cardiac patches // *Medical Hypotheses*. 2019. 122: 31-34.7
- [Augustsson, Laurell, 2012](#) – Augustsson P., Laurell T. Acoustofluidics 11: Affinity specific extraction and sample decomplexing using continuous flow acoustophoresis // *Lab on a Chip*. 2012. 12(10): 1742-1752.
- [Bai et al., 2018](#) – Bai R., Li L., Liu M., Yan S., Miao C., Li R., Luo Y., Liu T., Lin B., Ji Y., Lu Y. Paper-based 3D scaffold for multiplexed single cell secretomic analysis // *Analytical chemistry*. 2018. 90(9): 5825-5832.
- [Ballerini et al., 2011](#) – Ballerini D.R., Li X., Shen W. Flow control concepts for thread-based microfluidic devices // *Biomicrofluidics*. 2011. 5(1): 014105.
- [Bartolo et al., 2012](#) – Bartolo D., Aarts D.G. Microfluidics and soft matter: small is useful // *Soft Matter*. 2012. 8(41): 10530-10535.
- [Behera, Choudhary, 2017](#) – Behera C., Choudhary R.N.P. Electrical and multiferroic characteristics of PVDF-MnFe₂O₄ nanocomposites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. 727: 851-862.
- [Behera et al., 2017](#) – Behera C., Choudhary R.N.P., Das P.R. Development of multiferroic polymer nanocomposite from PVDF and (Bi 0.5 Ba 0.25 Sr 0.25)(Fe 0.5 Ti 0.5) O₃ // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2017. 28(3): 2586-2597.
- [Birolini et al., 2022](#) – Birolini C., Tanaka E.Y., de Miranda J.S., Murakami A.H., Damous S.H.B., Utiyama E.M. The early outcomes of complex abdominal wall reconstruction with polyvinylidene (PVDF) mesh in the setting of active infection: a prospective series // *Langenbeck's Archives of Surgery*. 2022. 407(7): 3089-3099.
- [Boschin et al., 2006](#) – Boschin F., Blanchemain N., Bria M., Delcourt-Debruyne E., Morcellet M., Hildebrand H.F., Martel B. Improved drug delivery properties of PVDF membranes functionalized with β -cyclodextrin – Application to guided tissue regeneration in periodontology // *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*. 2006. 79(1): 78-85.
- [Brochu, Pei, 2010](#) – Brochu P., Pei Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles // *Macromolecular rapid communications*. 2010. 31(1): 10-36.
- [Bruus, 2011](#) – Bruus H. Acoustofluidics 1: Governing equations in microfluidics // *Lab on a Chip*. 2011. 11(22): 3742-3751.
- [Bruus, 2012a](#) – Bruus H. Acoustofluidics 2: Perturbation theory and ultrasound resonance modes // *Lab on a Chip*. 2012. 12(1): 20-28.
- [Bruus, 2012b](#) – Bruus H. Acoustofluidics 10: Scaling laws in acoustophoresis // *Lab on a Chip*. 2012. 12(9): 1578-1586.
- [Bruus, 2012c](#) – Bruus H. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles // *Lab on a Chip*. 2012. 12(6):1014-1021.
- [Budaev et al., 2019](#) – Budaev A.V., Belenkov R.N., Emelianov N.A. Memristive Properties of PANI-Polyesterene/PVDF-TrFE Interface // *Condensed Matter*. 2019. 4(2): 56.
- [Burianskaya et al., 2024a](#) – Burianskaya E.L., Gradov O.V., Gradova M.A., Iordanskii A.L., Maklakova I.A., Olkhov A.A. Multifractal approach for engineering of piezoelectric and multiferroic bioresorbable scaffolds: Information extracted by $d(q)$ and $f(\alpha)$ in box counting methods // *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2024. 61: 543-549. IOS Press.
- [Burianskaya et al., 2024b](#) – Burianskaya E.L., Gradov O.V., Gradova M.A., Iordanskii A.L., Maklakova I.A., Olkhov A.A. Visualization and quantitative estimation of ferroelectric polymer fiber motility in time-resolved SEM using Gabor atoms // *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2024. 61: 689-696. IOS Press.
- [Burianskaya et al., 2025](#) – Burianskaya E.L., Gradov O.V., Gradova M.A., Iordanskii A.L., Kochervinskii V.V., Maklakova I.A., Olkhov A.A., Ratnovskaya A.V. Time-resolved estimation of multifractal spectra of ferroelectric/piezoelectric polymer dynamics and neuromimetic fiber orientation: Towards electric-field- and electron-beam-controllable scaffolds and tissue-engineering constructs with dynamic beads // *Advanced Structured Materials*. 2025. 221: 97-119.
- [Buryanskaya et al., 2023](#) – Buryanskaya E.L., Gradov O.V., Gradova M.A., Kochervinskii V.V., Maklakova I.A. Time-resolved multifractal analysis of electron beam induced

piezoelectric polymer fiber dynamics: towards multiscale thread-based microfluidics or acoustofluidics // *Advanced Structured Materials*. 2023. 195: 35-58.

[Bystrov, Leuchtag, 1994](#) – *Bystrov V.S., Leuchtag H.R.* Bioferroelectricity: Modeling the transitions of the sodium channel // *Ferroelectrics*. 1994. 155(1): 19-24.

[Bystrov, Leuchtag, 1996](#) – *Bystrov V.S., Leuchtag H.R.* Phase transitions in the ferroelectric-active model of ion channels of biomembranes // *Ferroelectrics*. 1996. 186(1): 305-307.

[Bystrov et al., 1994](#) – *Bystrov V.S., Lakhno V.D., Molchanov M.* Ferroelectric active models of ion channels in biomembranes // *Journal of theoretical biology*. 1994. 168(4): 383-393.

[Bystrov, 1997](#) – *Bystrov V.S.* Ferroelectric liquid crystal models of ion channels and gating phenomena in biological membranes // *Ferroelectrics Letters Section*. 1997. 23(3-4): 87-93.

[Cabot et al., 2020](#) – *Cabot J.M., Daikuara L.Y., Yue Z., Hayes P., Liu X., Wallace G.G., Paull B.* Electrofluidic control of bioactive molecule delivery into soft tissue models based on gelatin methacryloyl hydrogels using threads and surgical sutures // *Scientific Reports*. 2020. 10(1): 1-10.

[Carpi et al., 2011](#) – *Carpi F., Kornbluh R., Sommer-Larsen P., Alici G.* Electroactive polymer actuators as artificial muscles: are they ready for bioinspired applications? // *Bioinspiration & biomimetics*. 2011. 6(4): 045006.

[Catenacci et al., 2017](#) – *Catenacci M.J., Flowers P.F., Cao C., Andrews J.B., Franklin A.D., Wiley B.J.* Fully Printed Memristors from Cu–SiO₂ Core–Shell Nanowire Composites // *Journal of Electronic Materials*. 2017. 46(7): 4596-4603.

[Chen, Kamiya, 1981](#) – *Chen J.C., Kamiya N.* Differential heat treatment of the Nitella internodal cell and its relation to cytoplasmic streaming // *Cell Structure and Function*. 1981. 6(3): 201-207.

[Chen et al., 2017](#) – *Chen X., Han X., Shen Q.D.* PVDF-Based Ferroelectric Polymers in Modern Flexible Electronics // *Advanced Electronic Materials*. 2017. 3(5): 1600460.

[Choi, Jiang, 2006](#) – *Choi S., Jiang Z.* A novel wearable sensor device with conductive fabric and PVDF film for monitoring cardiorespiratory signals // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006. 128(2): 317-326.

[Colin et al., 2012](#) – *Colin A., Squires T.M., Bocquet L.* Soft matter principles of microfluidics // *Soft Matter*. 2012. 8(41): 10527-10529.

[Cong et al., 2019](#) – *Cong J., Jing J., Chen C., Dai Z.* Development of a PVDF Sensor Array for Measurement of the Dynamic Pressure Field of the Blade Tip in an Axial Flow Compressor // *Sensors*. 2019. 19(6): 1404.

[Conze et al., 2008](#) – *Conze J., Junge K., Weiß C., Anurov M., Oettinger A., Klinge U., Schumpelick V.* New polymer for intra-abdominal meshes – PVDF copolymer // *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*. 2008. 87(2): 321-328.

[Ding et al., 2007](#) – *Ding Y., Liu J., Wang H., Shen G., Yu R.* A piezoelectric immunosensor for the detection of α -fetoprotein using an interface of gold/hydroxyapatite hybrid nanomaterial // *Biomaterials*. 2007. 28(12): 2147-2154.

[Ding et al., 2008a](#) – *Ding Y., Liu J., Jin X., Lu H., Shen G., Yu R.* Poly-L-lysine/hydroxyapatite/carbon nanotube hybrid nanocomposite applied for piezoelectric immunoassay of carbohydrate antigen 19-9 // *Analyst*. 2008. 133(2): 184-190.

[Ding et al., 2008b](#) – *Ding Y., Liu J., Jin X., Shen G., Yu R.* A novel piezoelectric immunosensor for CA125 using a hydroxyapatite/chitosan nanocomposite-based biomolecular immobilization method // *Australian journal of chemistry*. 2008. 61(7): 500-505.

[Dong et al., 2006](#) – *Dong Z., Huang D.G., Zhang D.Y.* Preparation and design of PVDF pyroelectric thin film infrared and ultraviolet fire sensor // *Proc. SPIE*. 2006. 6041: 60411R.

[Dual, Möller, 2012](#) – *Dual J., Möller D.* Acoustofluidics 4: Piezoelectricity and application in the excitation of acoustic fields for ultrasonic particle manipulation // *Lab on a Chip*. 2012. 12(3): 506-514.

[Dual, Schwarz, 2012](#) – *Dual J., Schwarz T.* Acoustofluidics 3: Continuum mechanics for ultrasonic particle manipulation // *Lab on a Chip*. 2012. 12(2): 244-252.

Dual et al., 2012a – Dual J., Hahn P., Leibacher I., Möller D., Schwarz T. Acoustofluidics 6: Experimental characterization of ultrasonic particle manipulation devices // *Lab on a Chip*. 2012. 12(5): 852-862.

Dual et al., 2012b – Dual J., Hahn P., Leibacher I., Möller D., Schwarz T., Wang J. Acoustofluidics 19: Ultrasonic microrobotics in cavities: devices and numerical simulation // *Lab on a Chip*. 2012. 12(20): 4010-4021.

Erenas et al., 2016 – Erenas M.M., de Orbe-Payá I., Capitan-Vallvey L.F. Surface modified thread-based microfluidic analytical device for selective potassium analysis // *Analytical chemistry*. 2016. 88(10): 5331-5337.

Esmaeili et al., 2019 – Esmaeili E., Soleimani M., Ghiass M.A., Hatamie S., Vakilian S., Zomorrod M.S., Sadeghzadeh N., Vossoughi M., Hosseinzadeh S. Magnetolectric nanocomposite scaffold for high yield differentiation of mesenchymal stem cells to neural-like cells // *Journal of cellular physiology*. 2019. 234(8): 13617-13628.

Evander, Nilsson, 2012 – Evander M., Nilsson J. Acoustofluidics 20: applications in acoustic trapping // *Lab on a Chip*. 2012. 12(22): 4667-4676.

Fadhil et al., 2013 – Fadhil N., Saber D., Patra P. Energy harvesting using nana scale dual layers PVDF film for blood artery // *Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), 2013 IEEE Long Island*. 2013, May. Pp. 1-6.

Fiorillo, 1992 – Fiorillo A.S. Design and characterization of a PVDF ultrasonic range sensor // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 1992. 39(6): 688-692.

Fujitsuka et al., 1998 – Fujitsuka N., Sakata J., Miyachi Y., Mizuno K., Ohtsuka K., Taga Y., Tabata O. Monolithic pyroelectric infrared image sensor using PVDF thin film // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1998. 66(1-3): 237-243.

Fukada, Ando, 1988 – Fukada E., Ando Y. Bending piezoelectricity in a microbially produced poly- β -hydroxybutyrate // *Biorheology*. 1988. 25(1-2): 297-302.

Gaihre et al., 2011 – Gaihre B., Alici G., Spinks G.M., Cairney J.M. Synthesis and performance evaluation of thin film PPy-PVDF multilayer electroactive polymer actuators // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. 165(2): 321-328.

Gao et al., 2020 – Gao X., Liang S., Ferri A., Huang W., Rouxel D., Devaux X., Li X.G., Yang H., Chshiev M., Desfeux R., Da Costa A. Enhancement of ferroelectric performance in PVDF:Fe₃O₄ nanocomposite based organic multiferroic tunnel junctions // *Applied Physics Letters*. 2020. 116(15): 152905.

Ge et al., 2019 – Ge J., Zhang S., Liu Z., Xie Z., Pan S. Flexible artificial nociceptor using a biopolymer-based forming-free memristor // *Nanoscale*. 2019. 11(14): 6591-6601.

Gedge, Hill, 2012 – Gedge M., Hill M. Acoustofluidics 17: Theory and applications of surface acoustic wave devices for particle manipulation // *Lab on a Chip*. 2012. 12(17): 2998-3007.

Georgakopoulos et al., 2015 – Georgakopoulos S., Del Pozo F.G., Mas-Torrent M. Flexible organic transistors based on a solution-sheared PVDF insulator // *Journal of Materials Chemistry C*. 2015. 3(47): 12199-12202.

Ghosh, Mandal, 2017 – Ghosh S.K., Mandal D. Sustainable energy generation from piezoelectric biomaterial for noninvasive physiological signal monitoring // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017. 5(10): 8836-8843.

Giao et al., 2004 – Giao M.A.P., Rodrigues N.A.S., Riva R., Schwab C. PVDF sensor in laser ablation experiments // *Review of scientific instruments*. 2004. 75(12): 5213-5215.

Gimenes et al., 2004 – Gimenes R., Zaghete M.A., Bertolini M., Varela J.A., Coelho L.O., Silva Jr N.F. Composites PVDF-TrFE/BT used as bioactive membranes for enhancing bone regeneration / *Proc. SPIE*. 2004. 5385: 539-547.

Girault, Schiffrin, 1986 – Girault H.H.J., Schiffrin D.J. Charge effects on phospholipid monolayers in relation to cell motility // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*. 1986. 857(2): 251-258.

Glynne-Jones, Hill, 2013 – Glynne-Jones P., Hill M. Acoustofluidics 23: acoustic manipulation combined with other force fields // *Lab on a Chip*. 2013. 13(6): 1003-1010.

Glynne-Jones et al., 2012 – Glynne-Jones P., Boltryk R.J., Hill M. Acoustofluidics 9: Modelling and applications of planar resonant devices for acoustic particle manipulation // *Lab on a Chip*. 2012. 12(8): 1417-1426.

[Gradov et al., 2020a](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Iordanskii A.L., Olkhov A.A., Kholuiskaya S.N. Isopotential mapping of electron beam induced dielectric charging of the phb nonwoven fabric structures using sobel-feldman gradient operator / *2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*. 2020. Pp. 662-665. IEEE.

[Gradov et al., 2020b](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Olkhov A.A., Iordanskii A.L. Charge propagation along the polymer fiber of polyhydroxybutyrate: Is it possible to apply the cable model? // *Key Engineering Materials*. 2020. 869: 246-258.

[Gradov et al., 2021](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Kochervinskij V.V. Biomimetic biocompatible ferroelectric polymer materials with an active response for implantology and regenerative medicine / *Organic Ferroelectric Materials and Applications*, WP Series in Electronic and Optical Materials. 2021. Pp. 571-619. United Kingdom. United Kingdom.

[Gradov et al., 2022](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Kholuiskaya S.N., Olkhov A.A. Electron plasma charging effects on the biocompatible electrospun dielectric fibers // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2022. 50(1): 178-186.

[Gradov et al., 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]*. 2025. P. 14, Zhengzhou-China.

[Gradov et al., 2025](#) – Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Ratnovskaya A.V., Buryanskaya E.L., Olkhov A.A., Iordanskii A.L., Kochervinskij V.V. Towards ferroelectric smart polymer fiber-based MEMS/MOEMS/NEMS with laser-assisted control and electron-beam addressing of the fiber actuators // *Advanced Structured Materials*. 2025. 221: 325-360.

[Gu et al., 2005](#) – Gu H., Zhao Y., Wang M.L. A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring // *Structural Control and Health Monitoring*. 2005. 12(3-4): 329-343.

[Hammes et al., 1992](#) – Hammes P.C.A., Regtien P.P.L. An integrated infrared sensor using the pyroelectric polymer PVDF // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1992. 32(1-3): 396-402.

[Harris, 2009](#) – Harris G.R. Piezoelectric Poly (Vinylidene) Fluoride (PVDF) in Biomedical Ultrasound Exosimetry // *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators*. 2009. Pp. 369-383.

[Hawkes, Radel, 2013](#) – Hawkes J.J., Radel S. Acoustofluidics 22: Multi-wavelength resonators, applications and considerations // *Lab on a Chip*. 2013. 13(4): 610-627.

[Helluin et al., 2001](#) – Helluin O., Beyermann M., Leuchtag H.R., Duchohier H.I.E.E.E. A critical role for the branched sidechain adjacent to the third arginine of the sodium channel voltage sensor // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2001. 8(4): 637-643.

[Hermenegildo et al., 2019](#) – Hermenegildo, B., Ribeiro, C., Pérez-Álvarez, L., Vilas, J.L., Learmonth, D.A., Sousa, R.A., Martins P., Lanceros-Méndez S. Hydrogel-based magnetoelectric microenvironments for tissue stimulation // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019. 181: 1041-1047.

[Hitscherich et al., 2016](#) – Hitscherich P., Wu S., Gordan R., Xie L. H., Arinzeh T., Lee E.J. The effect of PVDF-TrFE scaffolds on stem cell derived cardiovascular cells // *Biotechnology and bioengineering*. 2016. 113(7): 1577-1585.

[Hoop et al., 2017](#) – Hoop M., Chen X.Z., Ferrari A., Mushtaq F., Ghazaryan G., Tervoort T., Poulikakos D., Nelson B., Pané S. Ultrasound-mediated piezoelectric differentiation of neuron-like PC12 cells on PVDF membranes // *Scientific reports*. 2017. 7(1): 4028.

[Hou et al., 2013](#) – Hou C., Huang T., Wang H., Yu H., Zhang Q., Li Y. A strong and stretchable self-healing film with self-activated pressure sensitivity for potential artificial skin applications // *Scientific reports*. 2013. 3: 3138.

[Jacobs et al., 2014](#) – Jacobs A.R. Structure-property relationships in a polymer memristor. University of California, Santa Barbara. 2014.

[Jafer, Arshak, 2008](#) – Jafer E., Arshak K. The use of PE/PVDF pressure and temperature sensors in smart wireless sensor network system developed for environmental monitoring // *Sensor Letters*. 2008. 6(4): 477-489.

Jayakumar et al., 2013 – Jayakumar O.D., Mandal B.P., Majeed J., Lawes G., Naik R., Tyagi A.K. Inorganic–organic multiferroic hybrid films of Fe₃O₄ and PVDF with significant magneto-dielectric coupling // *Journal of Materials Chemistry C*. 2013. 1(23): 3710-3715.

Jayakumar et al., 2015 – Jayakumar O.D., Abdelhamid E.H., Kotari V., Mandal B.P., Rao R., Naik V.M., Naik R., Tyagi A.K. Fabrication of flexible and self-standing inorganic–organic three phase magneto-dielectric PVDF based multiferroic nanocomposite films through a small loading of graphene oxide (GO) and Fe₃O₄ nanoparticles // *Dalton Transactions*. 2015. 44(36): 15872-15881.

Jeon et al., 2009 – Jeon J.H., Kang S.P., Lee S., Oh I.K. Novel biomimetic actuator based on SPEEK and PVDF // *Sensors and actuators B: Chemical*. 2009. 143(1): 357-364.

Kakoei et al., 2010 – Kakoei S., Baghaei F., Dabiri S., Parirokh M., Kakoei S. A comparative in vivo study of tissue reactions to four suturing materials // *Iranian Endodontic Journal*. 2010. 5(2): 69.

Kamiya, Kuroda, 1956 – Kamiya N., Kuroda K. Velocity distribution of the protoplasmic streaming in *Nitella* cells // *Bot. Mag. Tokyo*. 1956. 69(822): 43-554.

Kamiya, Kuroda, 1958 – Kamiya N., Kuroda K. Measurement of the motive force of the protoplasmic rotation in *Nitella* // *Protoplasma*. 1958. 50(1): 144-148.

Kamiya, Kuroda, 1966 – Kamiya N., Kuroda K. Some observations of protoplasmic streaming in *Acetabularia* // *Bot Mag Tokyo*. 1966. 79: 706-713.

Kamiya, Seifriz, 1954 – Kamiya N., Seifriz W. Torsion in a protoplasmic thread // *Experimental Cell Research*. 1954. 6(1): 1-16.

Kamiya, Tazawa, 1966 – Kamiya N., Tazawa M. Surgical operations on characean cells with special reference to cytoplasmic streaming // *Ann. Rep. Biol. Works, Fac. Sci. Osaka Univ*. 1966. 14: 95-106.

Kamiya et al., 1957a – Kamiya N., Nakajima H., Abe S. Physiology of the motive force of protoplasmic streaming // *Protoplasma*. 1957. 48(1): 94-112.

Kamiya et al., 1957b – Kamiya N., Abe S., Nakajima H. Simultaneous measurement of respiration and the motive force of protoplasmic streaming in the myxomycete plasmodium. I. Outline of the method / *Proceedings of the Japan Academy*. 1957. 33(4): 206-210.

Kamiya et al., 1957c – Kamiya N., Abe S., Nakajima H. Simultaneous measurement of respiration and the motive force of protoplasmic streaming in the myxomycete plasmodium. II. The effect of cyanide / *Proceedings of the Japan Academy*. 1957. 33(7): 407-409.

Kamiya et al., 1957d – Kamiya N., Abe S., Nakajima H. Simultaneous Measurement of Respiration and the Motive Force of Protoplasmic Streaming in the Myxomycete Plasmodium III. The Effect of Oxygen Tension / *Proceedings of the Japan Academy*. 1957. 34(8): 530-533.

Kamiya, 1940 – Kamiya N. The control of protoplasmic streaming // *Science*. 1940. 92(2394): 462-463.

Kamiya, 1950 – Kamiya N. The protoplasmic flow in the myxomycete plasmodium as revealed by a volumetric analysis // *Protoplasma*. 1950. 39(3): 344-357.

Kamiya, 1959a – Kamiya N. Motive Force Responsible for the Protoplasmic Streaming // *Protoplasmic Streaming*. 1959. Pp. 38-52. Vienna: Springer Vienna.

Kamiya, 1959b – Kamiya N. (Energetics of Protoplasmic Streaming // *Protoplasmic Streaming*. 1959. Pp. 64-81. Vienna: Springer Vienna.

Kamiya, 1959c – Kamiya N. Experimental Approaches to the Mechanism of the Protoplasmic Streaming // *Protoplasmic Streaming*. 1959. Pp. 138-163. Vienna: Springer Vienna.

Kamiya, 1960 – Kamiya N. Physics and chemistry of protoplasmic streaming // *Annual Review of Plant Physiology*. 1960. 11(1): 323-340.

Kamiya, 1981 – Kamiya N. Physical and chemical basis of cytoplasmic streaming // *Annual Review of Plant Physiology*. 1981. 32(1): 205-236.

Kamiya, 1984 – Kamiya N. III-5 Cytoplasmic Streaming // *Cell Structure and Function*. 1984. 9(Supplement): s81-s86.

Kamiya, 1986 – Kamiya N. Cytoplasmic streaming in giant algal cells: a historical survey of experimental approaches // *The botanical magazine= Shokubutsu-gaku-zasshi*. 1986. 99(4): 441-467.

Kapat et al., 2020 – Kapat K., Shubhra Q.T., Zhou M., Leeuwenburgh S. Piezoelectric Nano-Biomaterials for Biomedicine and Tissue Regeneration // *Advanced Functional Materials*. 2020. 1909045.

[Karalis et al., 2023](#) – Karalis T., Tsiapakidou S., Grimbizis G.F., Mikos T. Surgical results in POP/UI surgery after using PVDF compared to other materials. A systematic review and meta-analysis // *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*. 2023. 284: 110-119.

[Kharlanov, 2017](#) – Kharlanov A.V. Forced acoustic oscillations of biological cell // *Bioelectromagnetics*. 2017. 38(8): 613-617.

[Kitsara et al., 2019](#) – Kitsara M., Blanquer A., Murillo G., Humblot V., Vieira S.D.B., Nogués C., Ibáñez E., Esteve J., Barrios L. Permanently hydrophilic, piezoelectric PVDF nanofibrous scaffolds promoting unaided electromechanical stimulation on osteoblasts // *Nanoscale*. 2019. 11(18): 8906-8917.

[Klinge et al., 2002](#) – Klinge U., Klosterhalfen B., Öttinger A.P., Junge K., Schumpelick V. PVDF as a new polymer for the construction of surgical meshes // *Biomaterials*. 2002. 23(16): 3487-3493.

[Klink et al., 2011](#) – Klink C.D., Junge K., Binnebösel M., Alizai H.P., Otto J., Neumann U.P., Klinge U. Comparison of long-term biocompatibility of PVDF and PP meshes // *Journal of Investigative Surgery*. 2011. 24(6): 292-299.

[Kochervinskii et al., 2022](#) – Kochervinskii V.V., Gradov O.V., Gradova M.A. Fluorine-containing ferroelectric polymers and their application in engineering and biomedicine // *Russian Chemical Reviews*. 2022. 91(11): RCR5037.

[Kuroda, Kamiya, 1981](#) – Kuroda K., Kamiya N. Behavior of cytoplasmic streaming in *Nitella* during centrifugation as revealed by the television centrifuge-microscope // *Biorheology*. 1981. 18(3-6): 633-641.

[Lambertz et al., 2015](#) – Lambertz A., Schröder K.M., Schöb D.S., Binnebösel M., Anurov M., Klinge U., Neumann U.P., Klink C.D. Polyvinylidene fluoride as a suture material: evaluation of comet tail-like infiltrate and foreign body granuloma // *European Surgical Research*. 2015. 55(1-2): 1-11.

[Laroche et al., 1995a](#) – Laroche G., Marois Y., Schwarz E., Guidoin R., King M.W., Pâris E., Douville Y. Polyvinylidene fluoride monofilament sutures: Can they be used safely for long-term anastomoses in the thoracic aorta? // *Artificial Organs*. 1995. 19(11): 1190-1199.

[Laroche et al., 1995b](#) – Laroche G., Marois Y., Guidoin R., King M.W., Martin L., How T., Douville Y. Polyvinylidene fluoride (PVDF) as a biomaterial: from polymeric raw material to monofilament vascular suture // *Journal of Biomedical Materials Research*. 1995. 29(12): 1525-1536.

[Lee, Arinzeh, 2012](#) – Lee Y.S., Arinzeh T.L. The influence of piezoelectric scaffolds on neural differentiation of human neural stem/progenitor cells // *Tissue Engineering Part A*. 2012. 18(19-20): 2063-2072.

[Lee et al., 2015](#) – Lee J.S., Shin K.Y., Cheong O.J., Kim J.H., Jang J. Highly sensitive and multifunctional tactile sensor using free-standing ZnO/PVDF thin film with graphene electrodes for pressure and temperature monitoring // *Scientific reports*. 2015. 5: 7887.

[Lee et al., 2017a](#) – Lee Y.S., Wu S., Arinzeh T.L., Bunge M.B. Enhanced noradrenergic axon regeneration into schwann cell-filled PVDF-TrFE conduits after complete spinal cord transection // *Biotechnology and bioengineering*. 2017. 114(2): 444-456.

[Lee et al., 2017b](#) – Lee Y.S., Wu S., Arinzeh T.L., Bunge M.B. Transplantation of schwann cells inside PVDF-TrFE conduits to bridge transected rat spinal cord stumps to promote axon regeneration across the gap // *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*. 2017. 129: e56077.

[Lemanov, 2000](#) – Lemanov V.V. Piezoelectric and pyroelectric properties of protein amino acids as basic materials of soft state physics // *Ferroelectrics*. 2000. 238(1): 211-218.

[Lenshof et al., 2012](#) – Lenshof A., Magnusson C., Laurell T. Acoustofluidics 8: Applications of acoustophoresis in continuous flow microsystems // *Lab on a Chip*. 2012. 12(7): 1210-1223.

[Leuchtag, Bystrov, 1999](#) – Leuchtag H.R., Bystrov V.S. Theoretical models of conformational transitions and ion conduction in voltage-dependent ion channels: Bioferroelectricity and superionic conduction // *Ferroelectrics*. 1999. 220(1): 157-204.

[Leuchtag, 1987a](#) – Leuchtag H.R. Indications of the existence of ferroelectric units in excitable-membrane channels // *Journal of theoretical biology*. 1987. 127(3): 321-340.

[Leuchtag, 1987b](#) – Leuchtag H.R. Phase transitions and ion currents in a model ferroelectric channel unit // *Journal of theoretical biology*. 1987. 127(3): 341-359.

Leuchtag, 1995 – *Leuchtag H.R.* Fit of the dielectric anomaly of squid axon membrane near heat-block temperature to the ferroelectric Curie-Weiss law // *Biophysical chemistry*. 1995. 53(3): 197-205.

Leuchtag, 2000 – *Leuchtag H.R.* Bioferroelectricity in models of voltage-dependent ion channels // *Ferroelectrics*. 2000. 236(1): 23-33.

Li et al., 2010 – *Li F., Liu W., Stefanini C., Fu X., Dario P.* A novel bioinspired PVDF micro/nano hair receptor for a robot sensing system // *Sensors*. 2010. 10(1): 994-1011.

Li et al., 2016 – *Li X., Panicker G.V., Im J.J.* A study for the development of K-sound based automatic blood pressure device using PVDF film / 2016 *38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2016, August Pp. 255-258.

Li et al., 2019 – *Li Y., Liao C., Tjong S.C.* Electrospun polyvinylidene fluoride-based fibrous scaffolds with piezoelectric characteristics for bone and neural tissue engineering // *Nanomaterials*. 2019. 9(7): 952.

Lins et al., 2017 – *Lins L.C., Wianny F., Livi S., Dehay C., Duchet-Rumeau J., Gérard J.F.* Effect of polyvinylidene fluoride electrospun fiber orientation on neural stem cell differentiation // *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 2017. 105(8): 2376-2393.

Litniewski, Bereiter-Hahn, 1992 – *Litniewski J., Bereiter-Hahn J.* Acoustic velocity determination in cytoplasm by V (z) shift. *Acoustical imaging*. 1992. Pp. 535-538. Springer, Boston, MA.

Liu et al., 2015 – *Liu Y., Zhan Q., Wang B., Li H., Wu Y., Chen B., Sun D., Mao S., Li R.W.* Modulation of magnetic anisotropy in flexible multiferroic FeGa/PVDF heterostructures under various strains // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. 51(11).

Low et al., 2011 – *Low Y.K.A., Meenubharathi N., Niphadkar N.D., Boey F.Y.C., Ng K.W.* α - and β -poly (vinylidene fluoride) evoke different cellular behaviours // *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 2011. 22(12): 1651-1667.

Lyakhov, Raikhlín-Eisenkraft, 2002 – *Lyakhov V., Raikhlín-Eisenkraft B.* Adaptive activity of neural structures—a thermodynamic approach // *Medical hypotheses*. 2002. 59(3): 289-296.

Lynen Jansen et al., 2004 – *Lynen Jansen P., Klinge U., Anurov M., Titkova S., Mertens P.R., Jansen M.* Surgical mesh as a scaffold for tissue regeneration in the esophagus // *European surgical research*. 2004. 36(2): 104-111.

Machts et al., 2015 – *Machts R., Reuter T., Prokop P.V., Shewtschenko O., Stubenrauch M., Shilling C., Witte H.* Energy harvestinh for active implants: powering a ruminal pH-monitoring system // *Biomed Tech*. 2015. 60(S1): S35.

Machts et al., 2018 – *Machts R., Reuter T., Prokop P.V., Shewtschenko O., Stubenrauch M., Shilling C., Witte H.* Energy harvestinh for active implants: powering a ruminal pH-monitoring system // *Current Directions in Biomedical Engineering*. 2018. 1: 18-21.

Maeda, Katsura, 1993 – *Maeda H., Katsura T.* Pyroelectric current of oriented purple membrane films // *Biochemical and biophysical research communications*. 1993. 192(3): 1016-1022.

Mandelis, Garcia, 1998 – *Mandelis A., Garcia J.A.* Pd/PVDF thin film hydrogen sensor based on laser-amplitude-modulated optical-transmittance: dependence on H₂ concentration and device physics // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 1998. 49(3): 258-267.

Mano et al., 2003 – *Mano J.F., Lopes J.L., Silva R.A., Brostow W.* Creep of PVDF monofilament sutures: service performance prediction from short-term tests // *Polymer*. 2003. 44(15): 4293-4300.

Marino et al., 2017 – *Marino A., Genchi G.G., Mattoli V., Ciofani G.* Piezoelectric nanotransducers: The future of neural stimulation // *Nano Today*. 2017. 14: 9-12.

Mirfakhrai et al., 2007 – *Mirfakhrai T., Madden J.D., Baughman R.H.* Polymer artificial muscles // *Materials today*. 2007. 10(4): 30-38.

Mirzaei et al., 2019a – *Mirzaei A., Saburi E., Enderami S.E.* Synergistic effects of polyaniline and pulsed electromagnetic field to stem cells osteogenic differentiation on polyvinylidene fluoride scaffold // *Artif Cells Nanomed. Biotechnol*. 2019. 47(1): 3058-66.

Mirzaei et al., 2019b – *Mirzaei A., Moghadam A.S., Abazari M.F., Nejati F., Torabinejad S., Kaabi M., Enderami S.E., Ardeshirylajimi A., Darvish M., Soleimanifar F., Saburi E.* Comparison of osteogenic differentiation potential of induced pluripotent stem cells on 2D and 3D polyvinylidene fluoride scaffolds // *Journal of Cellular Physiology*. 2019. 234(10): 17854-17862.

Mostafalu et al., 2016 – Mostafalu P., Akbari M., Alberti K.A., Xu Q., Khademhosseini A., Sonkusale S.R. A toolkit of thread-based microfluidics, sensors, and electronics for 3D tissue embedding for medical diagnostics // *Microsystems & Nanoengineering*. 2016. 2: 16039.

Motamedi et al., 2017a – Motamedi A.S., Mirzadeh H., Hajiesmaeilbaigi F., Bagheri-Khoulenjani S., Shokrgozar M. Effect of electrospinning parameters on morphological properties of PVDF nanofibrous scaffolds // *Progress in biomaterials*. 2017. 6(3): 113-123.

Motamedi et al., 2017b – Motamedi A.S., Mirzadeh H., Hajiesmaeilbaigi F., Bagheri-Khoulenjani S., Shokrgozar M.A. Piezoelectric electrospun nanocomposite comprising Au NPs/PVDF for nerve tissue engineering // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2017. 105(7): 1984-1993.

Must et al., 2015 – Must I., Kaasik F., Põldsalu I., Mihkels L., Johanson U., Punning A., Aabloo A. Ionic and capacitive artificial muscle for biomimetic soft robotics // *Advanced Engineering Materials*. 2015. 17(1): 84-94.

Nabvai et al., 2007 – Nabvai M., Siddiqui M. K., Dargahi J. A theoretical study on using PVDF in the acoustic micropump for biomedical applications // *Canadian Acoustics*. 2007. 35(3): 156-157.

Nagai, Kamiya, 1977 – Nagai R., Kamiya N. Differential treatment of Chara cells with cytochalasin B with special reference to its effect on cytoplasmic streaming // *Experimental Cell Research*. 1977. 108(1): 231-237.

Nagaraja et al., 2019 – Nagaraja T., Dadami S.T., Manohara S.R., Angadi B. Synthesis and characterization of flexible films of PVDF/Pb (Fe_{0.585}Nb_{0.25}W_{0.165}) O₃ polymer multiferroic composites / *AIP Conference Proceedings*. 2019. 2142: 070023.

Nilghaz et al., 2014 – Nilghaz A., Ballerini D.R., Fang X.Y., Shen W. Semiquantitative analysis on microfluidic thread-based analytical devices by ruler // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. 191: 586-594.

O'Reilly et al., 2020 – O'Reilly M.A., Hynynen K. Feasibility of a PVDF receiver for monitoring of transcranial therapy / *AIP Conference Proceedings*. 2020. 1215: 212.

Odon, 2003 – Odon A. Probe with PVDF sensor for energy measurements of optical radiation // *Measurement Science Review*. 2003. 3(Section 3): 111-114.

Ottaviani et al., 2006 – Ottaviani G., Martel S., Carrupt P.A. Parallel artificial membrane permeability assay: a new membrane for the fast prediction of passive human skin permeability // *Journal of medicinal chemistry*. 2006. 49(13): 3948-3954.

Otten et al., 2005 – Otten A., Köster S., Struth B., Snigirev A., Pfohl T. Microfluidics of soft matter investigated by small-angle X-ray scattering // *Journal of synchrotron radiation*. 2005. 12(6): 745-750.

Pal et al., 2015 – Pal M., Guo R., Bhalla A. Ferroelectricity and Ferroic Like Signature in Biological Species: 'Bio-Multiferroics' // *Integrated Ferroelectrics*. 2015. 166(1): 74-98.

Parirokh et al., 2004 – Parirokh M., Asgary S., Eghbal M.J., Stowe S., Kakoei S. A scanning electron microscope study of plaque accumulation on silk and PVDF suture materials in oral mucosa // *International Endodontic Journal*. 2004. 37(11): 776-781.

Petty et al., 1992 – Petty M., Tsibouklis J., Petty M.C., Feast W.J. Pyroelectric behaviour of synthetic biomembrane structures // *Thin solid films*. 1992. 210: 320-323.

Prasad, Hemalatha, 2017 – Prasad P.D., Hemalatha J. Fabrication of P (VDF) fiber membranes with enhanced ferroelectricity through electrospinning. *AIP Conference Proceedings*. 2017, May. 1832: 050102.

Prasad, Hemalatha, 2019a – Prasad P.D., Hemalatha J. Enhanced dielectric and ferroelectric properties of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) fiber embedded polyvinylidene fluoride (PVDF) multiferroic composite films // *Materials Research Express*. 2019. 6(9): 094007.

Prasad, Hemalatha, 2019b – Prasad P.D., Hemalatha J. Dielectric and energy storage density studies in electrospun fiber mats of polyvinylidene fluoride (PVDF)/zinc ferrite (ZnFe₂O₄) multiferroic composite // *Physica B: Condensed Matter*. 2019. 573: 1-6.

Prusa et al., 2009 – Prusa R., Krizkova S., Adam V., Kukacka J., Eckschlager T., Janatova J., Kizek R. PVDF membranes and chicken antibodies as a suitable and easy-to-use tool for detection of metallothionein in blood and extracts from human fibroblasts // *Clinical chemistry*. 2009. 55(6): A39.

Przekora, 2019 – Przekora A. Current trends in fabrication of biomaterials for bone and cartilage regeneration: Materials modifications and biophysical stimulations // *International journal of molecular sciences*. 2019. 20(2): 435.

Pullano et al., 2017 – Pullano S.A., Mahbub I., Islam S.K., Fiorillo A.S. PVDF sensor stimulated by infrared radiation for temperature monitoring in microfluidic devices // *Sensors*. 2017. 17(4): 850.

Puthillath et al., 2010 – Puthillath P., Krishnamurthy C.V., Balasubramaniam K. Hybrid inversion of elastic moduli of composite plates from ultrasonic transmission spectra using PVDF plane wave sensor // *Composites Part B: Engineering*. 2010. 41(1): 8-16.

Rajala, Lekkala, 2010 – Rajala S., Lekkala J. Film-type sensor materials PVDF and EMFi in measurement of cardiorespiratory signals – A review // *IEEE Sensors Journal*. 2010. 12(3): 439-446.

Reches et al., 2010 – Reches M., Mirica K.A., Dasgupta R., Dickey M.D., Butte M.J., Whitesides G.M. Thread as a matrix for biomedical assays. // *ACS applied materials & interfaces*. 2010. 2(6): 1722-1728.

Ribeiro et al., 2018 – Ribeiro C., Correia D.M., Ribeiro S., Fernandes M.M., Lanceros-Mendez S. Piezo- and Magnetolectric Polymers as Biomaterials for Novel Tissue Engineering Strategies // *MRS Advances*. 2018. 3(30): 1671-1676.

Roushangar Zineh et al., 2018 – Zineh B.R., Shabgard M.R., Roushangar L. Mechanical and biological performance of printed alginate/methylcellulose/halloysite nanotube/polyvinylidene fluoride bio-scaffolds. // *Materials Science and Engineering: C*. 2018. 92: 779-789.

Ryu et al., 2010 – Ryu K., Chung S.K., Cho S.K. Micropumping by an acoustically excited oscillating bubble for automated implantable microfluidic devices // *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*. 2010. 15(3): 163-171.

Sadhal, 2012a – Sadhal S.S. Acoustofluidics 13: Analysis of acoustic streaming by perturbation methods // *Lab on a Chip*. 2012. 12(13): 2292-2300.

Sadhal, 2012b – Sadhal S.S. Acoustofluidics 15: Streaming with sound waves interacting with solid particles // *Lab on a Chip*. 2012. 12(15): 2600-2611.

Sadhal, 2012c – Sadhal S.S. Acoustofluidics 16: acoustics streaming near liquid–gas interfaces: drops and bubbles // *Lab on a Chip*. 2012. 12(16): 2771-2781.

Sánchez-Arteaga et al., 2021 – Sánchez-Arteaga A., Tallón-Aguilar L., Tinoco-González J., Perea del-Pozo E., Navas-Cuellar A., Padillo-Ruiz J. Use of polyvinylidene fluoride (PVDF) meshes for ventral hernia repair in emergency surgery // *Hernia*. 2021. 25(1): 99-106.

Sanghvi et al., 1987 – Sanghvi N.T., Morris S.T., Wendt P.W., Kelly-Fry E. A novel approach of generating various frequency bands using a wideband PVDF ultrasound transducer and its application for tissue characterization // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1987. 81(S1): S82

Saxena, Bhalla, 2013 – Saxena A., Bhalla A.S. Bioferroics and biomultiferroics: ferroic behaviour of biological systems // *Materials Research Innovations*. 2013. 17(7): 440-441.

Schoeb et al., 2015 – Schoeb D.S., Klink C.D., Lambertz A., Eickhoff R., Busch D., Ulmer T.F., Neumann U.P., Binnebösel M. Influence of gentamicin-coded PVDF suture material on the healing of intestinal anastomosis in a rat model // *International journal of colorectal disease*. 2015. 30(11): 1571-1580.

Seifarth et al., 2017 – Seifarth V., Grosse J.O., Gossmann M., Janke H.P., Arndt P., Koch S., Epple M., Artmann G.M., Artmann A.T. Mechanical induction of bi-directional orientation of primary porcine bladder smooth muscle cells in tubular fibrin-poly (vinylidene fluoride) scaffolds for ureteral and urethral repair using cyclic and focal balloon catheter stimulation // *Journal of biomaterials applications*. 2017. 32(3): 321-330.

Sellei et al., 2015 – Sellei R.M., Bauer E., Hofman M., Kobbe P., Lichte P., Garrison R.L., Pape H.C., Horst K. Reconstruction of a quadriceps tendon tear using Polyvinylidene fluoride sutures and patellar screw fixation: a biomechanical study // *The Knee*. 2015. 22(6): 535-541.

Sharma et al., 2012 – Sharma T., Je S.S., Gill B., Zhang J.X. Patterning piezoelectric thin film PVDF–TrFE based pressure sensor for catheter application // *Sensors and Actuators A: physical*. 2012. 177: 87-92.

- Sharma et al., 2013 – Sharma T., Aroom K., Naik S., Gill B., Zhang J.X. Flexible thin-film PVDF-TrFE based pressure sensor for smart catheter applications // *Annals of biomedical engineering*. 2013. 41(4): 744-751.
- Shintaku et al., 2010 – Shintaku H., Tateno T., Tsuchioka N., Tanujaya H., Nakagawa T., Ito J., Kawano S. Culturing neurons on MEMS fabricated P (VDF-TrFE) films for implantable artificial cochlea // *Journal of Biomechanical Science and Engineering*. 2010. 5(3): 229-235.
- Shirinov, Schomburg, 2008 – Shirinov A.V., Schomburg W.K. Pressure sensor from a PVDF film // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. 142(1): 48-55.
- Shuai et al., 2016 – Shuai C., Huang W., Feng P., Gao C., Shuai X., Xiao T., Deng Y., Peng S., Wu P. Tailoring properties of porous Poly (vinylidene fluoride) scaffold through nano-sized 58s bioactive glass // *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 2016. 27(1): 97-109.
- Subochev et al., 2017 – Subochev P.V., Postnikova A.S., Koval'chuk A.V., Turchin I.V. Biomedical Optoacoustic Tomograph Based on a Cylindrical Focusing PVDF Antenna // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2017. 60(3): 233-239.
- Sun et al., 2013 – Sun Z., Hao L., Chen W., Li Z. Robotic cell injection force control based on static PVDF sensor and Fuzzy-PID control method // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2013. 41(1): 73-86.
- Szewczyk et al., 2018 – Szewczyk P.K., Metwally S., Karbowniczek J.E., Marzec M.M., Stodolak-Zych E., Gruszczynski A., Bernasik A., Stachewicz U. Surface potential controlled cell proliferation and collagen mineralization on electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF) fiber scaffolds for bone regeneration // *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2018. 5(2): 582-593.
- Takata et al., 1967 – Takata T., Nagai R., Kamiya N. Movement of the Myxomycete Plasmodium. III Artificial Polarization in Endoplasm Distribution in a Plasmodium and its Bearing on Protoplasmic Streaming / *Proceedings of the Japan Academy*. 1967. 43(1): 45-50.
- Takehara et al., 2016 – Takehara H., Nagaoka A., Noguchi J., Akagi T., Kasai H., Ichiki T. Implantable Microfluidic Device with Hydrogel Permeable Membrane for Delivering Chemical Compounds and Imaging Neural Cells in Living Mice // *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2016. 29(4): 513-518.
- Tamez et al., 2010 – Tamez J.P., Wang H.Y., Bhalla A., Guo R. Polyvinylidene Fluoride (PVDF) piezoelectric for intravascular monitoring of blood pressure and arterial blood flow rate // *Ceramic Transactions*. 2010. 221: 231-243.
- Tamez, 2009 – Tamez J.P. A Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Piezoelectric Biomedical Transducer for Intravascular Monitoring of Blood Pressure, and Arterial Blood Flow Rate (Doctoral dissertation, University of Texas at San Antonio). 2009.
- Tanaka et al., 2003 – Tanaka M., Lévêque J. L., Tagami H., Kikuchi K., Chonan S. The "Haptic Finger"—a new device for monitoring skin condition. *Skin Research and Technology*. 2003. 9(2): 131-136.
- Tanaka et al., 2005 – Tanaka M., Sugiura H., Leveque J.L., Tagami H., Kikuchi K., Chonan S. (2005). Active haptic sensation for monitoring skin conditions // *Journal of materials processing technology*. 2005. 161(1-2): 199-203.
- Tandon et al., 2019 – Tandon B., Kamble P., Olsson R.T., Blaker J.J., Cartmell S.H. Fabrication and characterisation of stimuli responsive piezoelectric PVDF and hydroxyapatite-filled PVDF fibrous membranes // *Molecules*. 2019. 24(10): 1903.
- Tang et al., 2016 – Tang B., Groenewold J., Zhou M., Hayes R.A., Zhou G.G. Interfacial electrofluidics in confined systems // *Scientific reports*. 2016. 6: 26593.
- Tenjimbayashi et al., 2016 – Tenjimbayashi M., Komatsu H., Akamatsu M., Nakanishi W., Suzuki K., Hill J.P., Shiratori S., Ariga K. Determination of blood potassium using a fouling-resistant PVDF-HFP-based optode // *RSC Advances*. 2016. 6(17): 14261-14265.
- Ting et al., 2016 – Ting Y., Nugraha A., Chiu C.W., Gunawan H. Design and characterization of one-layer PVDF thin film for a 3D force sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016. 250: 129-137.
- Toci et al., 2000 – Toci G., Mazzoni M., Mazzinghi P. Use of a PVDF pyroelectric sensor for beam mapping and profiling of a mid-infrared diode laser // *Review of Scientific Instruments*. 2000. 71(4): 1635-1637.
- Toda, Dahl, 2007 – Toda M., Dahl J. PVDF corrugated transducer for ultrasonic ranging sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007. 134(2): 427-435.

- Tone et al., 2014** – Tone R., Tanaka Y., Fujimoto Y. Experiment of receiving ultrasonic wave by using adhesion and a contact type PVDF sensor // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2014. 45(1-4): 171-177.
- Tsuda et al., 2011** – Tsuda T., Baba M., Sato Y., Sakao R., Matsumoto K., Hagiwara R., Kuwabata S. Nonvolatile RTIL-Based Artificial Muscle: Actuation Mechanism Identified by In Situ EDX Analysis // *Chemistry – A European Journal*. 2011. 17(40): 11122-11126.
- Urban et al., 1994** – Urban E., King M.W., Guidoin R., Laroche G., Marois Y., Martin L., Cardou A., Douville Y. Why make monofilament sutures out of polyvinylidene fluoride? // *ASAIO journal*. 1994. 40(2): 145-156.
- Wan et al., 2016** – Wan Z., Pan Q., Li K., Liu D. Research on the Motion Information Collection of the Elbow Joint Control Muscle Group Based on PVDF Sensor // *Piezoelectrics & Acoustooptics*. 2016. 1: 31.
- Wang, Xiao, 2014** – Wang Y.Q., Xiao Y.L. A dynamic calibration test on PVDF film pressure sensor with dropping hammer method // *Advanced Materials Research*. 2014. 933: 548-553.
- Wang et al., 2002** – Wang F., Tanaka M., Chonan S. A PVDF piezopolymer sensor for unconstrained cardiorespiratory monitoring during sleep // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2002. 16(3-4): 181-188.
- Wang et al., 2010** – Wang X.L., Oh I.K., Lee S. Electroactive artificial muscle based on crosslinked PVA/SPTES // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2010. 150(1): 57-64.
- Wang et al., 2011** – Wang Y.R., Zheng J.M., Ren G.Y., Zhang P.H., Xu C. A flexible piezoelectric force sensor based on PVDF fabrics // *Smart Materials and Structures*. 2011. 20(4): 045009.
- Wang et al., 2019** – Wang X., Tian L., Du H., Li M., Mu W., Drinkwater B.W., Han, X., Mann S. Chemical communication in spatially organized protocell colonies and protocell / living cell micro-arrays // *Chemical Science*. 2019. 10(41): 9446-9453.
- Wei, Xu, 2017** – Wei Y., Xu Q. Design of a PVDF-MFC force sensor for robot-assisted single cell microinjection // *IEEE Sensors Journal*. 2017. 17(13): 3975-3982.
- Wei et al., 2013** – Wei Y.C., Fu L.M., Lin C.H. Electrophoresis separation and electrochemical detection on a novel thread-based microfluidic device // *Microfluidics and nanofluidics*. 2013. 14(3-4): 583-590.
- Weiting et al., 2009** – Weiting L., Bilsay S., Cesare S., Arianna M., Fei L., Dajing C., Paolo D., Metin S., Xin F. A novel artificial hair receptor based on aligned PVDF micro/nano fibers / *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2009, February. Pp. 49-54. IEEE.
- Wejinya et al., 2006** – Wejinya U.C., Shen Y., Xi N., Salem F. Force measurement of embryonic system using in situ PVDF piezoelectric sensor / *2006 49th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*. 2006, August 1: 108-112. IEEE.
- Weng et al., 2019** – Weng X., Kang Y., Guo Q., Peng B., Jiang H. Recent advances in thread-based microfluidics for diagnostic applications // *Biosensors and Bioelectronics*. 2019. 132: 171-185.
- Wiklund et al., 2012a** – Wiklund M., Green R., Ohlin M. Acoustofluidics 14: Applications of acoustic streaming in microfluidic devices // *Lab on a Chip*. 2012. 12(14): 2438-2451.
- Wiklund et al., 2013** – Wiklund M., Radel S., Hawkes J.J. Acoustofluidics 21: ultrasound-enhanced immunoassays and particle sensors // *Lab on a Chip*. 2013. 13(1): 25-39.
- Wiklund, 2012b** – Wiklund M. Acoustofluidics 12: Biocompatibility and cell viability in microfluidic acoustic resonators // *Lab on a Chip*. 2012. 12(11): 2018-2028.
- Wu et al., 2014** – Wu C.C., Liu G., Xu J.L., Zhang X. Synthesis of PVDF/ZrO₂ hybrid membranes and its adsorption property toward bovine hemoglobin // *Chemical Journal of Chinese Universities*. 2014. 35: 784-90.
- Wu et al., 2018** – Wu S., Chen M.S., Maurel P., Lee Y.S., Bunge M.B., Arinzeh T.L. Aligned fibrous PVDF-TrFE scaffolds with Schwann cells support neurite extension and myelination in vitro // *Journal of neural engineering*. 2018. 15(5): 056010.
- Yadav, Kumar, 2012** – Yadav K., Kumar A. Fabrication and Study of Hot Pressed Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂₄-PVDF PbTiO₃ 7ZrO₃ and Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂₀₄-PVDF-BaTiO₃ 7ZrO₃ 3O₃ Multiferroic Composite Films // *Ferroics and Multiferroics*. 2012. 189: 179-188.

Yang et al., 2017 – Yang Y.J., Aziz S., Mehdi S.M., Sajid M., Jagadeesan S., Choi K.H. Highly sensitive flexible human motion sensor based on ZnSnO₃/PVDF composite // *Journal of Electronic Materials*. 2017. 46(7): 4172-4179.

Yarmarkin et al., 2005 – Yarmarkin V.K., Shul'man S.G., Pankova G.A., Lemanov V.V. Pyroelectric properties of some compounds based on protein aminoacids // *Physics of the Solid State*. 2005. 47(11): 2135-2137.

Yarmarkin et al., 2007 – Yarmarkin V.K., Shulman S.G., Lemanov V.V. Pyroelectric properties of novel protein amino acid-based single crystals // *Ferroelectrics*. 2007. 348(1): 118-123.

Yi, Liang, 2008 – Yi J., Liang H. A PVDF-based deformation and motion sensor: Modeling and experiments // *IEEE Sensors Journal*. 2008. 8(4): 384-391.

Yoshimoto, Kamiya, 1978 – Yoshimoto Y., Kamiya N. Studies on contraction rhythm of the plasmodial strand III. Role of endoplasmic streaming in synchronization of local rhythms // *Protoplasma*. 1978. 95(1): 111-121.

Yu-si, 2013 – Yu-si Q. The Study of PVDF Piezoelectric-film Finger-cuff Electronic Blood Pressure Monitor // *Science & Technology Information*. 2013. 13: 053.

Zhang, Beard, 2004 – Zhang E.Z., Beard P.C. Ultrahigh-sensitivity wideband Fabry-Perot ultrasound sensors as an alternative to piezoelectric PVDF transducers for biomedical photoacoustic detection / *Proc. SPIE*. 2004. 5320: 222-230.

Zhang et al., 2002 – Zhang Q.M., Bharti V., Kavarnos G. Poly (vinylidene fluoride)(PVDF) and its copolymers. Encyclopedia of Smart Materials. 2002. [Electronic resource]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471216275.esm063>

Zhang et al., 2015 – Zhang J., Guo S., Zhang Y., Zhang X., Liu Y., Xu J., Han Y., Xu Y. Fabrication of PVDF membranes entrapped with oleic acid modified TiO₂ and selective adsorption toward bovine hemoglobin // *RSC Advances*. 2015. 5(60): 48607-48614.

References

Abazari et al., 2019 – Abazari, M.F., Soleimanifar, F., Enderami, S.E., Nematzadeh, M., Nasiri, N., Nejati, F., Saburi, E., Khodashenas, S., Darbasizadeh, B., Khani, M.M., Ghoraeian, P. (2019). Incorporated-bFGF polycaprolactone/polyvinylidene fluoride nanocomposite scaffold promotes human induced pluripotent stem cells osteogenic differentiation. *Journal of cellular biochemistry*. 120(10): 16750-16759.

Abazari et al., 2020 – Abazari, M.F., Soleimanifar, F., Amini Faskhodi, M., Mansour, R.N., Amini Mahabadi, J., Sadeghi, S., Hassannia, H., Saburi, E., Enderami, S.E., Khani, M.M., Zare Karizi, S. (2020). Improved osteogenic differentiation of human induced pluripotent stem cells cultured on polyvinylidene fluoride/collagen/platelet-rich plasma composite nanofibers. *Journal of cellular physiology*. 235(2): 1155-1164.

Abdelhamid et al., 2016 – Abdelhamid, E.H., Jayakumar, O.D., Kotari, V., Mandal, B.P., Rao, R., Naik, V.M., Naik, R., Tyagi, A.K. (2016). Multiferroic PVDF-Fe₃O₄ hybrid films with reduced graphene oxide and ZnO nanofillers. *RSC advances*. 6(24): 20089-20094.

Acevedo et al., 2015 – Acevedo, P., Vázquez, M., Durán, J., Petrearce, R. (2015). The Measurement of Temperature Gradients in a Soft Tissue Phantom using PVDF arrays: A Simulation Case Using the Finite Element Method (FEM). *Physics Procedia*. 70: 1100-1103.

Adhlakha et al., 2016 – Adhlakha, N., Yadav, K.L., Truccato, M. (2016). Reduced leakage current and improved multiferroic properties of 0.5 ((1-x) BLPFO-xPZT)-0.5 PVDF composite films. *Ceramics International*. 42(16): 18238-18246.

Agustini et al., 2018 – Agustini, D., Fedalto, L., Bergamini, M.F., Marcolino-Junior, L.H. (2018). Microfluidic thread based electroanalytical system for green chromatographic separations. *Lab on a Chip*. 18(4): 670-678.

Ahmed et al., 2019 – Ahmed, A., Jia, Y., Huang, Y., Khoso, N.A., Deb, H., Fan, Q., Shao, J. (2019). Preparation of PVDF-TrFE based electrospun nanofibers decorated with PEDOT-CNT/rGO composites for piezo-electric pressure sensor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 30(15): 14007-14021.

Ai et al., 2012 – Ai, F., Li, H., Wang, Q., Yuan, W.Z., Chen, X., Yang, L., Zhao, J., Zhang, Y. (2012). Surface characteristics and blood compatibility of PVDF/PMMA membranes. *Journal of Materials Science*. 47(12): 5030-5040.

- Al-Saygh et al., 2017 – Al-Saygh, A., Ponnamma, D., AlMaadeed, M.A., Vijayan, P.P., Karim, A., Hassan, M.K. (2017). Flexible pressure sensor based on PVDF nanocomposites containing reduced graphene oxide-titania hybrid nanolayers. *Polymers*. 9(2): 33.
- Altomare et al., 2020 – Altomare, A., Bozorg, M., Loos, K. (2020). PVDF-based multiferroic. In *Fascinating Fluoropolymers and Their Applications*. Pp. 45-81. Elsevier.
- Andrade et al., 2019 – Andrade, V.M., Amirov, A., Yusupov, D., Pimentel, B., Barroca, N., Pires, A.L., Belo, J.H., Pereira, A.M., Valente, M.A., Araújo, J.P., Reis, M.S. (2019). Multicaloric effect in a multiferroic composite of Gd₅(Si, Ge)₄ microparticles embedded into a ferroelectric PVDF matrix. *Scientific reports*. 9(1): 1-10.
- Ardeshiryajimi et al., 2018 – Ardeshiryajimi, A., Ghaderian, S.M.H., Omrani, M.D., Moradi, S.L. (2018). Biomimetic scaffold containing PVDF nanofibers with sustained TGF- β release in combination with AT-MSCs for bladder tissue engineering. *Gene*. 676: 195-201.
- Arumugam et al., 2019 – Arumugam, R., Srinadhu, E.S., Subramanian, B., Nallani, S. (2019). β -PVDF based electrospun nanofibers – A promising material for developing cardiac patches. *Medical Hypotheses*. 122: 31-34.7
- Augustsson, Laurell, 2012 – Augustsson, P., Laurell, T. (2012). Acoustofluidics 11: Affinity specific extraction and sample decomplexing using continuous flow acoustophoresis. *Lab on a Chip*. 12(10): 1742-1752.
- Bai et al., 2018 – Bai, R., Li, L., Liu, M., Yan, S., Miao, C., Li, R., Luo, Y., Liu, T., Lin, B., Ji, Y., Lu, Y. (2018). Paper-based 3D scaffold for multiplexed single cell secretomic analysis. *Analytical chemistry*. 90(9): 5825-5832.
- Ballerini et al., 2011 – Ballerini, D.R., Li, X., Shen, W. (2011). Flow control concepts for thread-based microfluidic devices. *Biomicrofluidics*. 5(1): 014105.
- Bartolo et al., 2012 – Bartolo, D., Aarts, D.G. (2012). Microfluidics and soft matter: small is useful. *Soft Matter*. 8(41): 10530-10535.
- Behera, Choudhary, 2017 – Behera, C., Choudhary, R.N.P. (2017). Electrical and multiferroic characteristics of PVDF-MnFe₂O₄ nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 727: 851-862.
- Behera et al., 2017 – Behera, C., Choudhary, R.N.P., Das, P.R. (2017). Development of multiferroic polymer nanocomposite from PVDF and (Bi 0.5 Ba 0.25 Sr 0.25)(Fe 0.5 Ti 0.5) O₃. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 28(3): 2586-2597.
- Birolini et al., 2022 – Birolini, C., Tanaka, E.Y., de Miranda, J.S., Murakami, A.H., Damous, S.H.B., Utiyama, E.M. (2022). The early outcomes of complex abdominal wall reconstruction with polyvinylidene (PVDF) mesh in the setting of active infection: a prospective series. *Langenbeck's Archives of Surgery*. 407(7): 3089-3099.
- Boschin et al., 2006 – Boschin, F., Blanchemain, N., Bria, M., Delcourt-Debruyne, E., Morcellet, M., Hildebrand, H.F., Martel, B. (2006). Improved drug delivery properties of PVDF membranes functionalized with β -cyclodextrin – Application to guided tissue regeneration in periodontology. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*. 79(1): 78-85.
- Brochu, Pei, 2010 – Brochu, P., Pei, Q. (2010). Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles. *Macromolecular rapid communications*. 31(1): 10-36.
- Bruus, 2011 – Bruus, H. (2011). Acoustofluidics 1: Governing equations in microfluidics. *Lab on a Chip*. 11(22): 3742-3751.
- Bruus, 2012a – Bruus, H. (2012). Acoustofluidics 2: Perturbation theory and ultrasound resonance modes. *Lab on a Chip*. 12(1): 20-28.
- Bruus, 2012b – Bruus, H. (2012). Acoustofluidics 10: Scaling laws in acoustophoresis. *Lab on a Chip*. 12(9): 1578-1586.
- Bruus, 2012c – Bruus, H. (2012). Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip*. 12(6):1014-1021.
- Budaev et al., 2019 – Budaev, A.V., Belenkov, R.N., Emelianov, N.A. (2019). Memristive Properties of PANI-Polystyrene/PVDF-TrFE Interface. *Condensed Matter*. 4(2): 56.
- Burianskaya et al., 2024a – Burianskaya, E.L., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Iordanskii, A.L., Maklakova, I.A., Olkhov, A.A. (2024). Multifractal approach for engineering of piezoelectric and multiferroic bioresorbable scaffolds: Information extracted by d(q) and f(α) in box counting methods. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 61: 543-549. IOS Press.

[Burianskaya et al., 2024b](#) – Buryanskaya, E.L., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Iordanskii, A.L., Maklakova, I.A., Olkhov, A.A. (2024). Visualization and quantitative estimation of ferroelectric polymer fiber motility in time-resolved SEM using Gabor atoms. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 61: 689-696. IOS Press.

[Burianskaya et al., 2025](#) – Burianskaya, E.L., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Iordanskii, A.L., Kochervinskii, V.V., Maklakova, I.A., Olkhov, A.A., Ratnovskaya, A.V. (2025). Time-resolved estimation of multifractal spectra of ferroelectric/piezoelectric polymer dynamics and neuromimetic fiber orientation: Towards electric-field- and electron-beam-controllable scaffolds and tissue-engineering constructs with dynamic beads. *Advanced Structured Materials*. 221: 97-119.

[Buryanskaya et al., 2023](#) – Buryanskaya, E.L., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Kochervinskii, V.V., Maklakova, I.A. (2023). Time-resolved multifractal analysis of electron beam induced piezoelectric polymer fiber dynamics: towards multiscale thread-based microfluidics or acoustofluidics. *Advanced Structured Materials*. 195: 35-58.

[Bystrov, Leuchtag, 1994](#) – Bystrov, V.S., Leuchtag, H.R. (1994). Bioferroelectricity: Modeling the transitions of the sodium channel. *Ferroelectrics*. 155(1): 19-24.

[Bystrov, Leuchtag, 1996](#) – Bystrov, V.S., Leuchtag, H.R. (1996). Phase transitions in the ferroelectric-active model of ion channels of biomembranes. *Ferroelectrics*. 186(1): 305-307.

[Bystrov et al., 1994](#) – Bystrov, V.S., Lakhno, V.D., Molchanov, M. (1994). Ferroelectric active models of ion channels in biomembranes. *Journal of theoretical biology*. 168(4): 383-393.

[Bystrov, 1997](#) – Bystrov, V.S. (1997). Ferroelectric liquid crystal models of ion channels and gating phenomena in biological membranes. *Ferroelectrics Letters Section*. 23(3-4): 87-93.

[Cabot et al., 2020](#) – Cabot, J.M., Daikuara, L.Y., Yue, Z., Hayes, P., Liu, X., Wallace, G.G., Paull, B. (2020). Electrofluidic control of bioactive molecule delivery into soft tissue models based on gelatin methacryloyl hydrogels using threads and surgical sutures. *Scientific Reports*. 10(1): 1-10.

[Carpi et al., 2011](#) – Carpi, F., Kornbluh, R., Sommer-Larsen, P., Alici, G. (2011). Electroactive polymer actuators as artificial muscles: are they ready for bioinspired applications? *Bioinspiration & biomimetics*. 6(4): 045006.

[Catenacci et al., 2017](#) – Catenacci, M.J., Flowers, P.F., Cao, C., Andrews, J.B., Franklin, A.D., Wiley, B.J. (2017). Fully Printed Memristors from Cu–SiO₂ Core–Shell Nanowire Composites. *Journal of Electronic Materials*. 46(7): 4596-4603.

[Chen, Kamiya, 1981](#) – Chen, J.C., Kamiya, N. (1981). Differential heat treatment of the Nitella internodal cell and its relation to cytoplasmic streaming. *Cell Structure and Function*. 6(3): 201-207.

[Chen et al., 2017](#) – Chen, X., Han, X., Shen, Q.D. (2017). PVDF-Based Ferroelectric Polymers in Modern Flexible Electronics. *Advanced Electronic Materials*. 3(5): 1600460.

[Choi, Jiang, 2006](#) – Choi, S., Jiang, Z. (2006). A novel wearable sensor device with conductive fabric and PVDF film for monitoring cardiorespiratory signals. *Sensors and Actuators A: Physical*. 128(2): 317-326.

[Colin et al., 2012](#) – Colin, A., Squires, T.M., Bocquet, L. (2012). Soft matter principles of microfluidics. *Soft Matter*. 8(41): 10527-10529.

[Cong et al., 2019](#) – Cong, J., Jing, J., Chen, C., Dai, Z. (2019). Development of a PVDF Sensor Array for Measurement of the Dynamic Pressure Field of the Blade Tip in an Axial Flow Compressor. *Sensors*. 19(6): 1404.

[Conze et al., 2008](#) – Conze, J., Junge, K., Weiß, C., Anurov, M., Oettinger, A., Klinge, U., Schumpelick, V. (2008). New polymer for intra-abdominal meshes – PVDF copolymer. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*. 87(2): 321-328.

[Ding et al., 2007](#) – Ding, Y., Liu, J., Wang, H., Shen, G., Yu, R. (2007). A piezoelectric immunosensor for the detection of α -fetoprotein using an interface of gold/hydroxyapatite hybrid nanomaterial. *Biomaterials*. 28(12): 2147-2154.

[Ding et al., 2008a](#) – Ding, Y., Liu, J., Jin, X., Lu, H., Shen, G., Yu, R. (2008). Poly-L-lysine/hydroxyapatite/carbon nanotube hybrid nanocomposite applied for piezoelectric immunoassay of carbohydrate antigen 19-9. *Analyst*. 133(2): 184-190.

- Ding et al., 2008b – Ding, Y., Liu, J., Jin, X., Shen, G., Yu, R. (2008). A novel piezoelectric immunosensor for CA125 using a hydroxyapatite/chitosan nanocomposite-based biomolecular immobilization method. *Australian journal of chemistry*. 61(7): 500-505.
- Dong et al., 2006 – Dong, Z., Huang, D.G., Zhang, D.Y. (2006). Preparation and design of PVDF pyroelectric thin film infrared and ultraviolet fire sensor. *Proc. SPIE*. 6041: 60411R.
- Dual, Möller, 2012 – Dual, J., Möller, D. (2012). Acoustofluidics 4: Piezoelectricity and application in the excitation of acoustic fields for ultrasonic particle manipulation. *Lab on a Chip*. 12(3): 506-514.
- Dual, Schwarz, 2012 – Dual, J., Schwarz, T. (2012). Acoustofluidics 3: Continuum mechanics for ultrasonic particle manipulation. *Lab on a Chip*. 12(2): 244-252.
- Dual et al., 2012a – Dual, J., Hahn, P., Leibacher, I., Möller, D., Schwarz, T. (2012). Acoustofluidics 6: Experimental characterization of ultrasonic particle manipulation devices. *Lab on a Chip*. 12(5): 852-862.
- Dual et al., 2012b – Dual, J., Hahn, P., Leibacher, I., Möller, D., Schwarz, T., Wang, J. (2012). Acoustofluidics 19: Ultrasonic microrobotics in cavities: devices and numerical simulation. *Lab on a Chip*. 12(20): 4010-4021.
- Erenas et al., 2016 – Erenas, M.M., de Orbe-Payá, I., Capitan-Vallvey, L.F. (2016). Surface modified thread-based microfluidic analytical device for selective potassium analysis. *Analytical chemistry*. 88(10): 5331-5337.
- Esmaeili et al., 2019 – Esmaeili, E., Soleimani, M., Ghiass, M.A., Hatamie, S., Vakilian, S., Zomorrod, M.S., Sadeghzadeh, N., Vossoughi, M., Hosseinzadeh, S. (2019). Magnetolectric nanocomposite scaffold for high yield differentiation of mesenchymal stem cells to neural-like cells. *Journal of cellular physiology*. 234(8): 13617-13628.
- Evander, Nilsson, 2012 – Evander, M., Nilsson, J. (2012). Acoustofluidics 20: applications in acoustic trapping. *Lab on a Chip*. 12(22): 4667-4676.
- Fadhil et al., 2013 – Fadhil, N., Saber, D., Patra, P. (2013, May). Energy harvesting using nana scale dual layers PVDF film for blood artery. *Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), 2013 IEEE Long Island*. Pp. 1-6.
- Fiorillo, 1992 – Fiorillo, A.S. (1992). Design and characterization of a PVDF ultrasonic range sensor. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 39(6): 688-692.
- Fujitsuka et al., 1998 – Fujitsuka, N., Sakata, J., Miyachi, Y., Mizuno, K., Ohtsuka, K., Taga, Y., Tabata, O. (1998). Monolithic pyroelectric infrared image sensor using PVDF thin film. *Sensors and Actuators A: Physical*. 66(1-3): 237-243.
- Fukada, Ando, 1988 – Fukada, E., Ando, Y. (1988). Bending piezoelectricity in a microbially produced poly- β -hydroxybutyrate. *Biorheology*. 25(1-2): 297-302.
- Gaihre et al., 2011 – Gaihre, B., Alici, G., Spinks, G.M., Cairney, J.M. (2011). Synthesis and performance evaluation of thin film PPy-PVDF multilayer electroactive polymer actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*. 165(2): 321-328.
- Gao et al., 2020 – Gao, X., Liang, S., Ferri, A., Huang, W., Rouxel, D., Devaux, X., Li, X.G., Yang, H., Chshiev, M., Desfeux, R., Da Costa, A. (2020). Enhancement of ferroelectric performance in PVDF:Fe₃O₄ nanocomposite based organic multiferroic tunnel junctions. *Applied Physics Letters*. 116(15): 152905.
- Ge et al., 2019 – Ge, J., Zhang, S., Liu, Z., Xie, Z., Pan, S. (2019). Flexible artificial nociceptor using a biopolymer-based forming-free memristor. *Nanoscale*. 11(14): 6591-6601.
- Gedge, Hill, 2012 – Gedge, M., Hill, M. (2012). Acoustofluidics 17: Theory and applications of surface acoustic wave devices for particle manipulation. *Lab on a Chip*. 12(17): 2998-3007.
- Georgakopoulos et al., 2015 – Georgakopoulos, S., Del Pozo, F.G., Mas-Torrent, M. (2015). Flexible organic transistors based on a solution-sheared PVDF insulator. *Journal of Materials Chemistry C*. 3(47): 12199-12202.
- Ghosh, Mandal, 2017 – Ghosh, S.K., Mandal, D. (2017). Sustainable energy generation from piezoelectric biomaterial for noninvasive physiological signal monitoring. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 5(10): 8836-8843.
- Giao et al., 2004 – Giao, M.A.P., Rodrigues, N.A.S., Riva, R., Schwab, C. (2004). PVDF sensor in laser ablation experiments. *Review of scientific instruments*. 75(12): 5213-5215.

[Gimenes et al., 2004](#) – Gimenes, R., Zaghete, M.A., Bertolini, M., Varela, J.A., Coelho, L.O., Silva Jr, N.F. (2004). Composites PVDF-TrFE/BT used as bioactive membranes for enhancing bone regeneration. *Proc. SPIE*. 5385: 539-547.

[Girault, Schiffrin, 1986](#) – Girault, H.H.J., Schiffrin, D.J. (1986). Charge effects on phospholipid monolayers in relation to cell motility. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*. 857(2): 251-258.

[Glynne-Jones, Hill, 2013](#) – Glynne-Jones, P., Hill, M. (2013). Acoustofluidics 23: acoustic manipulation combined with other force fields. *Lab on a Chip*. 13(6): 1003-1010.

[Glynne-Jones et al., 2012](#) – Glynne-Jones, P., Boltryk, R.J., Hill, M. (2012). Acoustofluidics 9: Modelling and applications of planar resonant devices for acoustic particle manipulation. *Lab on a Chip*. 12(8): 1417-1426.

[Gradov et al., 2020a](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Iordanskii, A.L., Olkhov, A.A., Kholuiskaya, S.N. (2020). Isopotential mapping of electron beam induced dielectric charging of the phb nonwoven fabric structures using sobel-feldman gradient operator. *2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*. Pp. 662-665. IEEE.

[Gradov et al., 2020b](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Olkhov, A.A., Iordanskii, A.L. (2020). Charge propagation along the polymer fiber of polyhydroxybutyrate: Is it possible to apply the cable model? *Key Engineering Materials*. 869: 246-258.

[Gradov et al., 2021](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Kochervinskij, V.V. (2021). Biomimetic biocompatible ferroelectric polymer materials with an active response for implantology and regenerative medicine. In *Organic Ferroelectric Materials and Applications*, WP Series in Electronic and Optical Materials. Pp. 571-619. United Kingdom. United Kingdom.

[Gradov et al., 2022](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Kholuiskaya, S.N., Olkhov, A.A. (2022). Electron plasma charging effects on the biocompatible electrospun dielectric fibers. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 50(1): 178-186.

[Gradov et al., 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.

[Gradov et al., 2025](#) – Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Ratnovskaya, A.V., Buryanskaya, E.L., Olkhov, A.A., Iordanskii, A.L., Kochervinskii, V.V. (2025). Towards ferroelectric smart polymer fiber-based MEMS/MOEMS/NEMS with laser-assisted control and electron-beam addressing of the fiber actuators. *Advanced Structured Materials*. 221: 325-360.

[Gu et al., 2005](#) – Gu, H., Zhao, Y., Wang, M.L. (2005). A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*. 12(3-4): 329-343.

[Hammes et al., 1992](#) – Hammes, P.C.A., Regtien, P.P.L. (1992). An integrated infrared sensor using the pyroelectric polymer PVDF. *Sensors and Actuators A: Physical*. 32(1-3): 396-402.

[Harris, 2009](#) – Harris, G.R. (2009). Piezoelectric Poly (Vinylidene) Fluoride (PVDF) in Biomedical Ultrasound Exposimetry. *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators*. Pp. 369-383.

[Hawkes, Radel, 2013](#) – Hawkes, J.J., Radel, S. (2013). Acoustofluidics 22: Multi-wavelength resonators, applications and considerations. *Lab on a Chip*. 13(4): 610-627.

[Helluin et al., 2001](#) – Helluin, O., Beyermann, M., Leuchtag, H.R., Duclouhier, H.I.E.E.E. (2001). A critical role for the branched sidechain adjacent to the third arginine of the sodium channel voltage sensor. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 8(4): 637-643.

[Hermenegildo et al., 2019](#) – Hermenegildo, B., Ribeiro, C., Pérez-Álvarez, L., Vilas, J.L., Learmonth, D.A., Sousa, R.A., Martins, P., Lanceros-Méndez, S. (2019). Hydrogel-based magnetoelectric microenvironments for tissue stimulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 181: 1041-1047.

[Hitscherich et al., 2016](#) – Hitscherich, P., Wu, S., Gordan, R., Xie, L. H., Arinzeh, T., Lee, E.J. (2016). The effect of PVDF-TrFE scaffolds on stem cell derived cardiovascular cells. *Biotechnology and bioengineering*. 113(7): 1577-1585.

[Hoop et al., 2017](#) – Hoop, M., Chen, X.Z., Ferrari, A., Mushtaq, F., Ghazaryan, G., Tervoort, T., Poulidakos, D., Nelson, B., Pané, S. (2017). Ultrasound-mediated piezoelectric differentiation of neuron-like PC12 cells on PVDF membranes. *Scientific reports*. 7(1): 4028.

[Hou et al., 2013](#) – Hou, C., Huang, T., Wang, H., Yu, H., Zhang, Q., Li, Y. (2013). A strong and stretchable self-healing film with self-activated pressure sensitivity for potential artificial skin applications. *Scientific reports*. 3: 3138.

[Jacobs et al., 2014](#) – Jacobs, A.R. (2014). Structure-property relationships in a polymer memristor. University of California, Santa Barbara.

[Jafer, Arshak, 2008](#) – Jafer, E., Arshak, K. (2008). The use of PE/PVDF pressure and temperature sensors in smart wireless sensor network system developed for environmental monitoring. *Sensor Letters*. 6(4): 477-489.

[Jayakumar et al., 2013](#) – Jayakumar, O.D., Mandal, B.P., Majeed, J., Lawes, G., Naik, R., Tyagi, A.K. (2013). Inorganic-organic multiferroic hybrid films of Fe₃O₄ and PVDF with significant magneto-dielectric coupling. *Journal of Materials Chemistry C*. 1(23): 3710-3715.

[Jayakumar et al., 2015](#) – Jayakumar, O.D., Abdelhamid, E.H., Kotari, V., Mandal, B.P., Rao, R., Naik, V.M., Naik, R., Tyagi, A.K. (2015). Fabrication of flexible and self-standing inorganic-organic three phase magneto-dielectric PVDF based multiferroic nanocomposite films through a small loading of graphene oxide (GO) and Fe₃O₄ nanoparticles. *Dalton Transactions*. 44(36): 15872-15881.

[Jeon et al., 2009](#) – Jeon, J.H., Kang, S.P., Lee, S., Oh, I.K. (2009). Novel biomimetic actuator based on SPEEK and PVDF. *Sensors and actuators B: Chemical*. 143(1): 357-364.

[Kakoei et al., 2010](#) – Kakoei, S., Baghaei, F., Dabiri, S., Parirokh, M., Kakoei, S. (2010). A comparative in vivo study of tissue reactions to four suturing materials. *Iranian Endodontic Journal*. 5(2): 69.

[Kamiya, Kuroda, 1956](#) – Kamiya, N., Kuroda, K. (1956). Velocity distribution of the protoplasmic streaming in Nitella cells. *Bot. Mag. Tokyo*. 69(822): 43-554.

[Kamiya, Kuroda, 1958](#) – Kamiya, N., Kuroda, K. (1958). Measurement of the motive force of the protoplasmic rotation in Nitella. *Protoplasma*. 50(1): 144-148.

[Kamiya, Kuroda, 1966](#) – Kamiya, N., Kuroda, K. (1966). Some observations of protoplasmic streaming in Acetabularia. *Bot Mag Tokyo*, 79, 706-713.

[Kamiya, Seifriz, 1954](#) – Kamiya, N., Seifriz, W. (1954). Torsion in a protoplasmic thread. *Experimental Cell Research*. 6(1): 1-16.

[Kamiya, Tazawa, 1966](#) – Kamiya, N., Tazawa, M. (1966). Surgical operations on characean cells with special reference to cytoplasmic streaming. *Ann. Rep. Biol. Works, Fac. Sci. Osaka Univ.* 14: 95-106.

[Kamiya et al., 1957a](#) – Kamiya, N., Nakajima, H., Abe, S. (1957). Physiology of the motive force of protoplasmic streaming. *Protoplasma*. 48(1): 94-112.

[Kamiya et al., 1957b](#) – Kamiya, N., Abe, S., Nakajima, H. (1957). Simultaneous measurement of respiration and the motive force of protoplasmic streaming in the myxomycete plasmodium. I. Outline of the method. *Proceedings of the Japan Academy*. 33(4): 206-210.

[Kamiya et al., 1957c](#) – Kamiya, N., Abe, S., Nakajima, H. (1957). Simultaneous measurement of respiration and the motive force of protoplasmic streaming in the myxomycete plasmodium. II. The effect of cyanide. *Proceedings of the Japan Academy*. 33(7): 407-409.

[Kamiya et al., 1957d](#) – Kamiya, N., Abe, S., Nakajima, H. (1958). Simultaneous Measurement of Respiration and the Motive Force of Protoplasmic Streaming in the Myxomycete Plasmodium III. The Effect of Oxygen Tension. *Proceedings of the Japan Academy*. 34(8): 530-533.

[Kamiya, 1940](#) – Kamiya, N. (1940). The control of protoplasmic streaming. *Science*. 92(2394): 462-463.

[Kamiya, 1950](#) – Kamiya, N. (1950). The protoplasmic flow in the myxomycete plasmodium as revealed by a volumetric analysis. *Protoplasma*. 39(3): 344-357.

[Kamiya, 1959a](#) – Kamiya, N. (1959). Motive Force Responsible for the Protoplasmic Streaming. *Protoplasmic Streaming*. Pp. 38-52. Vienna: Springer Vienna.

[Kamiya, 1959b](#) – Kamiya, N. (1959). Energetics of Protoplasmic Streaming. *Protoplasmic Streaming*. Pp. 64-81. Vienna: Springer Vienna.

[Kamiya, 1959c](#) – Kamiya, N. (1959). Experimental Approaches to the Mechanism of the Protoplasmic Streaming. *Protoplasmic Streaming*. Pp. 138-163. Vienna: Springer Vienna.

- [Kamiya, 1960](#) – Kamiya, N. (1960). Physics and chemistry of protoplasmic streaming. *Annual Review of Plant Physiology*. 11(1): 323-340.
- [Kamiya, 1981](#) – Kamiya, N. (1981). Physical and chemical basis of cytoplasmic streaming. *Annual Review of Plant Physiology*. 32(1): 205-236.
- [Kamiya, 1984](#) – Kamiya, N. (1984). III-5 Cytoplasmic Streaming. *Cell Structure and Function*. 9(Supplement): s81-s86.
- [Kamiya, 1986](#) – Kamiya, N. (1986). Cytoplasmic streaming in giant algal cells: a historical survey of experimental approaches. *The botanical magazine= Shokubutsu-gaku-zasshi*. 99(4): 441-467.
- [Kapat et al., 2020](#) – Kapat, K., Shubhra, Q.T., Zhou, M., Leeuwenburgh, S. (2020). Piezoelectric Nano-Biomaterials for Biomedicine and Tissue Regeneration. *Advanced Functional Materials*. 1909045.
- [Karalis et al., 2023](#) – Karalis, T., Tsiapakidou, S., Grimbizis, G.F., Mikos, T. (2023). Surgical results in POP/UI surgery after using PVDF compared to other materials. A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*. 284: 110-119.
- [Kharlanov, 2017](#) – Kharlanov, A.V. (2017). Forced acoustic oscillations of biological cell. *Bioelectromagnetics*. 38(8): 613-617.
- [Kitsara et al., 2019](#) – Kitsara, M., Blanquer, A., Murillo, G., Humblot, V., Vieira, S.D.B., Nogués, C., Ibáñez, E., Esteve, J., Barrios, L. (2019). Permanently hydrophilic, piezoelectric PVDF nanofibrous scaffolds promoting unaided electromechanical stimulation on osteoblasts. *Nanoscale*. 11(18): 8906-8917.
- [Klinge et al., 2002](#) – Klinge, U., Klosterhalfen, B., Öttinger, A.P., Junge, K., Schumpelick, V. (2002). PVDF as a new polymer for the construction of surgical meshes. *Biomaterials*. 23(16): 3487-3493.
- [Klink et al., 2011](#) – Klink, C.D., Junge, K., Binnebösel, M., Alizai, H.P., Otto, J., Neumann, U.P., Klinge, U. (2011). Comparison of long-term biocompatibility of PVDF and PP meshes. *Journal of Investigative Surgery*. 24(6): 292-299.
- [Kochervinskii et al., 2022](#) – Kochervinskii, V.V., Gradov, O.V., Gradova, M.A. (2022). Fluorine-containing ferroelectric polymers and their application in engineering and biomedicine. *Russian Chemical Reviews*. 91(11): RCR5037.
- [Kuroda, Kamiya, 1981](#) – Kuroda, K., Kamiya, N. (1981). Behavior of cytoplasmic streaming in *Nitella* during centrifugation as revealed by the television centrifuge-microscope. *Biorheology*. 18(3-6): 633-641.
- [Lambertz et al., 2015](#) – Lambertz, A., Schröder, K.M., Schöb, D.S., Binnebösel, M., Anurov, M., Klinge, U., Neumann, U.P., Klink, C.D. (2015). Polyvinylidene fluoride as a suture material: evaluation of comet tail-like infiltrate and foreign body granuloma. *European Surgical Research*. 55(1-2): 1-11.
- [Laroche et al., 1995a](#) – Laroche, G., Marois, Y., Schwarz, E., Guidoin, R., King, M.W., Pâris, E., Douville, Y. (1995). Polyvinylidene fluoride monofilament sutures: Can they be used safely for long-term anastomoses in the thoracic aorta? *Artificial Organs*. 19(11): 1190-1199.
- [Laroche et al., 1995b](#) – Laroche, G., Marois, Y., Guidoin, R., King, M.W., Martin, L., How, T., Douville, Y. (1995). Polyvinylidene fluoride (PVDF) as a biomaterial: from polymeric raw material to monofilament vascular suture. *Journal of Biomedical Materials Research*. 29(12): 1525-1536.
- [Lee, Arinzeh, 2012](#) – Lee, Y.S., Arinzeh, T.L. (2012). The influence of piezoelectric scaffolds on neural differentiation of human neural stem/progenitor cells. *Tissue Engineering Part A*. 18(19-20): 2063-2072.
- [Lee et al., 2015](#) – Lee, J.S., Shin, K.Y., Cheong, O.J., Kim, J.H., Jang, J. (2015). Highly sensitive and multifunctional tactile sensor using free-standing ZnO/PVDF thin film with graphene electrodes for pressure and temperature monitoring. *Scientific reports*. 5: 7887.
- [Lee et al., 2017a](#) – Lee, Y.S., Wu, S., Arinzeh, T.L., Bunge, M.B. (2017). Enhanced noradrenergic axon regeneration into schwann cell-filled PVDF-TrFE conduits after complete spinal cord transection. *Biotechnology and bioengineering*. 114(2): 444-456.
- [Lee et al., 2017b](#) – Lee, Y.S., Wu, S., Arinzeh, T.L., Bunge, M.B. (2017). Transplantation of schwann cells inside PVDF-TrFE conduits to bridge transected rat spinal cord stumps to promote axon regeneration across the gap. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*. 129: e56077.

- Lemanov, 2000** – *Lemanov, V.V.* (2000). Piezoelectric and pyroelectric properties of protein amino acids as basic materials of soft state physics. *Ferroelectrics*. 238(1): 211-218.
- Lenshof et al., 2012** – *Lenshof, A., Magnusson, C., Laurell, T.* (2012). Acoustofluidics 8: Applications of acoustophoresis in continuous flow microsystems. *Lab on a Chip*. 12(7): 1210-1223.
- Leuchtag, Bystrov, 1999** – *Leuchtag, H.R., Bystrov, V.S.* (1999). Theoretical models of conformational transitions and ion conduction in voltage-dependent ion channels: Bioferroelectricity and superionic conduction. *Ferroelectrics*. 220(1): 157-204.
- Leuchtag, 1987a** – *Leuchtag, H.R.* (1987). Indications of the existence of ferroelectric units in excitable-membrane channels. *Journal of theoretical biology*. 127(3): 321-340.
- Leuchtag, 1987b** – *Leuchtag, H.R.* (1987). Phase transitions and ion currents in a model ferroelectric channel unit. *Journal of theoretical biology*. 127(3): 341-359.
- Leuchtag, 1995** – *Leuchtag, H.R.* (1995). Fit of the dielectric anomaly of squid axon membrane near heat-block temperature to the ferroelectric Curie-Weiss law. *Biophysical chemistry*. 53(3): 197-205.
- Leuchtag, 2000** – *Leuchtag, H.R.* (2000). Bioferroelectricity in models of voltage-dependent ion channels. *Ferroelectrics*. 236(1): 23-33.
- Li et al., 2010** – *Li, F., Liu, W., Stefanini, C., Fu, X., Dario, P.* (2010). A novel bioinspired PVDF micro/nano hair receptor for a robot sensing system. *Sensors*. 10(1): 994-1011.
- Li et al., 2016** – *Li, X., Panicker, G.V., Im, J.J.* (2016, August). A study for the development of K-sound based automatic blood pressure device using PVDF film. *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Pp. 255-258.
- Li et al., 2019** – *Li, Y., Liao, C., Tjong, S.C.* (2019). Electrospun polyvinylidene fluoride-based fibrous scaffolds with piezoelectric characteristics for bone and neural tissue engineering. *Nanomaterials*. 9(7): 952.
- Lins et al., 2017** – *Lins, L.C., Wianny, F., Livi, S., Dehay, C., Duchet-Rumeau, J., Gérard, J.F.* (2017). Effect of polyvinylidene fluoride electrospun fiber orientation on neural stem cell differentiation. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 105(8): 2376-2393.
- Litniewski, Bereiter-Hahn, 1992** – *Litniewski, J., Bereiter-Hahn, J.* (1992). Acoustic velocity determination in cytoplasm by V (z) shift. *Acoustical imaging*. Pp. 535-538. Springer, Boston, MA.
- Liu et al., 2015** – *Liu, Y., Zhan, Q., Wang, B., Li, H., Wu, Y., Chen, B., Sun, D., Mao, S., Li, R.W.* (2015). Modulation of magnetic anisotropy in flexible multiferroic FeGa/PVDF heterostructures under various strains. *IEEE Transactions on Magnetics*. 51(11).
- Low et al., 2011** – *Low, Y.K.A., Meenubharathi, N., Niphadkar, N.D., Boey, F.Y.C., Ng, K.W.* (2011). α - and β -poly (vinylidene fluoride) evoke different cellular behaviours. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 22(12): 1651-1667.
- Lyakhov, Raikhlin-Eisenkraft, 2002** – *Lyakhov, V., Raikhlin-Eisenkraft, B.* (2002). Adaptive activity of neural structures—a thermodynamic approach. *Medical hypotheses*. 59(3): 289-296.
- Lynen Jansen et al., 2004** – *Lynen Jansen, P., Klinge, U., Anurov, M., Titkova, S., Mertens, P.R., Jansen, M.* (2004). Surgical mesh as a scaffold for tissue regeneration in the esophagus. *European surgical research*. 36(2): 104-111.
- Machts et al., 2015** – *Machts, R., Reuter, T., Prokop, P.V., Shewtschenko, O., Stubenrauch, M., Shilling, C., Witte, H.* (2015). Energy harvestinh for active implants: powering a ruminal pH-monitoring system. *Biomed Tech*. 60(S1): S35.
- Machts et al., 2018** – *Machts, R., Reuter, T., Prokop, P.V., Shewtschenko, O., Stubenrauch, M., Shilling, C., Witte, H.* (2018). Energy harvestinh for active implants: powering a ruminal pH-monitoring system. *Current Directions in Biomedical Engineering*. 1: 18-21.
- Maeda, Katsura, 1993** – *Maeda, H., Katsura, T.* (1993). Pyroelectric current of oriented purple membrane films. *Biochemical and biophysical research communications*. 192(3): 1016-1022.
- Mandelis, Garcia, 1998** – *Mandelis, A., Garcia, J.A.* (1998). Pd/PVDF thin film hydrogen sensor based on laser-amplitude-modulated optical-transmittance: dependence on H₂ concentration and device physics. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 49(3): 258-267.
- Mano et al., 2003** – *Mano, J.F., Lopes, J.L., Silva, R.A., Brostow, W.* (2003). Creep of PVDF monofilament sutures: service performance prediction from short-term tests. *Polymer*. 44(15): 4293-4300.

- [Marino et al., 2017](#) – Marino, A., Genchi, G.G., Mattoli, V., Ciofani, G. (2017). Piezoelectric nanotransducers: The future of neural stimulation. *Nano Today*. 14: 9-12.
- [Mirfakhrai et al., 2007](#) – Mirfakhrai, T., Madden, J.D., Baughman, R.H. (2007). Polymer artificial muscles. *Materials today*. 10(4): 30-38.
- [Mirzaei et al., 2019a](#) – Mirzaei, A., Saburi, E., Enderami, S.E. (2019). Synergistic effects of polyaniline and pulsed electromagnetic field to stem cells osteogenic differentiation on polyvinylidene fluoride scaffold. *Artif Cells Nanomed. Biotechnol.* 47(1): 3058-66.
- [Mirzaei et al., 2019b](#) – Mirzaei, A., Moghadam, A.S., Abazari, M.F., Nejati, F., Torabinejad, S., Kaabi, M., Enderami, S.E., Ardeshiryajimi, A., Darvish, M., Soleimanifar, F., Saburi, E. (2019). Comparison of osteogenic differentiation potential of induced pluripotent stem cells on 2D and 3D polyvinylidene fluoride scaffolds. *Journal of Cellular Physiology*. 234(10): 17854-17862.
- [Mostafalu et al., 2016](#) – Mostafalu, P., Akbari, M., Alberti, K.A., Xu, Q., Khademhosseini, A., Sonkusale, S.R. (2016). A toolkit of thread-based microfluidics, sensors, and electronics for 3D tissue embedding for medical diagnostics. *Microsystems & Nanoengineering*. 2: 16039.
- [Motamedi et al., 2017a](#) – Motamedi, A.S., Mirzadeh, H., Hajiesmaeilbaigi, F., Bagheri-Khoulenjani, S., Shokrgozar, M. (2017). Effect of electrospinning parameters on morphological properties of PVDF nanofibrous scaffolds. *Progress in biomaterials*. 6(3): 113-123.
- [Motamedi et al., 2017b](#) – Motamedi, A.S., Mirzadeh, H., Hajiesmaeilbaigi, F., Bagheri-Khoulenjani, S., Shokrgozar, M.A. (2017). Piezoelectric electrospun nanocomposite comprising Au NPs/PVDF for nerve tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 105(7): 1984-1993.
- [Must et al., 2015](#) – Must, I., Kaasik, F., Põldsalu, I., Mihkels, L., Johanson, U., Punning, A., Aabloo, A. (2015). Ionic and capacitive artificial muscle for biomimetic soft robotics. *Advanced Engineering Materials*. 17(1): 84-94.
- [Nabvai et al., 2007](#) – Nabvai, M., Siddiqui, M. K., Dargahi, J. (2007). A theoretical study on using PVDF in the acoustic micropump for biomedical applications. *Canadian Acoustics*. 35(3): 156-157.
- [Nagai, Kamiya, 1977](#) – Nagai, R., Kamiya, N. (1977). Differential treatment of Chara cells with cytochalasin B with special reference to its effect on cytoplasmic streaming. *Experimental Cell Research*. 108(1): 231-237.
- [Nagaraja et al., 2019](#) – Nagaraja, T., Dadami, S.T., Manohara, S.R., Angadi, B. (2019). Synthesis and characterization of flexible films of PVDF/Pb (Fe0. 585Nb0. 25W0. 165) O3 polymer multiferroic composites. *AIP Conference Proceedings*. 2142: 070023.
- [Nilghaz et al., 2014](#) – Nilghaz, A., Ballerini, D.R., Fang, X.Y., Shen, W. (2014). Semiquantitative analysis on microfluidic thread-based analytical devices by ruler. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 191: 586-594.
- [O'Reilly et al., 2020](#) – O'Reilly, M.A., Hynynen, K. (2010). Feasibility of a PVDF receiver for monitoring of transcranial therapy. *AIP Conference Proceedings*. 1215: 212.
- [Odon, 2003](#) – Odon, A. (2003). Probe with PVDF sensor for energy measurements of optical radiation. *Measurement Science Review*. 3(Section 3): 111-114.
- [Ottaviani et al., 2006](#) – Ottaviani, G., Martel, S., Carrupt, P.A. (2006). Parallel artificial membrane permeability assay: a new membrane for the fast prediction of passive human skin permeability. *Journal of medicinal chemistry*. 49(13): 3948-3954.
- [Otten et al., 2005](#) – Otten, A., Köster, S., Struth, B., Snigirev, A., Pfohl, T. (2005). Microfluidics of soft matter investigated by small-angle X-ray scattering. *Journal of synchrotron radiation*. 12(6): 745-750.
- [Pal et al., 2015](#) – Pal, M., Guo, R., Bhalla, A. (2015). Ferroelectricity and Ferroic Like Signature in Biological Species: 'Bio-Multiferroics'. *Integrated Ferroelectrics*. 166(1): 74-98.
- [Parirokh et al., 2004](#) – Parirokh, M., Asgary, S., Eghbal, M.J., Stowe, S., Kakoei, S. (2004). A scanning electron microscope study of plaque accumulation on silk and PVDF suture materials in oral mucosa. *International Endodontic Journal*. 37(11): 776-781.
- [Petty et al., 1992](#) – Petty, M., Tsibouklis, J., Petty, M.C., Feast, W.J. (1992). Pyroelectric behaviour of synthetic biomembrane structures. *Thin solid films*. 210: 320-323.

Prasad, Hemalatha, 2017 – Prasad, P.D., Hemalatha, J. (2017, May). Fabrication of P (VDF) fiber membranes with enhanced ferroelectricity through electrospinning. *AIP Conference Proceedings*. 1832: 050102.

Prasad, Hemalatha, 2019a – Prasad, P.D., Hemalatha, J. (2019). Enhanced dielectric and ferroelectric properties of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) fiber embedded polyvinylidene fluoride (PVDF) multiferroic composite films. *Materials Research Express*. 6(9): 094007.

Prasad, Hemalatha, 2019b – Prasad, P.D., Hemalatha, J. (2019). Dielectric and energy storage density studies in electrospun fiber mats of polyvinylidene fluoride (PVDF)/zinc ferrite (ZnFe₂O₄) multiferroic composite. *Physica B: Condensed Matter*. 573: 1-6.

Prusa et al., 2009 – Prusa, R., Krizkova, S., Adam, V., Kukacka, J., Eckschlager, T., Janatova, J., Kizek, R. (2009). PVDF membranes and chicken antibodies as a suitable and easy-to-use tool for detection of metallothionein in blood and extracts from human fibroblasts. *Clinical chemistry*. 55(6): A39.

Przekora, 2019 – Przekora, A. (2019). Current trends in fabrication of biomaterials for bone and cartilage regeneration: Materials modifications and biophysical stimulations. *International journal of molecular sciences*. 20(2): 435.

Pullano et al., 2017 – Pullano, S.A., Mahbub, I., Islam, S.K., Fiorillo, A.S. (2017). PVDF sensor stimulated by infrared radiation for temperature monitoring in microfluidic devices. *Sensors*. 17(4): 850.

Puthillath et al., 2010 – Puthillath, P., Krishnamurthy, C.V., Balasubramaniam, K. (2010). Hybrid inversion of elastic moduli of composite plates from ultrasonic transmission spectra using PVDF plane wave sensor. *Composites Part B: Engineering*. 41(1): 8-16.

Rajala, Lekkala, 2010 – Rajala, S., Lekkala, J. (2010). Film-type sensor materials PVDF and EMFi in measurement of cardiorespiratory signals – A review. *IEEE Sensors Journal*. 12(3): 439-446.

Reches et al., 2010 – Reches, M., Mirica, K.A., Dasgupta, R., Dickey, M.D., Butte, M.J., Whitesides, G.M. (2010). Thread as a matrix for biomedical assays. *ACS applied materials & interfaces*. 2(6): 1722-1728.

Ribeiro et al., 2018 – Ribeiro, C., Correia, D.M., Ribeiro, S., Fernandes, M.M., Lanceros-Mendez, S. (2018). Piezo- and Magnetoelectric Polymers as Biomaterials for Novel Tissue Engineering Strategies. *MRS Advances*. 3(30): 1671-1676.

Roushangar Zineh et al., 2018 – Zineh, B.R., Shabgard, M.R., Roushangar, L. (2018). Mechanical and biological performance of printed alginate/methylcellulose/halloysite nanotube/polyvinylidene fluoride bio-scaffolds. *Materials Science and Engineering: C*. 92: 779-789.

Ryu et al., 2010 – Ryu, K., Chung, S.K., Cho, S.K. (2010). Micropumping by an acoustically excited oscillating bubble for automated implantable microfluidic devices. *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*. 15(3): 163-171.

Sadhal, 2012a – Sadhal, S.S. (2012). Acoustofluidics 13: Analysis of acoustic streaming by perturbation methods. *Lab on a Chip*. 12(13): 2292-2300.

Sadhal, 2012b – Sadhal, S.S. (2012). Acoustofluidics 15: Streaming with sound waves interacting with solid particles. *Lab on a Chip*. 12(15): 2600-2611.

Sadhal, 2012c – Sadhal, S.S. (2012). Acoustofluidics 16: acoustics streaming near liquid-gas interfaces: drops and bubbles. *Lab on a Chip*. 12(16): 2771-2781.

Sánchez-Arteaga et al., 2021 – Sánchez-Arteaga, A., Tallón-Aguilar, L., Tinoco-González, J., Perea del-Pozo, E., Navas-Cuellar, A., Padillo-Ruiz, J. (2021). Use of polyvinylidene fluoride (PVDF) meshes for ventral hernia repair in emergency surgery. *Hernia*. 25(1): 99-106.

Sanghvi et al., 1987 – Sanghvi, N.T., Morris, S.T., Wendt, P.W., Kelly-Fry, E. (1987). A novel approach of generating various frequency bands using a wideband PVDF ultrasound transducer and its application for tissue characterization. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 81(S1): S82

Saxena, Bhalla, 2013 – Saxena, A., Bhalla, A.S. (2013). Bioferroics and biomultiferroics: ferroic behaviour of biological systems. *Materials Research Innovations*. 17(7): 440-441.

Schoeb et al., 2015 – Schoeb, D.S., Klink, C.D., Lambertz, A., Eickhoff, R., Busch, D., Ulmer, T.F., Neumann, U.P., Binnebösel, M. (2015). Influence of gentamicin-coded PVDF suture material on the healing of intestinal anastomosis in a rat model. *International journal of colorectal disease*. 30(11): 1571-1580.

Seifarth et al., 2017 – Seifarth, V., Grosse, J.O., Gossmann, M., Janke, H.P., Arndt, P., Koch, S., Epple, M., Artmann, G.M., Artmann, A.T. (2017). Mechanical induction of bi-directional orientation of primary porcine bladder smooth muscle cells in tubular fibrin-poly (vinylidene fluoride) scaffolds for ureteral and urethral repair using cyclic and focal balloon catheter stimulation. *Journal of biomaterials applications*. 32(3): 321-330.

Sellei et al., 2015 – Sellei, R.M., Bauer, E., Hofman, M., Kobbe, P., Lichte, P., Garrison, R.L., Pape, H.C., Horst, K. (2015). Reconstruction of a quadriceps tendon tear using Polyvinylidene fluoride sutures and patellar screw fixation: a biomechanical study. *The Knee*. 22(6): 535-541.

Sharma et al., 2012 – Sharma, T., Je, S.S., Gill, B., Zhang, J.X. (2012). Patterning piezoelectric thin film PVDF-TrFE based pressure sensor for catheter application. *Sensors and Actuators A: physical*. 177: 87-92.

Sharma et al., 2013 – Sharma, T., Aroom, K., Naik, S., Gill, B., Zhang, J.X. (2013). Flexible thin-film PVDF-TrFE based pressure sensor for smart catheter applications. *Annals of biomedical engineering*. 41(4): 744-751.

Shintaku et al., 2010 – Shintaku, H., Tateno, T., Tsuchioka, N., Tanujaya, H., Nakagawa, T., Ito, J., Kawano, S. (2010). Culturing neurons on MEMS fabricated P (VDF-TrFE) films for implantable artificial cochlea. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*. 5(3): 229-235.

Shirinov, Schomburg, 2008 – Shirinov, A.V., Schomburg, W.K. (2008). Pressure sensor from a PVDF film. *Sensors and Actuators A: Physical*. 142(1): 48-55.

Shuai et al., 2016 – Shuai, C., Huang, W., Feng, P., Gao, C., Shuai, X., Xiao, T., Deng, Y., Peng, S., Wu, P. (2016). Tailoring properties of porous Poly (vinylidene fluoride) scaffold through nano-sized 58s bioactive glass. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 27(1): 97-109.

Subochev et al., 2017 – Subochev, P.V., Postnikova, A.S., Koval'chuk, A.V., Turchin, I.V. (2017). Biomedical Optoacoustic Tomograph Based on a Cylindrical Focusing PVDF Antenna. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 60(3): 233-239.

Sun et al., 2013 – Sun, Z., Hao, L., Chen, W., Li, Z. (2013). Robotic cell injection force control based on static PVDF sensor and Fuzzy-PID control method. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 41(1): 73-86.

Szewczyk et al., 2018 – Szewczyk, P.K., Metwally, S., Karbowniczek, J.E., Marzec, M.M., Stodolak-Zych, E., Gruszczynski, A., Bernasik, A., Stachewicz, U. (2018). Surface potential controlled cell proliferation and collagen mineralization on electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF) fiber scaffolds for bone regeneration. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 5(2): 582-593.

Takata et al., 1967 – Takata, T., Nagai, R., Kamiya, N. (1967). Movement of the Myxomycete Plasmodium. III Artificial Polarization in Endoplasm Distribution in a Plasmodium and its Bearing on Protoplasmic Streaming. *Proceedings of the Japan Academy*. 43(1): 45-50.

Takehara et al., 2016 – Takehara, H., Nagaoka, A., Noguchi, J., Akagi, T., Kasai, H., Ichiki, T. (2016). Implantable Microfluidic Device with Hydrogel Permeable Membrane for Delivering Chemical Compounds and Imaging Neural Cells in Living Mice. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 29(4): 513-518.

Tamez et al., 2010 – Tamez, J.P., Wang, H.Y., Bhalla, A., Guo, R. (2010). Polyvinylidene Fluoride (PVDF) piezoelectric for intravascular monitoring of blood pressure and arterial blood flow rate. *Ceramic Transactions*. 221: 231-243.

Tamez, 2009 – Tamez, J.P. (2009). A Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Piezoelectric Biomedical Transducer for Intravascular Monitoring of Blood Pressure, and Arterial Blood Flow Rate (Doctoral dissertation, University of Texas at San Antonio).

Tanaka et al., 2003 – Tanaka, M., Lévêque, J. L., Tagami, H., Kikuchi, K., Chonan, S. (2003). The "Haptic Finger"—a new device for monitoring skin condition. *Skin Research and Technology*. 9(2): 131-136.

Tanaka et al., 2005 – Tanaka, M., Sugiura, H., Leveque, J.L., Tagami, H., Kikuchi, K., Chonan, S. (2005). Active haptic sensation for monitoring skin conditions. *Journal of materials processing technology*. 161(1-2): 199-203.

Tandon et al., 2019 – Tandon, B., Kamble, P., Olsson, R.T., Blaker, J.J., Cartmell, S.H. (2019). Fabrication and characterisation of stimuli responsive piezoelectric PVDF and hydroxyapatite-filled PVDF fibrous membranes. *Molecules*. 24(10): 1903.

Tang et al., 2016 – Tang, B., Groenewold, J., Zhou, M., Hayes, R.A., Zhou, G.G. (2016). Interfacial electrofluidics in confined systems. *Scientific reports*. 6: 26593.

Tenjimbayashi et al., 2016 – Tenjimbayashi, M., Komatsu, H., Akamatsu, M., Nakanishi, W., Suzuki, K., Hill, J.P., Shiratori, S., Ariga, K. (2016). Determination of blood potassium using a fouling-resistant PVDF–HFP-based optode. *RSC Advances*. 6(17): 14261-14265.

Ting et al., 2016 – Ting, Y., Nugraha, A., Chiu, C.W., Gunawan, H. (2016). Design and characterization of one-layer PVDF thin film for a 3D force sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 250: 129-137.

Toci et al., 2000 – Toci, G., Mazzoni, M., Mazzinghi, P. (2000). Use of a PVDF pyroelectric sensor for beam mapping and profiling of a mid-infrared diode laser. *Review of Scientific Instruments*. 71(4): 1635-1637.

Toda, Dahl, 2007 – Toda, M., Dahl, J. (2007). PVDF corrugated transducer for ultrasonic ranging sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 134(2): 427-435.

Tone et al., 2014 – Tone, R., Tanaka, Y., Fujimoto, Y. (2014). Experiment of receiving ultrasonic wave by using adhesion and a contact type PVDF sensor. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 45(1-4): 171-177.

Tsuda et al., 2011 – Tsuda, T., Baba, M., Sato, Y., Sakao, R., Matsumoto, K., Hagiwara, R., Kuwabata, S. (2011). Nonvolatile RTIL-Based Artificial Muscle: Actuation Mechanism Identified by In Situ EDX Analysis. *Chemistry – A European Journal*. 17(40): 11122-11126.

Urban et al., 1994 – Urban, E., King, M.W., Guidoin, R., Laroche, G., Marois, Y., Martin, L., Cardou, A., Douville, Y. (1994). Why make monofilament sutures out of polyvinylidene fluoride? *ASAIO journal*. 40(2): 145-156.

Wan et al., 2016 – Wan, Z., Pan, Q., Li, K., Liu, D. (2016). Research on the Motion Information Collection of the Elbow Joint Control Muscle Group Based on PVDF Sensor. *Piezoelectrics & Acousto-optics*. 1: 31.

Wang, Xiao, 2014 – Wang, Y.Q., Xiao, Y.L. (2014). A dynamic calibration test on PVDF film pressure sensor with dropping hammer method. *Advanced Materials Research*. 933: 548-553.

Wang et al., 2002 – Wang, F., Tanaka, M., Chonan, S. (2002). A PVDF piezopolymer sensor for unconstrained cardiorespiratory monitoring during sleep. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 16(3-4): 181-188.

Wang et al., 2010 – Wang, X.L., Oh, I.K., Lee, S. (2010). Electroactive artificial muscle based on crosslinked PVA/SPTES. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 150(1): 57-64.

Wang et al., 2011 – Wang, Y.R., Zheng, J.M., Ren, G.Y., Zhang, P.H., Xu, C. (2011). A flexible piezoelectric force sensor based on PVDF fabrics. *Smart Materials and Structures*. 20(4): 045009.

Wang et al., 2019 – Wang, X., Tian, L., Du, H., Li, M., Mu, W., Drinkwater, B.W., Han, X., Mann, S. (2019). Chemical communication in spatially organized protocell colonies and protocell / living cell micro-arrays. *Chemical Science*. 10(41): 9446-9453.

Wei, Xu, 2017 – Wei, Y., Xu, Q. (2017). Design of a PVDF-MFC force sensor for robot-assisted single cell microinjection. *IEEE Sensors Journal*. 17(13): 3975-3982.

Wei et al., 2013 – Wei, Y.C., Fu, L.M., Lin, C.H. (2013). Electrophoresis separation and electrochemical detection on a novel thread-based microfluidic device. *Microfluidics and nanofluidics*. 14(3-4): 583-590.

Weiting et al., 2009 – Weiting, L., Bilsay, S., Cesare, S., Arianna, M., Fei, L., Dajing, C., Paolo, D., Metin, S., Xin, F. (2009, February). A novel artificial hair receptor based on aligned PVDF micro/nano fibers. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Pp. 49-54. IEEE.

Wejinya et al., 2006 – Wejinya, U.C., Shen, Y., Xi, N., Salem, F. (2006, August). Force measurement of embryonic system using in situ PVDF piezoelectric sensor. *2006 49th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*. 1: 108-112. IEEE.

Weng et al., 2019 – Weng, X., Kang, Y., Guo, Q., Peng, B., Jiang, H. (2019). Recent advances in thread-based microfluidics for diagnostic applications. *Biosensors and Bioelectronics*. 132: 171-185.

Wiklund et al., 2012a – Wiklund, M., Green, R., Ohlin, M. (2012). Acoustofluidics 14: Applications of acoustic streaming in microfluidic devices. *Lab on a Chip*. 12(14): 2438-2451.

Wiklund et al., 2013 – Wiklund, M., Radel, S., Hawkes, J.J. (2013). Acoustofluidics 21: ultrasound-enhanced immunoassays and particle sensors. *Lab on a Chip*. 13(1): 25-39.

Wiklund, 2012b – Wiklund, M. (2012). Acoustofluidics 12: Biocompatibility and cell viability in microfluidic acoustic resonators. *Lab on a Chip*. 12(11): 2018-2028.

Wu et al., 2014 – Wu, C.C., Liu, G., Xu, J.L., Zhang, X. (2014). Synthesis of PVDF/ZrO₂ hybrid membranes and its adsorption property toward bovine hemoglobin. *Chemical Journal of Chinese Universities*. 35: 784-90.

Wu et al., 2018 – Wu, S., Chen, M.S., Maurel, P., Lee, Y.S., Bunge, M.B., Arinzeh, T.L. (2018). Aligned fibrous PVDF-TrFE scaffolds with Schwann cells support neurite extension and myelination in vitro. *Journal of neural engineering*. 15(5): 056010.

Yadav, Kumar, 2012 – Yadav, K., Kumar, A. (2012). Fabrication and Study of Hot Pressed Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄-PVDF PbTiO₃. 7ZrO₂. 3O₃ and Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄-PVDF-BaTiO₃. 7ZrO₂. 3O₃ Multiferroic Composite Films. *Ferroics and Multiferroics*. 189: 179-188.

Yang et al., 2017 – Yang, Y.J., Aziz, S., Mehdi, S.M., Sajid, M., Jagadeesan, S., Choi, K.H. (2017). Highly sensitive flexible human motion sensor based on ZnSnO₃/PVDF composite. *Journal of Electronic Materials*. 46(7): 4172-4179.

Yarmarkin et al., 2005 – Yarmarkin, V.K., Shul'man, S.G., Pankova, G.A., Lemanov, V.V. (2005). Pyroelectric properties of some compounds based on protein aminoacids. *Physics of the Solid State*. 47(11): 2135-2137.

Yarmarkin et al., 2007 – Yarmarkin, V.K., Shulman, S.G., Lemanov, V.V. (2007). Pyroelectric properties of novel protein amino acid-based single crystals. *Ferroelectrics*. 348(1): 118-123.

Yi, Liang, 2008 – Yi, J., Liang, H. (2008). A PVDF-based deformation and motion sensor: Modeling and experiments. *IEEE Sensors Journal*. 8(4): 384-391.

Yoshimoto, Kamiya, 1978 – Yoshimoto, Y., Kamiya, N. (1978). Studies on contraction rhythm of the plasmodial strand III. Role of endoplasmic streaming in synchronization of local rhythms. *Protoplasma*. 95(1): 111-121.

Yu-si, 2013 – Yu-si, Q. (2013). The Study of PVDF Piezoelectric-film Finger-cuff Electronic Blood Pressure Monitor. *Science & Technology Information*. 13: 053.

Zhang, Beard, 2004 – Zhang, E.Z., Beard, P.C. (2004). Ultrahigh-sensitivity wideband Fabry-Perot ultrasound sensors as an alternative to piezoelectric PVDF transducers for biomedical photoacoustic detection. *Proc. SPIE*. 5320: 222-230.

Zhang et al., 2002 – Zhang, Q.M., Bharti, V., Kavarnos, G. (2002). Poly (vinylidene fluoride)(PVDF) and its copolymers. *Encyclopedia of Smart Materials*. [Electronic resource]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471216275.esm063>

Zhang et al., 2015 – Zhang, J., Guo, S., Zhang, Y., Zhang, X., Liu, Y., Xu, J., Han, Y., Xu, Y. (2015). Fabrication of PVDF membranes entrapped with oleic acid modified TiO₂ and selective adsorption toward bovine hemoglobin. *RSC Advances*. 5(60): 48607-48614.

Проблемы энергообеспечения активных имплантатов – актуаторы, энергособирающие системы и сенсоры, использующее реверсивное преобразование энергии. Часть 1. От полимерных пьезоэлектриков к имплантируемой волоконной акусто-электрофлюидике

Олег Валерьевич Градов ^{a, *}

^a Институт химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема энергообеспечения возбудимых активных полимерных имплантатов в регенеративной медицине. Подчеркивается необходимость перехода от традиционных электронных схем с внешними источниками питания к системам, имитирующим биологические структуры. Основное внимание уделяется пьезоэлектрическим материалам, таким как поливинилиденфторид (ПВДФ), которые являются биосовместимыми и способны генерировать электричество и сигналы механической стимуляции. Такой подход может привести к созданию эффективных активных имплантируемых устройств, которые беспрепятственно интегрируются в живые ткани.

* Корреспондирующий автор

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

В будущем, вероятно, будут разработаны новые методы изготовления наноструктурированных биоматериалов для сбора энергии для активных имплантатов с возможностью многопараметрической физической возбудимости. Комбинируя различные типы наполнителей (такие, как металлы или оксиды металлов) с ПВДФ, можно разработать схемы программируемой многопараметрической стимуляции, где множественные стимулы (электромагнитные волны, изменения температуры и т. д.) работают на одном преобразователе. Включение новых методов преобразования энергии, выходящих за рамки простых электромеханических петель обратной связи (для сбора энергии), в активные полимерные имплантаты может помочь усовершенствовать терапевтические вмешательства, базирующиеся на использовании свойств активного имплантата (физиотерапия имплантатом). Можно привести примеры композитных скаффолдов, содержащих наночастицы, которые обеспечивают возможность магнито-электрической активации (мультиферроики на основе ПВДФ). Так, например, скаффолды с наночастицами Fe_3O_4 , внедренные в матрицы ПВДФ, демонстрируют перспективность для стимуляции нейронных клеток за счет использования магнитоэлектрических эффектов. Применение имплантатов на основе ПВДФ охватывает различные области регенеративной медицины. Они варьируются от заживления костей с помощью сигналов, опосредованных пьезооткликом, до восстановления сердечной мышцы с помощью электрически активных пьезоэлектрических волокон ПВДФ. Все они могут быть целенаправленно энергообеспечены различными способами сбора энергии для активации возбудимых тканей. Интеграция принципов акустического и электрического воздействия и энергообеспечения на едином материале имплантата позволяет разрабатывать сверхкомпактные имплантируемые платформы, способные активироваться различными путями/принципами преобразования энергии.

Ключевые слова: энергообеспечение имплантов; пьезоэлектричество, ферроэлектрики (сегнетоэлектрики), пирозэффект, мультиферроики, магнитоэлектрическое преобразование, активные полимеры, активные имплантаты, акустоэлектрическая и электроакустическая тераностика, акустофлюидика, сегнетоэлектрические полимеры, мультифизика, ПВДФ.