

ISSN: 2782-5515

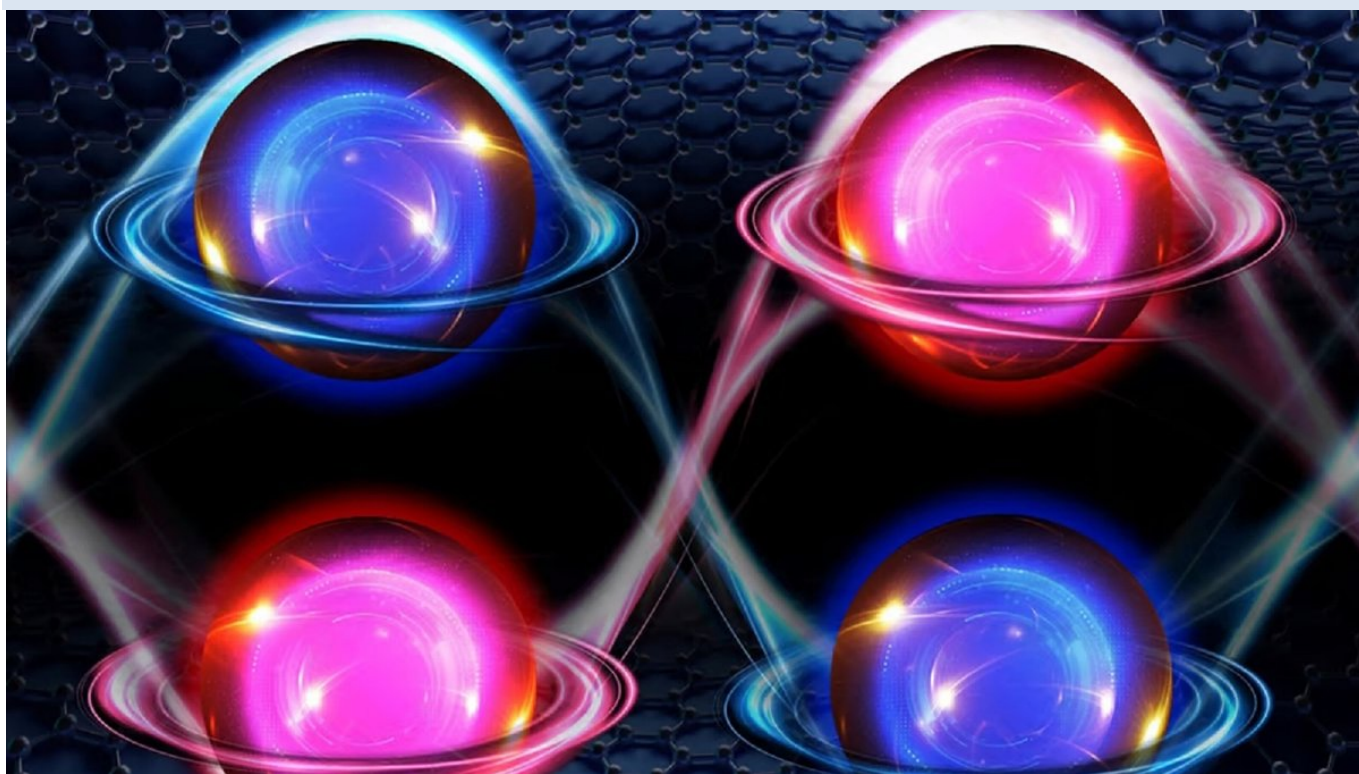


# Перст

Информационный бюллетень  
перспективные технологии  
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 31, выпуск 7/8

июль/август 2024 г.



<https://hi-tech.mail.ru/news/103587-v-grafene-obnaruzhili-novoe-ehlektronnoe-sostoyanie/>

Черноголовка

Том 31, выпуск 7/8

июль/август 2024 г.

В этом выпуске:

**НАНОСТРУКТУРЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ****Брохосомы, уникальные наноструктуры**

Цикадки, маленькие прыгающие насекомые давно привлекают внимание исследователей. Дело в том, что из их организмов выделяются удивительные наночастицы брохосомы, похожие на фуллерен  $C_{60}$ , но состоящие из белков и липидов. Брохосомы, а точнее, пятна белого порошка, впервые обнаружили на крыльях цикадок еще в 1893 году. Позднее выяснили, что брохосомы образуются в органах выделения цикадок. С помощью задних конечностей с рядами зубчиков насекомые размазывают содержащие брохосомы капли на крыльях и других частях тела. Появление электронной микроскопии позволило изучить структуру брохосом. Это полые сферические частицы размером примерно 200–700 нм, ячеистая поверхность которых состоит из пяти- и шестиугольных сквозных отверстий. Были выдвинуты разные предположения использования брохосом цикадками. Российские ученые выяснили, что их слой делает крылья супергидрофобными и предохраняет от загрязняющих липких выделений [1]. В других работах было продемонстрировано, что наличие брохосом на крыльях снижает отражение видимого света. Исследователи из Pennsylvania State Univ. (США) активно занялись поисками способов получения “синтетических брохосом” (термин авторов), перспективных для оптики, энергетики, биомедицины [2,3].

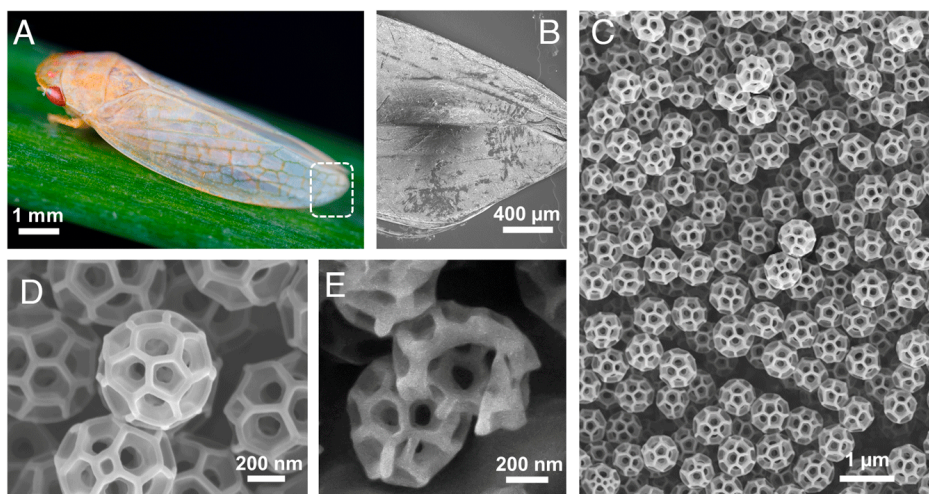


Рис.1. Цикадки и их брохосомы. А – Оптическое изображение цикадки *Gypsonana serpenta*. В – SEM изображение участка, выделенного на (А). SEM изображения (С, D) брохосом и (Е) сечения брохосомы.

И далее ...

**ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ**

- 4 Электроиндуцированный эффект Эйнштейна-де Гааза или что общего у квадрокоптера и антиферромагнетика?

**ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ**

- 6 О работе Одиннадцатой Всероссийской конференции “Топливные элементы и энергоустановки на их основе”
- 7 Новое в магнетизме и магнитных материалах

Фотография цикадок и SEM изображения брохосом приведены на рис. 1 [3]. Видно, что природные брохосомы имеют форму усеченных икосаэдров и напоминают фуллерены  $C_{60}$ .

Добиться воспроизводимого синтеза таких трехмерных наноструктур со взаимосвязанными сквозными отверстиями очень сложно. Были предложены физические и химические варианты. Авторы [2,3] показали, что наиболее перспективным является метод 3d печати на

основе лазерной полимеризации в результате двухфотонного поглощения (*двухфотонная трехмерная лазерная нанопечать*). Фотополимеризация (отверждение) происходит только в фокальном пятне лазера, где максимальна интенсивность поглощаемого света. Смещая это пятно, можно создать необходимую трехмерную микро- и наноструктуру. С помощью такого 3d принтера исследователи получили синтетические брохосомы, показанные на рис. 2 [3].

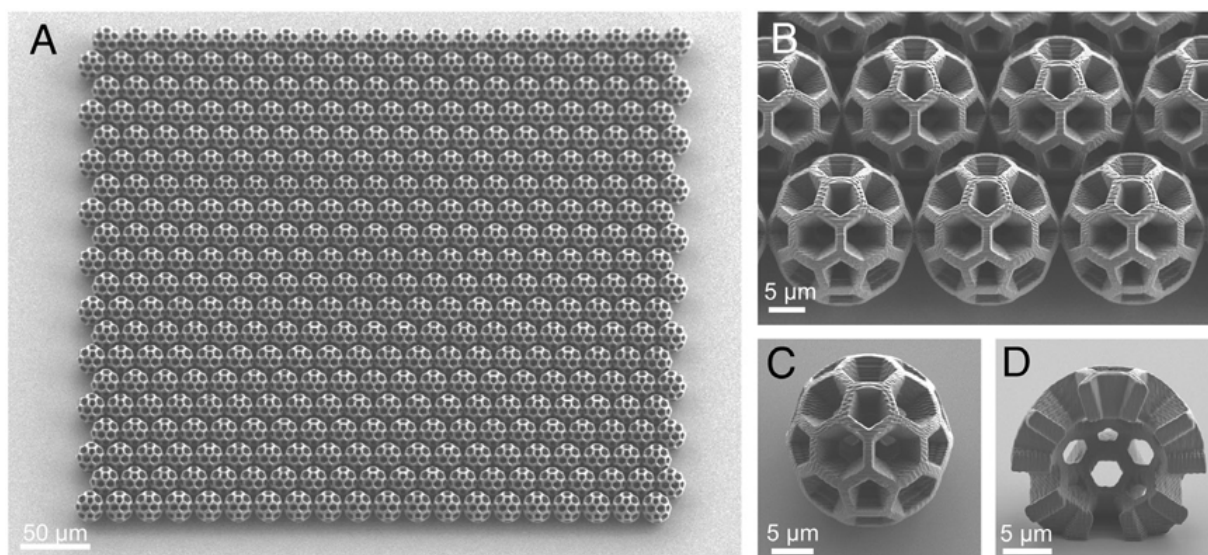


Рис. 2. Синтетические брохосомы, напечатанные на 3d принтере.

(А) – SEM изображение слоя брохосом, площадь  $\sim 400 \times 350$  мкм. Диаметр брохосомы  $\sim 20$  мкм, диаметр сквозного отверстия  $\sim 5$  мкм.

(В, С) – синтетические брохосомы со сквозными отверстиями.

(D) – SEM изображение поперечного сечения брохосомы.

Авторы [2,3] отмечают, что у подавляющего большинства цикадок с длиной тела от  $\sim 3$  до  $\sim 9$  мкм размеры брохосом находятся в диапазоне  $\sim 300$ – $\sim 700$  нм, а диаметры сквозных отверстий – в диапазоне  $\sim 100$ – $\sim 280$  нм. Отношение диаметра сквозного отверстия к диаметру брохосомы, как правило, равно  $0,28 \pm 0,04$  (близко к  $0,29$  по теоретической модели  $C_{60}$ , или модели усеченного икосаэдра). При 3d печати исследователи руководствовались этим соотношением, а также обеспечили такое же, как у природных, отношение толщин оболочки и стенок отверстий к диаметру синтетических брохосом. Важно, что повторяется геометрия природных – 12 пентагональных и 20 гексагональных сквозных отверстий с общей центральной полостью. Конечно, синтетические брохосомы намного больше природных (диаметр  $D \sim 20$  мкм, а диаметр сквозного отверстия  $d \sim 5$  мкм), иначе нельзя было бы добиться масштабируемого производства. Все детали напечатанных

структур больше, чем разрешение 3d принтера. Такая модельная система позволяет изучать оптические свойства, а это представляет большой интерес. Как было сказано выше, результаты некоторых исследований указывали на заметное снижение отражения света благодаря слою брохосом на крыльях цикадок.

Эксперименты исследователей [3] продемонстрировали, что синтетические брохосомы со сквозными отверстиями приводят к 94% снижению отражения света для длин волн  $\lambda$  от  $\sim 2,5$  до  $\sim 24$  мкм (ближний и средний ИК-диапазон). Были также проанализированы спектры отражения брохосом, синтезированных без сквозных отверстий. Эксперименты и результаты моделирования показали, что снижение отражения на 80% происходит на всех брохосомах вследствие рассеяния Ми (рассеяния волны света сферической частицей) для  $\lambda \sim D$ , а дополнительное снижение для  $\lambda \sim d$  обусловлено

поглощением света в полости благодаря наличию сквозных отверстий (рис. 3 [3]).

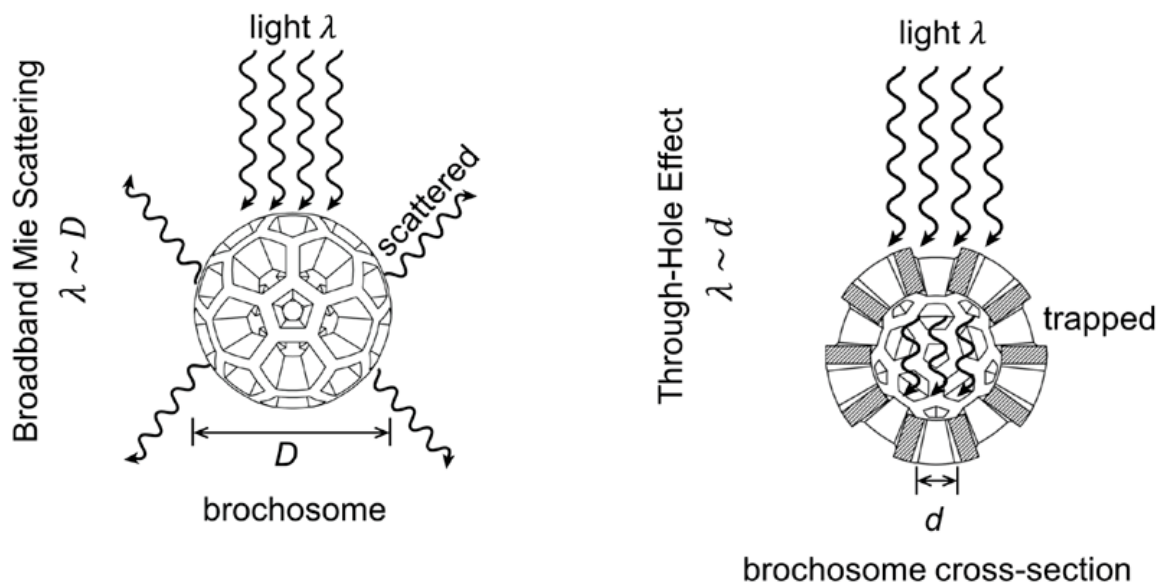


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая рассеяние Ми, когда  $\lambda \sim D$ , и эффект поглощения через сквозные отверстия, когда  $\lambda \sim d$  (на нижней схеме показано сечение брохосомы).

Результаты, полученные авторами, показывают важность геометрии брохосом. Вероятно, в процессе эволюции у цикадок образовались брохосомы именно такого диаметра и с такими сквозными отверстиями, которые снижают отражение и видимого (400–700 нм), и УФ света (300–400 нм). Это помогает цикадкам спасаться от хищников, например, птиц.

Удивительные брохосомы цикадок подсказали авторам [2,3] идею создания синтетических брохосом для новых оптических материалов, которые могут взаимодействовать с электромагнитным излучением широкого диапазона спектра. Исследователи предложили эффективный метод синтеза на основе двухфотонной трехмерной лазерной нанопечати. Новые материалы могут найти применение в качестве антиотражающих и самоочищающихся покрытий, светопоглощающих материалов, для оптического шифрования и многоспектральной маскировки.

О. Алексеева

1. R.Rakitov et al., *J. Roy. Soc. Interface* **10**, 20130445 (2013).
2. J.Wang et al., *Nano Res.* **17**, 734 (2024).
3. L.Wang et al., *PNAS* **121**, e2312700121 (2024).

## ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫ МАТЕРИАЛЫ

### *Электроиндуцированный эффект Эйнштейна-де Гааза или что общего у квадрокоптера и антиферромагнетика?*

Идея статьи [1] пришла авторам из физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова при наблюдении за движением квадрокоптера, которое полностью определяется скоростью вращения винтов. В статическом положении квадрокоптера моменты импульсов двух диагональных винтов полностью компенсируются другой диагональю. Если же необходимо повернуть аппарат по часовой стрелке, то для этого нужно увеличить скорость вращения винтов, крутящихся против часовой стрелки: вследствие закона сохранения момента импульса корпус квадрокоптера повернется в противоположную сторону (рис. 1).

Подобно этому в антиферромагнетике спины двух магнитных подрешеток полностью уравновешивают друг друга (рис. 1). Если же вызвать декомпенсацию магнитных моментов подрешеток, то, вследствие эффекта Эйнштейна-де Гааза, возникновение намагниченности приведет к появлению и механического момента. Один из способов создать некомпенсированную намагниченность в антиферромагнетике – приложить электрическое поле, которое нарушит симметрию, чтобы одна из магнитных подрешеток получила преимущество.

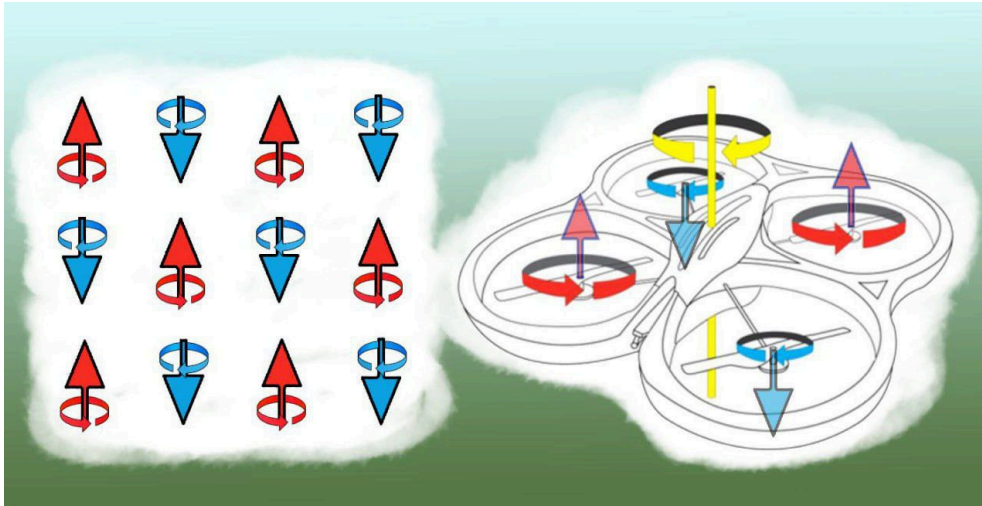


Рис. 1. Аналогия между антиферромагнетиком и квадрокоптером: спины двух магнитных подрешеток полностью уравнивают друг друга, как у квадрокоптера в статическом положении. При декомпенсации моментов количества движения винтов возникает вращение аппарата, а при появлении разностной намагниченности подрешеток – макроскопическое вращение кристалла.

Это явление известно как обратный магнитоэлектрический эффект с середины прошлого века, однако тот факт, что магнитоэлектрический эффект должен сопровождаться еще и магнитомеханическим вращением не привлекало внимание исследователей, по-видимому, из-за малости последнего.

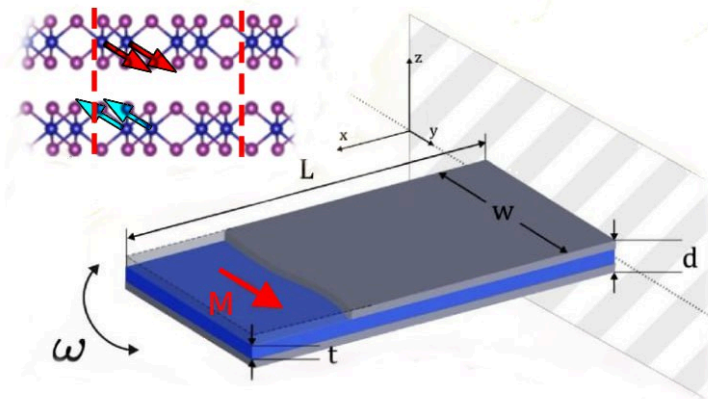


Рис. 2. Микроэлектромеханическая система из ван-дер-ваальсова магнетика (показан синим), зажатого между графеновыми электродами (показаны серым). Длина  $L$  и ширина  $w$  кантилевера исчисляются микрометрами, толщина  $t$  – около десяти нанометров. На вставке показан двойной слой ван-дер-ваальсова антиферромагнетика, в котором спины ионов в соседних слоях компенсируют друг друга (показаны стрелками различных цветов). Красными штриховыми линиями показана элементарная ячейка, расстояние между линиями около 1 нм.

Собственно, и в классическом опыте Эйнштейна-де-Гааза еле уловимый поворот магнита наблюдался лишь при резонансе крутильного маятника, а детектировался с помощью самого чувствительного метода на начало 20 века – весов Кулона (по отклонению светового зайчика от зеркала, прикрепленного на оси вращения маятника).

Авторы статьи [1] предложили воспользоваться аналогом весов Кулона 21 века – оптической системой детектирования колебаний кантилевера в атомном силовом микроскопе, а сам кантилевер сделать из зажатого между графеновыми электродами ван-дер-ваальсова антиферромагнетика – графеноподобного материала, в котором магнитный момент одного слоя компенсируется соседним слоем (рис. 2). Прикладывая переменное электрическое напряжение к графеновым электродам, можно вызывать за счет магнитоэлектрического эффекта периодическое изменение магнитного момента, а вследствие магнитомеханической связи – также и вибрацию кантилевера.

Теоретический анализ резонансных колебаний такой микроэлектромеханической системы показывает, что в “двумерном” антиферромагнетике, состоящем из пары мономолекулярных слоев, даже в условиях среднего вакуума ( $10^{-5}$  атмосфер) тепловые шумы будут подавлять полезный сигнал. Однако с увеличением толщины растет не только масса кантилевера, но и добротность (за счет большей жесткости кантилевера), в результате полезный сигнал при колебаниях кантилевера из десяти двойных слоев превысит на порядок тепловой шум при комнатной температуре.

Учитывая, что само детектирование электроиндуцированного эффекта Эйнштейна де Гааза представляет вызов для экспериментатора, говорить об использовании этого явления в MEMS пока преждевременно, однако если вместо линейного магнитоэлектрического эффекта использовать фазовый переход антиферромагнетик-ферромагнетик (он действительно, имеет место в ван-дер-ваальсовых материалах, например в  $\text{CrI}_3$  [2]), то эффект увеличится тысячекратно. При этом, правда, встает вопрос

будет ли такой фазовый переход происходить при периодическом воздействии на частоте 100 кГц (частота механических колебаний кантилевера) и без эффектов “усталости” – здесь слово за экспериментаторами.

*А. Пятаков*

1. *M.A.Koliushenkov, A.P.Pyatakov, Europhys. Lett. 147, 36002 (2024),*
2. *S.Jiang et al., Nat. Mater. 17, 406 (2018).*

## ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

### *О работе Одиннадцатой Всероссийской конференции “Топливные элементы и энергоустановки на их основе”*

24–27 июня в Институте физике твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук состоялась Одиннадцатая Всероссийская конференция “Топливные элементы и энергоустановки на их основе”. По традиции Конференция была организована при сотрудничестве ИФТТ РАН и МФТИ, в рамках реализации мероприятий программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” по продвижению результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Оргкомитет Конференции возглавили г.н.с. ИФТТ РАН, д.ф.-м.н. С.И. Бредихин и директор Института квантовых технологий МФТИ, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. В.В. Иванов.

В этом году участие в мероприятии приняли более 200 представителей научного сообщества, отраслевых министерств и ведомств, индустрии и государственных корпораций, преподавателей и студентов ведущих профильных вузов в области альтернативной и водородной энергетики. За время работы Конференции было заслушано 25 приглашенных и 58 устных докладов, обсуждалось 21 стендовое сообщение. Выступления участников охватывали вопросы разработки и создания твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и электролизеров, возобновляемых источников энергии и катализаторов, “зеленой” и водородной энергетики, экологии и низкоуглеродной экономики.

Научную программу открыл доклад А.В. Москвина (ООО “Русатом КИП”) о ключевых задачах и направлении развития водородной энергетики России, разработке транспортных средств на водородных двигателях. Е.А. Галицкая (Центр компетенций технологического развития ТЭК Минэнерго РФ) сообщила о федеральном проекте “Чистая энергетика”, предусматривающем создание отечественных техно-

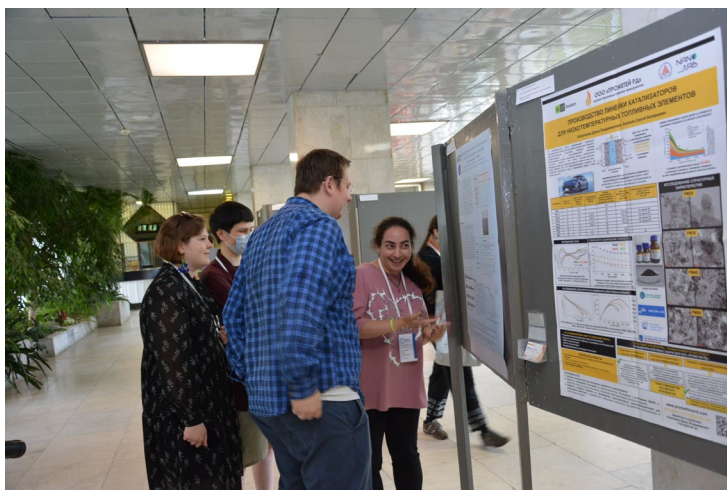
логий изготовления, хранения, транспортировки водорода и опытных образцов сопутствующих водороду изделий, а также расширению международного сотрудничества и подготовке кадров в области водородной энергетики.

Ежегодный формат Конференции определяет структуру выступлений ее участников. Большинство докладчиков делали акцент на результаты, полученные за год, прошедший с предыдущей Конференции. Ю.А. Добровольский (АФК “Система”, ООО “Центр водородных технологий”) представил твердополимерный электролизер, работающий при температурах 150–300°C, водородный БПЛА вертолетного типа и водородный катамаран. В настоящее время все разработки находятся на завершающей стадии испытаний. О технологии полного цикла изготовления микротрубчатых ТОТЭ, созданной сотрудниками ИХТТМ СО РАН совместно с индустриальным партнером ООО “НИЦ “ТОПАЗ” (АО “ГК ИнЭнерджи”) рассказал директор института чл.-корр. РАН А.П. Немудрый. В своем докладе он подчеркнул достоинства микротрубчатых ТОТЭ по сравнению с элементами планарной и трубчатой геометрии: повышенная стойкость к скорости нагрева стека (батареи) и плотность упаковки единичных топливных элементов. Представители АО “АВТОВАЗ” С.Н. Ивлев и К.Ю. Котляров сообщили о создании и перспективах автомобилей на топливных элементах (ТЭ) и автомобиля АНТЭЛ-2, оснащенного водород-воздушным двигателем. Сотрудник НПК ВЭ ФГУП “Крыловский государственный научный центр” С.А. Живулько рассказал о новом проекте серийного строительства водородных прогулочных катеров для озера Байкал, оснащенных энергоустановками на топливных элементах, соответствующих высоким экологическим требованиям данного региона.

Большой интерес вызвали презентации докладчиков, в которых были представлены результаты фундаментальных исследований. Так, для решения проблемы долговременного и безопасного хранения водорода Д.В. Блинов (ОИВТ РАН) предложил перспективную трубчатую схему металлгидридных реакторов на основе металлгидридных патронов. Данная конструкция способна функционировать при давлении 1 МПа и в диапазоне температур 20–80°C. Много работ было посвящено исследованию и разработке биполярных пластин, которые являются ключевыми компонентами бата-

рей ТЭ. Для обеспечения хорошей производительности ТЭ биполярные пластины должны удовлетворять следующим требованиям: высокая электропроводность, коррозионная стойкость, механическая прочность, газонепроницаемость, легкие материалы и низкая стоимость. В докладе Д.К. Гребцова (МФТИ) были представлены результаты изготовления прототипа биполярной пластины со змеевидным рисунком методом лазерной маркировки. Данная методика позволяет быстро перенастроить оборудование для получения биполярной пластины необходимой геометрии. Однако, на сегодняшний день, метод лазерной маркировки не подходит для промышленного производства биполярных пластин, так как время изготовления одной пластины составляет около 10-12 часов. Оригинальную конструкцию биполярной пластины с равномерным диагональным распределением представил И.Н. Бурмистров (ИФТТ РАН). Биполярная пластина с диагональным распределением воздуха позволяет значительно повысить производительность топливного элемента. Данная конструкция биполярной пластины стала результатом совместной работы сотрудников ИФТТ РАН и группы компаний “ЭФКО”.

Особое внимание на Конференции уделялось вопросам импортозамещения. Сотрудники ИФТТ РАН С.Д. Родионова и Д.В. Матвеев представили новую отечественную нержавеющую сталь X24 для изготовления токовых коллекторов батарей ТОТЭ и твердооксидных электролизных элементов (ТОЭЛЭ), а также новый герметик, созданные российскими учеными взамен ранее поставляемой немецкой продукции.



Отмечая высокий научный уровень Конференции, хочется также поблагодарить сотрудников ИФТТ РАН за ее отличную организацию. Благодаря четкой слаженной работе команды Организационного комитета на мероприятии сложилась дружеская творческая атмосфера, которая, в свою очередь, располагала к неформальному обмену мнениями и идеями, расширению кругозора в обсуждаемой области, формированию новых творческих коллективов. В рамках мероприятия можно было обменяться опытом с коллегами, установить новые научные контакты и поучаствовать в интересных обсуждениях новых научных результатов. Прекрасная организация приветственного фуршета в первый день работы Конференции, проведение кофебрейков между работой секций, торжественный банкет, стендовая сессия в формате Beer Party и посещение лабораторий ИФТТ РАН, все это, несомненно, способствовало успешной работе Конференции.

Большой вклад в организацию конференции внес официальный спонсор мероприятия АО “ТВЭЛ” (ГК “Росатом”), также спонсорскую поддержку Конференции оказали Российская научно-производственная компания “SmartStat”, ООО “Сигм плюс инжиниринг” и компания “Флюид-Лайн”.

На закрытии Конференции сопредседатель Организационного и Программного комитетов С.И. Бредихин поблагодарил участников Конференции за интересные доклады и активную дискуссию. Конференция в очередной раз подтвердила актуальность обсуждаемых проблем, перспективность научных исследований и высокий качественный уровень предлагаемых решений, что способствует развитию альтернативной и водородной энергетики в России. Учитывая это, было принято решение провести в 2025 году Двенадцатую Всероссийскую конференцию “Топливные элементы и энергоустановки на их основе”.

*О. Камынина*

## Новое в Магнетизме и Магнитных материалах

С 1 по 6 июля в МИРЭА – Российском технологическом университете, прошла 25-я Международная конференция “Новое в магнетизме и магнитных материалах” (НМММ XXV). Конференция проходит на базе РТУ МИРЭА в третий раз. На конференции работали 12 секций по разным направлениям магнетизма, больше всего докладов было посвящено исследованию процессов синтеза и физических свойств новых магнитных материалов.

Конференция проходила в гибридном формате, выступления участников транслировались в интернете, были как традиционные доклады, так и доклады в режиме онлайн. Это оказалось удобным для иностранных участников, которые по техническим причинам не смогли лично приехать на конференцию, но тем не менее смогли как выступить сами, так и послушать других докладчиков. Официальный язык конференции русский, но по желанию участники могли сделать доклад и на английском языке.



а



б

Рис. 1 а) - Член-корреспондент РАН А.К. Муртазаев выступил на открытии конференции с докладом “Фазовые переходы в неупорядоченных моделях Поттса”, на фото – процесс трансляции доклада. б) - Пленарный доклад профессора И.С. Любутина “Магнетизм и сверхпроводимость железа и гидридов железа при сверхвысоких давлениях” в аудитории РТУ МИРЭА.



а



б

Рис.2. а - Коллаж из некоторых фотографий конференции; б - Облако слов, отображающее географию участников



Программа конференции формировалась из пленарных, приглашенных и устных секционных докладов. В течение недели шла активная работа – четыре заседания секций шли в параллель, каждый день участники делали от 30 до 50 докладов, всего было сделано 247 докладов, из них 19 – в режиме онлайн. НМММ XXV объединила магнитологов от Владивостока до Калининграда и от Сыктывкара до Махачкалы. Иностранные участники представляли Узбекистан и Беларусь, Кубу и Нидерланды.

В рамках конференции были организованы экскурсии в ведущие лаборатории кафедры наноэлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА, обсуждено дальнейшее научное сотрудничество. НМММ XXV продолжила добрые традиции прежних НМММ, начинающихся со Всесоюзной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники” в 70-х годах прошлого века и дающих возможность встречи, тёплого общения и обмена идеями магнитологам России и ближайшего зарубежья.

*А.Н. Юрасов, зам. председателя  
НМММ XXV, З. Пятакова*

*1. Сайт конференции НМММ-XXV  
[https://lomonosov-  
msu.ru/rus/event/8616/](https://lomonosov-msu.ru/rus/event/8616/)*



Рис. 3. Общее фото участников конференции на закрытии.

**Информационный бюллетень ПерсТ  
издается информационной группой ИФТТ РАН**

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto:ichugueva@yandex.ru)

Научные редакторы К. Кугель, Ю. Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О. Алексеева, О. Камынина,  
А. Пятаков, З. Пятакова, А. Юрасов

Выпускающий редактор: И. Фурлетова