

ГРАФЕН

Содержание

1	Термины и определения	2.
2	Рекомендованная литература.	4.
3	Что такое графен? Графен, как революция в создании принципиально новых материалов	5.
4	Способы получения графена	9.
5	Ситуация с графеном в мире.	13.
5.1.	Области использования графена. Реально полученные результаты.	13.
5.2.	Использование графена в энергетике	23
5.3.	Использование графена в электронике	27
5.4.	Ситуация с графеном в России.	28
6	Прогноз развития рынка производства графена, его производных и продукции на их основе, в Российской Федерации на ближайшую перспективу	40
7	Перспективы использования графена	
7.1.	Энергетика	43
7.2.	Перспективные разработки для энергетики будущего.	49
7.3.	Космическая энергетика.	52
7.4.	Водородная энергетика (получение, очистка, хранение водорода)	53
7.5.	Электроника	57
7.6.	Перспективы применения графена и его производных для создания композиционных и строительных материалов	60
7.7.	Нефтегазовая промышленность	66
7.8.	Другие области применения графена	69
7.9.	Графен для специальных приложений	72
8	Прогноз развития рынка производства графена, его производных и продукции на его основе в мире на период до – 2024 г.	75

ГРАФЕН.

Термины и определения

Графен (однослойный графен) – это двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем углерода толщиной в один атом, в которой все атомы имеют sp^2 -гибридизацию и соединены в гексагональную двумерную кристаллическую решетку или индивидуальный слой углерода графитовой структуры.

Графеновые нанопластины – пластины, состоящие из мультиграфена, толщиной от 2 до 5 нм, длиной и шириной от сотен нанометров до десятков микрон. Обычно нанопластины рассматриваются в свободном виде (суспензия или порошок), а не нанесёнными на подложку.

Графитовые наноленты и фольги отличаются от нанопластинок большими длиной и шириной, достигающими сотен микрон.

Графит – аллотропная модификация элемента углерода, состоящая из плоских слоев атомов углерода, каждый атом в которых связан с тремя соседними атомами, при этом слои расположены в трехмерном регулярном порядке.

Двумерные материалы (2D-материалы) - кристаллы, состоящие из одного или нескольких слоёв, в которых межатомные взаимодействия в плоскости слоя гораздо сильнее, чем межплоскостные. Для проявления особых свойств 2D-материалов необходимо, чтобы их толщина была меньше латеральных размеров на 2 или более порядка. Первым 2D-материалом можно считать графен, полученный 2004 г. А. К. Геймом и К. С. Новосёловым.

Наноматериалы — материалы, созданные с использованием **НАНОЧАСТИЦ** и/или посредством **НАНОТЕХНОЛОГИЙ**, обладающие какими-либо уникальными свойствами, обусловленными присутствием этих частиц в материале. К наноматериалам относят объекты, один из характерных размеров которых лежит в интервале от 1 до 100 нм.

Оксид графена – продукт глубокого окисления графита, расщепленный на отдельные слои. Оптический модулятор - устройство, позволяющее изменять амплитуду, фазу, поляризацию или интенсивность оптического сигнала во времени.

Получение графена методом CVD. Метод использует осаждение углерода в виде монослоя графена на медной фольге при нагреве из смеси углеродсодержащего газа, водорода и инертного аргона и может использоваться для промышленного производства графена.

Продукция на основе графена и его производных – материалы и конечные изделия, в которых графен или его производные играют ключевую роль в функционировании (сенсоры, электроника, фотоника и оптоэлектроника, спинтроника, источники и хранилища энергии) или в увеличении функциональных характеристик (бетоны, покрытия, композиты с полимерами, керамикой, металлами или углерод-углеродные композиты).

Производные графена - углеродные материалы, основанные на структуре графена, разделяются на структурные модификации, отличающиеся по свойствам от исходного однослойного графена, и химические производные.

Термоэлектрическое преобразование энергии - прямое преобразование **ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ** в **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО** посредством использования _____ **ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ** (Эффекта Зеебека)

Углеродные наноленты - материалы, состоящие из одного или нескольких слоёв графена, в которых длина существенно больше ширины (последняя обычно не превышает 30 нм).

Углеродные нанотрубки - аллотропная модификация углерода, представляющая собой полую цилиндрическую структуру диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров и длиной от

одного микрометра до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графеновых плоскостей.

Рекомендованная литература

1. Сайт Института графена (<https://ingraph.ru>)
2. А. С. Дмитриев, А. В. Клименко Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика 2020 г. № 2, с.1 - 16
3. А.С. Дмитриев, А.В. Клименко Перспективы использования двумерных наноматериалов в энергетических технологиях (Обзор) - в редакции журнала «Теплоэнергетика». План – сентябрь 2023 .
4. Отчет по теме «Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире» Шифр «Графен-Мониторинг 2019» на 396 стр. Письмо Минпромторга России № 81376\17 от 18.11.19.
5. А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Введение в наноэнергетику. М. Изд-во МЭИ. 2011. 318 с.
6. А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Физико-химия наноструктур. М. Изд. Дом МЭИ. 2013. 238 с.
7. А.С. Дмитриев. Теплофизические проблемы наноэнергетики. ч.1. Теплоэнергетика, т.57, № 12, 2010, с.13-22, ч. 2. Теплоэнергетика, т.58, № 4, 2011, с.29-36.
8. А. С. Дмитриев. Введение в нанотеплофизику. Изд. БИНОМ. 2015. 792 с.
9. А.С. Дмитриев. Энергобудущее. Перспективные технологии. Хрестоматия. М. Изд. МЭИ, 2018, 123 с. Под ред. А.В. Дедова.
10. Экономика и управление в современной электроэнергетике России. Под редакцией Е.В. Аметистова и А.Ю. Шаровой НП «КОНЦ ЕЭС», 2019 г., 725 с.

1. Что такое графен? Графен, как революция в создании принципиально новых материалов

Графен – материал из серии «удивительное – рядом». Он является двумерной модификацией углерода, одного из самых распространенных элементов во Вселенной, а точнее – одной из его углеродных структур. Весь секрет в форме воплощения: графен — это монослой атомов углерода, соединенных в гексагональную двумерную кристаллическую решетку. Толщина слоя такой «пленки» составляет ровно один атом (минимально возможный атомный размер).

Следует отметить, что, кроме графена учеными сегодня создаются и другие принципиально новые двумерные наноматериалы, построенные из других химических элементов и соединений (2D материалы), обладающие набором уникальных свойств, открывающих интересные перспективы для применения этих материалов.

Двумерные, 2D материалы, по своей структуре схожие с графеном. К таким материалам относятся слоистые гексагональные слои нитрида бора, являющиеся электронным аналогом графена, халькогениды металлов и др. Несмотря на структурное сходство данные материалы обладают существенными различиями в зонной структуре, и, как следствие, принципиально иными физико-механическими свойствами.

Впервые раствор оксида графена был получен в XIX веке. В 1962 году ученые наблюдали монослой углерода в просвечивающий электронный микроскоп, в 1970-м синтезировали его на металлах, в 1986-м ввели термин "графен", в 1990-х изучали его транспортные свойства.

Но настоящий фурор произвела работа 2004 года, российских, в прошлом, физиков Андрея Гейма и Константина Новоселова из Манчестерского университета. За работы по исследованию этого материала они получили в 2010 году Нобелевскую премию по физике.

В XX веке ученые издавали одну-другую работу о графене и останавливались. Тогда считалось, что двумерные вещества в принципе не могут существовать. Гейм и Новоселов же выделили их в отдельный класс материалов и открыли миру их удивительные свойства. Тем самым, как бы, задали другим ученым новый фронт работы.

Эти их работы, по существу, и вызвали наблюдаемый сегодня бум в науке; графен сегодня активно исследуют и изучают во всем мире: более 150 тыс. публикаций за последние 20 лет (1 – 6).

За прошедшие два десятилетия у графена открыли множество свойств, нехарактерных для физики твердых тел: в англоязычной литературе его называют «чудесным» материалом (wonder material). Так чем же интересен этот сравнительно новый материал?

Одна из главных привлекательностей графена заключается в том, что его добавление практически в любой материал придает последнему совершенно фантастические свойства, которыми не наградила его Природа, в том числе по прочности, долговечности и устойчивости к внешним воздействиям.

Графен, в качестве упрочняющей добавки всего в единицы процентов, способен радикально изменить ключевые свойства всех известных базовых материалов (металлы, цемент, керамика, полимеры, краски, покрытия, стекло и пр.)

Графен является самым прочным материалом на Земле. В 300 раз прочнее стали. Лист графена площадью в один квадратный метр и толщиной всего лишь в один атом способен удерживать предмет массой 4 килограмма. Графен, как салфетку, можно сгибать, сворачивать, растягивать. Бумажная салфетка рвется в руках. С графеном такого не произойдет.

Благодаря двумерной структуре графен является очень гибким материалом, что позволяет использовать его, например, для плетения нитей и других верёвочных структур. При этом тоненькая графеновая «верёвка» по прочности будет аналогична толстому и тяжёлому стальному канату.

Графен имеет очень высокую удельную поверхность.

Графен обладает высокой электропроводностью. Он практически не имеет сопротивления. Скорость электронов в графене составляет 10 000 км/с, хотя в обычном проводнике скорость электронов порядка 100 м/с. При этом графен почти прозрачен (хотя обычно это свойство исключает хорошую проводимость) и легко растягивается на 20%. При добавлении графена, например, в металлический провод, электрическое сопротивление последнего заметно снижается.

Графен обладает высокой электроемкостью. Удельная энергоёмкость графена приближается к 65 кВт*ч/кг. Данный показатель в 47 раз превышает тот, который имеют столь распространенные ныне литий-ионные аккумуляторы.

Графен обладает высокой теплопроводностью, которая в 10 раз превышает теплопроводность меди, высокой теплоемкостью.

Он превосходит вольфрам по температуре кипения (3700°C).

Для графена характерна практически полная оптическая прозрачность (9). Он поглощает всего 2,3% света. Для сравнения – обычное стекло поглощает около 10% света. По этой причине в нем заинтересованы производители дисплеев и солнечных батарей, которым важно получить проводящий слой максимальной прозрачности.

Графеновая плёнка пропускает молекулы воды и при этом задерживает все остальные, что позволяет использовать ее как фильтр для воды.

Графен – самый легкий материал, приблизительно в 100 раз легче обычной воды. Он инертен к окружающей среде; многослойный графен может впитывать радиоактивные отходы.

Благодаря броуновскому движению (тепловым колебаниям) атомов углерода в листе графена, он способен «производить» электрическую энергию.

Графен является основой для сборки различных не только самостоятельных двумерных материалов, но и многослойных двумерных гетероструктур.

При протекании соленой воды по листу графена, последний способен генерировать электрическую энергию за счет преобразования кинетической энергии движения потока соленой воды в электрическую (т.н. электрокинетический эффект).

Все вышперечисленные свойства графена дали толчок к широким исследованиям возможности его использования в различных областях знаний.

Но главное «чудо» заключается в том, что при абсолютной тонкости он стабилен, атомарные связи не распадаются, как, по идее, должно быть у двумерных материалов. Выяснилось, что атомы удерживаются вместе благодаря особым вибрациям.

Ученые и специалисты, занимающиеся графеном, считают, что появление двумерных материалов и графена, как их первенца, сравнимо с изобретением колеса, бумаги, пластика, или транзистора. И это не преувеличение. Графен действительно масштабнее других передовых технологий нашего времени: искусственного интеллекта, виртуальной реальности. Графен – это материал, на основе которого могут быть разработаны тысячи технологий.

Хотим мы этого, или нет, но графеновая революция, а точнее сказать – эволюция, уже происходит. И, как прогнозирует Андрей Гейм, в конечном итоге, графен появится вокруг нас незаметно: это будет не сенсационный прорыв, а «медленная диффузия» в повседневную реальность. Все больше вокруг нас будут появляться принципиально новые графеносодержащие материалы, а в магазинах – бытовые товары с графеновыми добавками. Иначе говоря, уже сегодня открывается множество вариантов – от улучшения качества товаров, когда на рынке появится целый класс графеносодержащих устройств, до создания принципиально новых технологий. Можно смело утверждать, что графен – наиболее масштабная технология нашего времени. Мало того, уже в ближайшие годы в игру вступят и другие двумерные материалы на основе металлов, полуметаллов, полупроводников, диэлектриков.

В этой связи, следует заметить, что графен, его компоненты и композиты являются базовым шагом к еще более грандиозному направлению – исследованию и использованию в последующие десятилетия других двумерных материалов, некоторые из которых по свойствам близки к графену, а некоторые по ряду параметров его превосходят. Уже сегодня изучения и попытки использования ряда двумерных материалов, в частности в энергетике, показывают существенные преимущества их характеристик в конкретных устройствах и элементах, а развитие технологий за последние 5-7 лет удешевило такие материалы от 3 до 5 раз!

Поскольку, графен, по существу, позволяет получать принципиально новые материалы, то вполне возможно, что *мы стоим на пороге создания новой таблицы Менделеева*. На ее создание, конечно, уйдут годы и десятилетия, но ее появление неизбежно!

Рекомендованная литература

Отчет по теме «Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире» Шифр «Графен-Мониторинг 2019» на 396 стр. Письмо Минпромторга России № 81376\17 от 18.11.19.

А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Введение в наноэнергетику. М. Изд-во МЭИ. 2011. 318 с.

3. А.С. Дмитриев. Введение в нанотеплофизику. Изд. БИНОМ. 2015. 792

4. Сайт Института графена (<https://ingraph.ru>)

5. Е.В. Аметистов. Графен как материал будущего, или революция в создании принципиально новых материалов. Региональная политика и энергосбережение.3\2021, с.68 – 69.

Е.В. Аметистов. Графен меняет всё. Эксперт № 21 (10207), 2021. с. 55 – 57.

2. Способы получения графена

Существует несколько методов получения графена.

Первым известным науке способом производства графена было нанесение на клейкую ленту тончайшего слоя графита с последующим удалением основы. Эта техника получила название «техники скотча». Этот способ гарантирует высшее качество сырья (а значит, наилучшую проводимость), но непригоден для масштабного производства.

Наиболее ранним химическим методом считают получение графена восстановлением оксида графита. Этот эффективный подход к разделению графитовых слоёв основан на использовании химических окислителей, это приводит к окислению внутренних слоёв графита и, как следствие, к

увеличению межслойного расстояния в кристалле и, соответственно, к снижению энергии взаимодействия между слоями. В результате облегчается возможность разделения графитовых слоёв в жидкой фазе, что позволяет синтезировать образцы оксида графена с поперечными размерами порядка нескольких сотен микрометров.

В 2010 году был презентован более эффективный способ получения этого материала: метод химического синтеза графена. При 1000 градусах по Цельсию из сырья с содержанием углерода (обычно из органики - нефти, газа или масла) за счет пиролиза выделяется графен, осаждающийся на медную фольгу (а впоследствии на никель, или кремний), который затем удаляется, например, электрохимическим травлением, а слой графена переносят на нужную подложку. Таким методом на высококачественной подложке из медной фольги удалось вырастить рекордные по размерам пленки графена примерно прямоугольной формы с длиной диагонали несколько десятков см, имеющие высокую электропроводность и оптическую прозрачность. Графен также можно выращивать на других металлах с гексагональной решеткой поверхности, таких как иридий и рутений.

Этим способом можно получать монослои площадью несколько квадратных метров - их качество ниже, но для большинства применений этого достаточно.

В некоторых случаях нужно еще больше графена - например, для добавления его в композитную смесь. Тут действуют метод восстановления графена из раствора оксида графена. Его минусы - совсем уж "низкосортный" графен и токсичное производство.

Химические методы, которые отличаются большим процентом выхода материала, но малыми размерами пленок (порядка 10 – 100 нм).

В последнее время разработан еще один альтернативный способ - дробление графита мощными миксерами до мелких чешуек (механический метод). В настоящий момент он является наиболее распространенным методом для производства относительно больших образцов с размером ~ 10 мкм, пригодных для электрических и оптических измерений. При механическом воздействии на графит можно получить пленки графена относительно большой площади – вплоть до 100 мкм.

Более подробное описание современных методов получения графена можно найти в (2).

Особого внимания заслуживает способ получения графена, предложенный российскими учеными и специалистами ООО «Институт графена» (Москва) (1). Ими создана первая в России опытно-промышленная установка по производству сверхчистого (от 98,8% до 99,4%) графена, в которой используются только графит и вода.

Производительностью установки - порядка 1 кг. графена в сутки, что гарантировано обеспечивает потребность в ближайшие годы в этом уникальном материале, как российских исследователей, так и потребителей, использующих графеновые добавки в своих технологиях. Установка масштабируема, поэтому, в случае необходимости возможно кратное увеличение объемов производства графена. Таким образом, фактически решена проблема импортозамещения.

Основной частью установки и её ноу-хау является реактор, в котором, за счет мощного ультразвука создается суперкавитация пузырьков в воде, которая слой за слоем снимает с графита графеновые чешуйки размером 20 - 200 микрон. «Выход» графена (15 - 20) % от загрузки сырья. Сырье – высококачественный графит с чистотой около 99,8%.

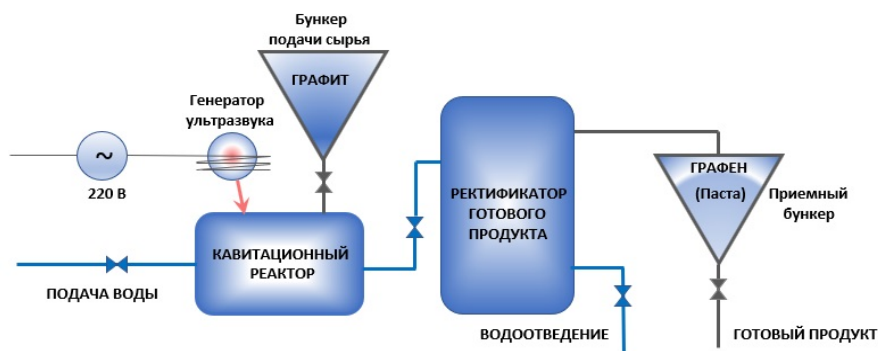
Иными словами, этот метод позволяет осуществлять жидкофазное отшелушивание (Liquid-phase exfoliation, LPE) в чистой дистиллированной воде (комбинированное суперкавитационное и ультразвуковое воздействие на графитовый порошок высокой чистоты).

Количество слоев графена – от 3 до 7, толщина графеновых хлопьев или пластин – от 1,5 до 3,5 нм, латеральный размер (вдоль листов графена) – контролируемо варьированный от 5 до 100 мкм.

Следует отметить, что двумерные материалы не обязательно являются топографически плоскими в действительности и могут иметь изогнутую структуру. Они также могут образовывать

агрегаты и агломераты с различной морфологией. Поскольку структура и состав как графена, его производных, так и двумерных кристаллов, оказывает значительное влияние на свойства, указанные особенности необходимо регламентировать как при синтезе и продаже коммерческих материалов.

Схема и фото установки представлена на рисунке 1.



Рисунк 1 Принципиальная схема установки получения графена

Преимущества способа: высокая производительность, экономическая эффективность, экологичность, высокое качество графена, возможность масштабируемости установки.

Стоимость полученного графена - на (40 –50) % ниже китайского, который сегодня используется российскими специалистами. Следует добавить, что китайцы поставляют в Россию оксидированный графен, ценность свойств **СТЕХИОМЕТРИИ** которого заметна снижена.

Анализ технологий производства графена, его производных и продукции на основе графена достаточно подробно предложен в (2). Большая часть производителей графена представлена малыми предприятиями, учредителями которых, как правило, являются профильные ВУЗы и венчурные стартапы под руководством авторитетных ученых в области графена. В работе (2) также представлен анализ технологий производства и других двумерных кристаллов и продукции на их основе в ведущих мировых научно-исследовательских институтах, организациях и производственных компаниях, в частности по странам: в 3-х десятках наиболее развитых стран.

Рекомендованная литература

1. Сайт Института графена (<https://ingraph.ru>)

2. Отчет по теме «Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире» Шифр «Графен-Мониторинг 2019» на 396 стр. Письмо Минпромторга России № 81376\17 от 18.11.19.

Ситуация с графеном в мире.

Области использования графена. Реально полученные результаты.

Промышленные применения графена зачастую носят опытный или пробный характер. В настоящее время мировой рынок графена и продуктов на его основе, по оценкам разных экспертов, составляет 240 - 350 млн. долларов США (в 2018 г. – 50 млн.), однако, следует заметить, что только инвестиции в разработки, на НИОКР в области графена и других двумерных кристаллов в мире с 2004 г. составили более 2 млрд. долларов США.

Учитывая то, что графен и другие двумерные кристаллы имеют высокий потенциал применения при производстве транзисторов, конденсаторов, датчиков, фотоэлектрических преобразователей, дисплеев, элементов питания, multifunctional конструкционных материалов, и, как

следствие, будет потенциально востребован разными отраслями промышленности. Объем реализации рынка продуктов на основе графена по оценкам экспертов, составит:

к 2025 г. – 60 млрд. долларов,

к 2030 г. будет превышать 100 млрд. долларов,

к 2035 г. – 360 млрд. долларов,

к 2045 г. – до 1 трлн. долларов.

Сегодня в мире, графен и технологии на его основе активно используются в аэрокосмическом секторе, автомобильной промышленности, биомедицине и здравоохранении, электронике, энергетике, экологии и ряде других секторов экономики. Иначе говоря, сегодня уже трудно назвать такую область знаний, куда бы ни проникли, в том или ином виде, технологии с использованием графена.

Ежегодный рост продаж графеновых компонент и продуктов на их основе на сегодня – самый большой из всех типов существующих продуктов и услуг – около 37% в год.

В мире началась гонка за лидерство в производстве графена и материалов с его добавками. Но, к сожалению, Россия в этом процессе не участвует. То ли по непониманию преимуществ этих технологий, то ли по присущему нам сегодня безразличию ко всему происходящему вовне.

Сегодня в подобных исследованиях лидирует Китай, которому принадлежит более половины публикаций и заявок на патенты. В 2013 году в Китае создали Инновационный альянс (министерство) графеновой промышленности. Кроме того, руководство страны сделало индустрию новых материалов на основе графена одним из приоритетов своих 13-й и 14-й пятилеток (2016 - 2025 гг.). Китай производит более 50 % графена, получаемого в мире. Список мировых лидеров по производству графена можно найти в обзоре (3).

Разработки этого «чудо - материала», в отличие от России, пользуются господдержкой во многих развитых странах. В Евросоюзе, например, был запущен проект Graphene Flagship: вложения в 2014–2020 годах оцениваются в 1 млрд. евро. Впервые в истории ЕС целый крупный проект был направлен на то, чтобы внедрить в практику это недавнее научное открытие.

Помимо стран-лидеров, активно работающих с графеновой тематикой, на этот путь встали Австралия, Бразилия, Израиль, Индия, ЮАР, Япония. Но сегодня очевидно, что рынок графена только набирает обороты.

Наблюдается сильная дифференциация финансирования по регионам и отраслям:

Европа – более 1 млрд. долларов *на исследования*;

США и Канада – около 1 млрд. долларов;

Индия и Китай – около 300 млн. долларов;

Россия – менее 1 млн. долларов;

остальной мир – около 50 млн. долларов.

Хотя, поскольку сегодня графеновый рынок только складывается, наметить действительные темпы его роста и даже очертить его границы сложно. Поэтому, справедливости ради, следует заметить, что в различных исследованиях цифры могут заметно различаться.

Приведем примеры нескольких конкретных реальных зарубежных разработок.

Так, учёные Нью-Йоркского университета обнаружили и доказали, что два слоя графена по прочности равны алмазу. В будущем это открытие может дать толчок к созданию бронезилетов нового типа – незаметных тонких и лёгких. Иными словами, из двух атомарных слоев можно создать третий материал, вовсе не существующий в природе.

Одно из важнейших достижений в сфере применения графена в химических источниках тока – разработка команды исследователей из Samsung Advanced Institute of Technology - способ получения трехмерной структуры, на основе графена с оксидом кремния в центре, называемой «графеновым шаром». Покрытие из такого материала позволяет увеличить емкость на 45% и увеличить скорость зарядки в пять раз по сравнению со стандартными литий-ионными аккумуляторами. Этот прорыв

обещает изменить рынок аккумуляторов следующего поколения, особенно в отношении мобильных устройств и электромобилей.

Графеновая пленка оказалась отличным фильтром для воды, поскольку она пропускает молекулы воды и при этом задерживает все остальные. Возможно, это поможет снизить стоимость опреснения морской воды. В Манчестерском университете разработаны масштабируемые сита из оксида графена для фильтрации морской воды.

В Массачусетском технологическом институте разработана технология, позволяющая делать в листах графена отверстия определённого диаметра и получать сверхтонкие фильтры для высокой степени опреснения и очистки воды.

В 2018 году специалисты Объединения научных и прикладных исследований Австралии (CSIRO) предложили дешёвый способ массового и недорогого производства листов графена. По мнению представителей CSIRO, разработанная технология позволит отказаться от дорогостоящих и многоступенчатых методов очистки воды и способна привести к прорыву в решении проблемы нехватки питьевой воды.

В "умных" часах графен используется в качестве прозрачных электродов в сенсорных экранах, заменяя дорогой оксид индия-олова. А в перспективе экраны гаджетов станут гибкими - здесь пригодится способность графена к механическому растяжению. Ещё один класс гаджетов, которые должен породить графен, - сверхчувствительные камеры и датчики. Оптические сенсоры на основе графена в сотни раз расширят диапазон действия, обеспечив видимость при плохой погоде и недостатке освещения, а также смогут "просвечивать" объекты насквозь.

С графеном связывают надежды на применение в микроэлектронике, в создании квантовых компьютеров, некремниевых транзисторов на основе туннельного эффекта между двумя слоями графена.

Использование графеновых добавок позволит заметно снизить вес материалов для аппаратов и устройств различных типов, начиная от авиационных и космических, до автомобилестроения, а, следовательно, и уменьшить расход топлива.

Графен используется также в качестве компонента для буровых растворов и для покрытий трубопроводов. В судостроении его уже применяют для покрытия (покраски) судовых корпусов.

Наиболее разработанным в России направлением применения графена являются биосенсоры и наноконпозиционные материалы. (Подробнее см. в (3).

В медицинских исследованиях.

За последние несколько лет графен и его производные приобрели актуальность в медицине и биомедицине не только в мире, но в России. На сегодняшний день направления использования графена и его производных в этой области можно обобщить следующим образом (см. рис 1):

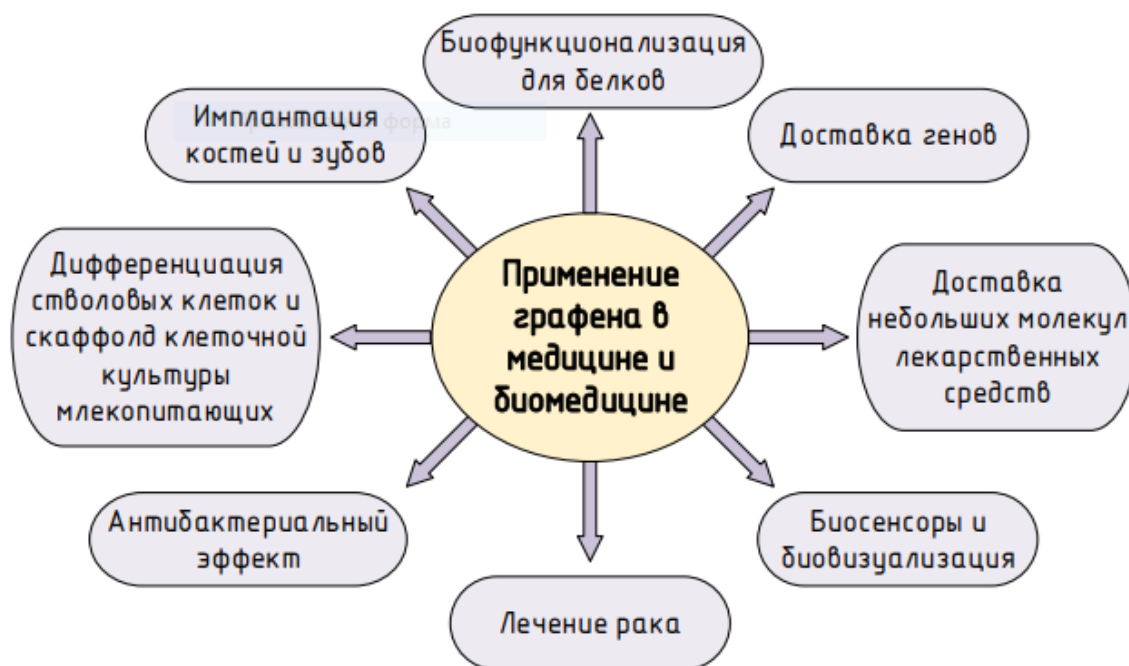


Рис.1. Области применения графена в медицине, биологии и *биомедицине*.

Графен демонстрирует противораковые свойства. В частности, окись графена выборочно поражает стволовые клетки, относящиеся к категории раковых. В журнале *Oncotarget* опубликована статья, в которой показано, что применение графена дало положительный результат в борьбе против шести разных видов рака. Показано, что инфракрасное излучение, которое генерирует графен при нагревании, ускоряет регенерацию клеток организма, нормализует кровообращение и метаболизм.

Главные же графеновые инновации, по мнению ряда исследователей, ожидаются в сфере биотехнологий. Сегодня уже существуют нейроинтерфейсы - например, можно вылечить слепоту, имплантировав в глаз искусственную сетчатку. Но пока это сложные, массивные, не слишком эффективные вещи. Графен позволит их модифицировать: электроды станут точнее, займут меньше места. Сначала будет наполнен рынок нейропротезов, а затем появятся люди-киборги, подключающие мозг к компьютеру и записывающие свои мысли. Когда-то это казалось фантастикой, но с появлением графена технологическая платформа для киберпанк-будущего практически готова.

Исследователи из США проводят опыты по прямому «апгрейду» живых организмов с помощью графена: пауки и шелкопряды, которым этот материал подмешали в корм, стали сильнее и начали плести более прочную нить.

Спектр возможных медицинских приложений соединений и материалов на основе графена и двумерных кристаллов включает:

- доставка молекул лекарственных препаратов и генов,
- создание биосенсоров, - лечение и диагностика раковых заболеваний, - создание имплантов зубов и костей,
- создание препаратов с антибактериальным эффектом,
- создание биосовместимых препаратов для тканевой инженерии.

Активные разработки антибактериальных материалов и препаратов на основе графена ведутся в технологическом Университете Чалмерса (Швеция). Одно из наиболее значимых достижений – разработка покрытия на основе графена, которое обладает антибактериальной активностью и препятствуют распространению инфекций.

Английские ученые преуспели в формировании ультрафиолетового излучения с поверхности графена. Это может пригодиться для производства совершенно новых УФ-ламп на основе графена

без использования токсичной ртути, которую сегодня пока приходится применять в таких лампах, используемых для уничтожения бактерий и вирусов.

Настоящий переворот ожидается в микроэлектронике. Возможности уменьшения кремниевых транзисторов близки к теоретическому пределу. Считается, что именно двумерные материалы позволят добиться следующего скачка вычислительных мощностей, вступив в эру посткремниевой электроники. Правда, именно графен не подойдет - придется дождаться, пока ученые изучат и смогут адаптировать к рынку его двумерных "братьев".

На рынке уже можно встретить hi-end наушники с графеновой мембраной и смартфон в графеновом корпусе, не позволяющем ему перегреваться во время подзарядки. А в перспективе экраны гаджетов станут гибкими - здесь пригодится способность графена к механическому растяжению.

Еще один класс гаджетов, которые должен породить графен, - сверхчувствительные камеры и датчики. Оптические сенсоры на основе графена в сотни раз расширят диапазон действия, обеспечив видимость при плохой погоде и недостатке освещения, а также смогут "просвечивать" объекты насквозь. Это актуально не только для камер слежения в "умном" доме и городе, но и для беспилотных автомобилей: сейчас они теряют управление, если разметку замело снегом или на дорогу спустился туман.

Специалисты Института графена (Москва) обнаружили, что выращиваемые в открытом грунте овощи растут более активно и их урожайность заметно выше обычного, если их поливать водой с ничтожным содержанием графена.

Американские исследования в ряде графеновых направлениях с 2020 года были засекречены, однако, по некоторой информации, уже в 2021 г. они рассчитывали создать электродвигатель, использующим термоэлектрический эффект, мощностью 5 (пять!) киловатт. А это уже, по существу, – большая энергетика!

Отметим, что в плане коммерциализации продукции на основе графена, 2015 год стал знаковым – китайские производители смартфонов реализовали первую партию (2000 шт.) смартфонов с сенсорной панелью на основе графена; в этом же году графен был использован в качестве присадки в моторном масле, что увеличило срок службы масла от 1000 миль до 5000 миль применительно морским судам. Также графен был использован для производства конденсаторов, которые в настоящее время используются для автобусов.

Graphene Flagship – крупнейшая европейская программа по совместному сотрудничеству производителей и исследователей в области графена, направленная на коммерциализацию данного материала, которая включает 142 организации в 23 странах. Среди них Netzsch (Германия), NetComposites (Великобритания), ABB and Imerys (Швейцария). Была создана в 2013 году с бюджетом 1 млрд. евро с распределением финансов на 10 лет.

Международный европейский Консорциум по проекту «Графен» объединяет более 150 научно-исследовательских коллективов и промышленных партнёров из 23 стран и 11 ассоциированных членов; в их числе Армения, Беларусь, Турция и Украина. Исследования координируются Техническим университетом Чалмерса в Гётеборге.

Как отметил Константин Новоселов, который в рамках проекта «Графен» является председателем стратегического консультативного совета, особенностью данного проекта является синергетическое развитие фундаментальных и прикладных исследований. Новые научные разработки находят быстрое применение в приложениях, как это сейчас происходит с 2D графеновыми мембранами. Также разрабатывается обширный портфель двумерных (2D) материалов и их гетероструктур. Ключом к успеху является постоянный диалог между фундаментальными и прикладными исследованиями, происходящий в рамках флагмана «Графен». При организации проекта «Графен» было создано шесть подразделений, четыре из которых связано с научной деятельностью и два с организационной: • Наука и материалы, • Здоровье, медицина и

сенсоры, • Интеграция электроники и фотоники, • Энергия, композиционные материалы и производство, • Партнерский отдел, • Администрирование и услуги.

В городе Манчестер в 2015 году открылся Национальный графеновый институт, строительство которого профинансировали Европейский фонд регионального развития и правительство Великобритании. Объем финансирования составил 50 млн. фунтов стерлингов. Стоимость оборудования составляет 11 млн. фунтов стерлингов, что позволяет ученым и отраслевым партнерам проводить новаторские исследования. Основной целью создания Национального графенового института является коммерциализация приложений графена и двумерных материалов для уменьшения отставания Великобритании и стран ЕС от Китая, Южной Кореи и США в направлении разработки и патентовании графеновых материалов и технологий.

Приведем несколько примеров национальных проектов по исследованию графена.

Graphene Stakeholders Association (GSA) (Малайзия) – некоммерческая организация, объединяющая более 40 членов. Была создана для содействия коммерциализации графена и продуктов путем поддержки деятельности со стороны государства, а также для стандартизации продуктов, выводимых на рынок.

National Graphene Association (NGA) - основная организация в США, занимающаяся вопросами коммерциализации графена. NGA фокусируется на решении таких важных вопросов, как разработка политики, направленной на эффективную интеграцию графена и материалов на его графена во всем мире. NGA объединяет предпринимателей, компании, исследователей, разработчиков и поставщиков, инвесторов и правительственные учреждения.

NGA в настоящее время имеет 20 корпоративных партнеров и более 2000 международных членов. В Graphene Research Center (GRC) Сингапура ведутся активные исследования в области графена, его производных и двумерных материалов. Исследовательский центр графена был открыт в 2010 году в Национальном университете Сингапура (NUS). В 2014 году Национальный исследовательский фонд Сингапура выделил NUS грант в размере 50 млн. долл. США сроком на 10 лет для того, чтобы поддержать деятельность лабораторий GRC, микро- и нанопроизводства, а также исследования, синтез, и разработку новых устройств на основе двумерных (2D) материалов. Итогом стало создание нового центра перспективных 2D материалов.

Перечень подобных Объединений и Центров, включая международные, занимающихся графеном может быть продолжен (см., например, (3)), но следует ли это делать? Суть в том, что ничего подобного нет в России и она не участвует ни в одном из существующих международных консорциумов, занимающихся графеновой тематикой.

Приведенные примеры дают лишь приблизительное представление о разнообразии графеновых технологий и степени интереса к ним в мире.

Использование графена в энергетике

Уже сегодня графен все активнее используется в энергетике. Он улучшает свойства литий-ионных аккумуляторов: батарея становится более емкой, а время зарядки сокращается. Графеновые электроды (высокая коррозионная стойкость, большая площадь поверхности и высокая проводимость), благодаря высокой плотности энергии и быстрому заряду, широко используются в таких накопителях энергии, как электромагнитные суперконденсаторы и аккумуляторы (Li-ion, Li-air, свинцово-кислотные и топливные элементы).

Приведем несколько примеров разрабатываемой графеновой продукции.

В настоящее время работа над графен-полимерным аккумулятором ведется исследователями многих стран. Значительных успехов достигли в этом вопросе испанские ученые. Аккумулятор, созданный фирмой "Union Fenosa" имеет энергоемкость, в сотни раз превышающую подобный показатель у уже существующих батарей. Используют его для оснащения электромобилей. Машина, в которой установлен графеновый аккумулятор, может проехать без остановки тысячи километров. На подзарядку электромобиля при полной разрядке аккумулятора понадобится не более 8 минут.

Немецкие инженеры Технологического Института Карлсруэ и эстонская компания Sketenton Tech создали батареи-аккумуляторы на основе графена, которые могут заряжаться за 15 секунд. Эти исследования подтверждают пилотные продукты фирмы Eлесjet (внешний аккумулятор емкостью 6000 мА/ч, заряжающий iPhone за 10 минут, в планах - создание электровелосипеда с запасом хода до 100 км) и Graphenano (аккумулятор для электрокара с удельной емкостью 1000 Вт/ч/кг).

Ожидается, что сегмент применения графена в накопителях энергии будет самым быстрорастущим: прогноз среднегодового роста – 90%. Графеновые электроды широко используются в таких накопителях энергии, как электромагнитные суперконденсаторы и аккумуляторы (Li-ion, Li-air, свинцово-кислотные и топливные элементы), благодаря высокой плотности энергии и быстрому заряду.

Параметры энергетического оборудования некоторых западных фирм, использующих графен можно найти на их сайтах:

1. Yadea Group. <https://www.yadea.com/> - крупнейший разработчик и производитель электрического транспорта на основе графеновых батарей.

2. Nanotech Energy. <https://nanotechenergy.com/> - крупнейший разработчик и производитель графеновых батарей нового поколения.

3. Talga Resources Ltd. <https://www.talgagroup.com/> - крупнейший производитель графеновых анодов для батарей и добавок в различные материалы.

Графеновые материалы обладают такими преимуществами, как высокая электрокаталитическая активность, высокая проводимость, отличные механические свойства - прочность, высокая гибкость, большая удельная поверхность и малый вес, что дает возможность хранить электрический заряд, ионы или водород.

Графен даст новый толчок развития альтернативной энергетике. Солнечные батареи с графеном производят энергию при минимальном освещении, даже в пасмурную погоду и во время дождя.

Известный термоэлектрический эффект уже сейчас может позволить совершить прорыв в использовании самой перспективной и потенциально неисчерпаемой отрасли энергетике — солнечной. Сейчас солнечные батареи создаются на основе полупроводникового кремния, и у них есть принципиальные ограничения по КПД, они могут «уловить» только чуть больше половины (58%) солнечного спектра, а большая часть солнечной энергии уходит в тепло. Использование графеновой пленки позволит «поймать» не только большую часть солнечных фотонов, но и использовать, наряду с полупроводниковым, термоэлектрический эффект для преобразования солнечной энергии. Сейчас фотовольтаика (фотоэнергетика на основе полупроводников) достигла 22% КПД (еще недавно было 4%), но это практически предел, пленки на основе органических полупроводников могут прибавить 1–2%, а вот использование графена будет означать существенный рост КПД. По оценкам ученых Института графена (Москва) рост КПД в солнечных преобразователях на основе новых графеновых технологий, может достигать 35 и более процентов.

Кстати, сейчас термоэлектрический эффект в наноматериалах уже применяется в дорогих марках машин: энергия тепла на выхлопной трубе и на других поверхностях, преобразованная с помощью специального покрытия в электрическую энергию, используется для питания аккумулятора и кондиционера. Но это, конечно, только начало массового применения.

Сегодня энергетика всех стран активно обсуждают перспективы водородной энергетике, как одной из наиболее эффективных способов замены углеводородной энергетике.

Как известно, в настоящее время самым эффективным способом получения водорода, как топлива, считается фотосинтез за счет солнечного излучения с применением катализаторов. Графеновые материалы могут заменить дорогостоящие платиновые катализаторы для подобных систем получения водорода. И позволяет надеяться на получение достаточно дешевого, приемлемого для экономики водорода, что, несомненно, откроет путь к дальнейшему и масштабному развитию водородной энергетике.

Назовем еще некоторые из возможных направлений применения графена в работах по водородной энергетике.

Накопление и хранение водорода в графеновых материалах (возможность создания на их основе систем обратимого хранения водорода, сочетающих высокую емкость, стабильность и возможность быстрого выделения водорода в условиях, приемлемых для практического использования).

Химические и термостойкие мембранные материалы на основе графена (позволяют создавать новые газоразделительные мембраны, обеспечивающие высокую проницаемость и селективность и перспективные для очистки водорода в процессах его получения из природного газа).

Значительное, с помощью небольших добавок графеновых материалов, улучшение характеристик полимерных мембран, которые в настоящее время по большей части используются в промышленности.

Использование графеноподобных материалов в качестве носителя наночастиц или в качестве функциональных добавок в составе электрокаталитического слоя топливных элементов с полимерно-электролитной мембраной, что позволяет улучшить их характеристики, а также повысить активность и стабильность электрокатализатора в реакции выделения кислорода.

Графен с покрытием из оксида металла является эффективным катализатором для водородных топливных элементов следующего поколения.

Графеновые нанокомпозиты могут обеспечить эффективную термостабилизацию и отвод тепла от водородных топливных ячеек.

Использование графена в электронике

Мировая тенденция.

Быстрое развитие электроники и оптоэлектроники, постоянная миниатюризация и увеличение плотности транзисторов и других элементов (память, конденсаторы, переключатели и т. д.) на одном чипе, радикальное увеличение плотности тепловыделения на чипах и появление активных «горячих» точек требуют новых функциональных материалов и процессов термостабилизации и управления потоками тепла (термоменеджмент). За два последних десятилетия характерные размеры элементной базы ушли с микроуровня на наноуровень. Кроме того, архитектура и топология электронных устройств перешла от планарных технологий на 3D-технологии чипирования и многоядерность. Наконец, рост числа мобильных устройств с сенсорным гибким экраном привел к новым исследованиям и разработкам в области устройств и материалов нового поколения. Вместе с тем, эти технологические достижения и появляющиеся приложения создают тепловые проблемы, которые могут, в итоге, ограничить их эффективность, деградацию, объем реализации или общую выполнимость задаваемых им функций.

Помимо указанных направлений электроники в новых системах и материалах для термостабилизации нуждаются энергетические устройства, такие как фотоэлектрические панели, накопители электрической энергии (суперконденсаторы и аккумуляторные батареи, термоэлектрические преобразователи, накопители тепловой энергии на основе материалов с фазовыми переходами и т. д.).

Мировой рынок указанных систем и материалов растет быстрыми темпами и к 2025 году составит около 22-23 млрд. долларов в год. Россия занимает на это рынке только 0,03%. Технологии термостабилизации электронных и энергетических систем являются критическими и стратегическими, что вводит их в ранг санкционных. Таким образом, без разработки собственных технологий и создания технологического производства невозможно продвигать перспективные технологии будущего.

В (3) представлен перечень Компаний и центров НИОКР, ведущих перспективные разработки в области производства графена, его производных и двумерных кристаллов.

Ситуация с графеном в России

К сожалению, как это уже не раз случалось в истории развития перспективных направлений науки и техники, открытия, сделанные российскими учеными, были активно подхвачены зарубежными специалистами, и нашей стране приходилось выступать в роле догоняющих.

Российские публикации по графеновой тематике составляют менее 1% от мировых и этот показатель характеризует состояние отрасли. В настоящее время госполитика России в отношении перспективных исследований практически не сформирована.

Приходится констатировать, что сегодня на долю России приходится, только 0,003% продаж графеновых компонент и продуктов (на 2 порядка ниже, чем в Индии и Израиле). Хотя, по некоторым оптимистичным прогнозам экспертов, потребность в графеновых компонентах на российском рынке оценивается примерно в 165 млн. долларов (к 2025 г.) и 1,5 - 2 млрд. долларов к 2030 г. Хотя следует признать, что сегодня, когда графеновый рынок только складывается, наметить темпы его роста и даже очертить его границы весьма сложно.

В России сегодня графеновой тематикой занимаются от силы несколько десятков научных лабораторий. Еще меньшее число научных центров производят собственный графен, причем в очень ограниченных количествах (граммы, десятки граммов) и далеко не всегда достаточно высокого качества. В подавляющем большинстве отечественных научных разработок используется довольно низкосортный, однако, достаточно дешевый графен из Китая.

Это объясняется, с одной стороны, малой информированностью наших специалистов о преимуществах графеновых технологий, с другой, дороговизной научных исследований, требующих наличия сложного и, в основном, импортного оборудования.

Темой графена российские ученые, судя по первым журнальным публикациям, начали заниматься где-то в 2008 - 2009 годах и в западных журналах появились отдельные статьи российских авторов, посвященные исследованию и получению графена. Однако, начиная с 2010 года, и в отечественной научно-исследовательской и патентной литературе появляется большое количество публикаций россиян по графеновой тематике, что говорит о значительно возросшем интересе к этой области. Уже к началу 2018 года количество отечественных публикаций превысило две тысячи. Небольшое отставание по времени исследования графена от зарубежных исследователей привело к тому, что широкое применение в России нашли далеко не все методы синтеза этого материала.

Отличительной особенностью российских научных исследований является то, что они, в основном, посвящены изучению свойств графена и, заметно реже, разработке технологий на его основе.

Тем не менее, эти разрозненные полученные российскими учеными научные результаты, выполненные организациями - энтузиастами, получившим финансирование от РФФИ, РНФ, реже - частных инвестиций, позволяют практически ежегодно проводить российские и даже международные конференции по графеновой тематике. Некоторые из этих конференций были поддержаны тем же РФФИ. Но, как правило, это работы проводятся в рамках одного из направлений организаций и лишь в течение времени действия полученного гранта. Исключение составляет, пожалуй, лишь Институт графена (Москва), существующий пока лишь за счет средств частного инвестора и занимающийся не только получением графена, но и НИОКР в области создания технологий на его основе.

Большой бизнес пока интереса к графену не проявляет. Но, нельзя забывать, что для НИР с графеном, нужно иметь серьезное, дорогостоящее и, как правило, импортное оборудование.

К организациям, занимающимся графеном, можно отнести:

В 2011 - 2013 Университет ИТМО получил финансирование на проведение работ «Гибридные материалы на основе наноструктурированного углерода: синтез, характеристика и новые приложения».

НИТУ "МИСиС", МИСиС в 2011-2015 гг. получил финансирование на исследование неорганических нанотрубок и графенов.

Работы лаборатории физикохимии наноматериалов ИНХ СО РАН в направлении синтеза, химической модификации графеновых материалов и исследования их свойств.

В ФИЦ ХФ РАН в 2018-2019 гг. была выполнена работа «Физико-химические основы формирования композитов детонационный алмаз - графен для накопления энергии в двойном электрическом слое».

В ФГБОУ ВО «ТГТУ», ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов в 2016 – 2020 г. выполнены договоры по тематике, связанной с получением и применением графенсодержащих материалов.

Для реализации федеральной целевой программы «Развитие nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008-2011 годы» в Северо-Восточном федеральном университете г. Якутск была создана лаборатория «графеновые нанотехнологии» Одним из основных направлений деятельности лаборатории является разработка и создание различных сенсоров на основе графена и его производных, тестовой памяти, тест системы для диагностики наследственных заболеваний, проведение фундаментальных научных исследований электрофизических, структурных, оптических характеристик полученных материалов.

Стоит также отметить работу, выполненную ИТ СО РАН в 2017 – 2020 гг. «Разработка и создание нового класса функциональных тонкопленочных материалов с изменяющимся светопоглощением и электропроводностью на основе графена».

В 2014-2015 гг. в ИХТТМ СО РАН был выполнен проект «Разработка методов изготовления электродов для суперконденсаторов с использованием углеродных материалов на основе графена». Организациями ФГБОУ ВО «РГРТУ» и РГРТУ в 2014 – 2016 была проведена работа «Холодные взрыв эмиссионные катоды на основе многослойных графеновых структур и графено-подобных нанометровых пленок».

В 2011-2013 гг. в НИЯУ МИФИ проведена работа «Моделирование и разработка методов характеристики параметров высокочастотных полевых транзисторов на основе графена для использования их в высокопроизводительных телекоммуникационных системах».

В ФИЦ ХФ РАН в 2016 – 2019 гг. была выполнена работа «Высоконаполненные полимерные композиты с регулируемой 3D архитектурой на основе 2D наноразмерных углеродных частиц и других наноразмерных материалов для электрохимических накопителей энергии».

В 2014 - 2016 гг. в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» была проведена работа «Разработка технологии получения беспористых нанокompозитных керамических материалов с повышенными эксплуатационными свойствами, модифицированных углеродными нановолокнами и графеном».

В ГУАП в 2016 – 2018 гг. была проведена работа «Разработка технологии очистки нефтесодержащих вод фильтрами до 100 кубометров в час на основе графенового сорбента»

ФГБОУ ВО «ТГТУ» в 2017 – 2020 проводилась работа «Разработка нового поколения многоцелевых пластичных смазок для использования в условиях Арктики и Крайнего Севера с применением противоизносных присадок на основе графена».

За прошедшие годы в ИНХ СО РАН выполнено более 30 хоздоговоров с МО СССР и МО РФ по перспективам использования интеркалированных соединений графита и малослойного графена для создания новых образцов военной техники.

Сферой деятельности компании ООО «ГРАФЕНОКС» - малое инновационное предприятия с участием ИПХФ РАН, основанное в 2017 году. является разработка, производство и реализация графеновых материалов различного вида на основе оксида графена.

Среди коллективов, наиболее активно занимающихся этой тематикой, следует назвать ОАО НИИ графит (Москва), ООО Актив-нано (Санки Петербург), ВНИИАЛМАЗ (Москва), НПО УНИХИМТЭК (Подольск), Тамбовский государственный технический университет.

В ООО «Нанотехцентр» университета был разработан способ получения графеновых нано-пластин. На сегодняшний день эта компания поставляет на рынок пасты на основе графеновых нано-пластин в воде и масле.

На основе полученного продукта компания ООО «Нанотехцентр» совместно с сотрудниками ОАО ВСКБ «Рикон» (Воронеж) разработала суперконденсаторы с графеновыми электродами. Они имеют следующие энергетические характеристики: удельная энергия 25 Вт·ч·кг⁻¹, удельная мощность 30 кВт/кг⁻¹, удельная емкость 5-50 Ф г⁻¹, выходное напряжение 2,7 В, количество циклов заряд/разряд – не менее 10000, интервал рабочих температур -40 – +80 °С.

АО «ЗАВКОМ» (г. Тамбов) выпускает различные пасты в воде или органических растворителях с массовым содержанием нано-графита 6-10%.

ОАО «НИИ графит» занимается производством продукции из графита, графитированных волокон и углерод-углеродных композиционных материалов.

Коммерческий продукт компании ООО «АкКо Лаб» - оксид графена и восстановленный оксид графена: как порошки, так и суспензии в воде и органических растворителях, а также порошки и суспензии графитовых нанопластинок толщиной менее 50 нм.

Наиболее крупным производителем мультиграфеновых материалов в России является НПО «УНИХИМТЕК» основанное профессорами Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. В настоящее время НПО производят уплотнительные материалы, экраны от электромагнитного излучения, резистивные элементы в гибких электрических нагревателях, газодиффузионные слои и материалы биполярных пластин в водородно-воздушных топливных элементах, электроконтактные материалы, защитные покрытия и краски. Большую долю из материалов, получаемых из подобных мультиграфеновых материалов, составляют теплораспределяющие и теплоизоляционные материалы для высокотемпературных печей, которые снижают конвективную составляющую теплопередачи и тепловое излучение. Кроме того, в настоящее время компания УНИХИМТЕК выпускает широкий ассортимент материалов, основу которых составляют либо соединения внедрения, либо мультиграфеновые материалы, в том числе: огнезащитные материалы Огракс, уплотнительную продукцию Графлекс.

ООО «ГрафенОкс» (г.Черноголовка) специализируется на производстве порошков оксида графена и восстановленного оксида графена (суспензии, пасты, порошки, таблетки), а также материалов на их основе, включая мембраны из оксида графена, аэрогели из оксида графена и восстановленного оксида графена, а также графеновые чернила, графеновые мембраны. Кроме того, компания производит и графеновые нанопластины, получаемые расщеплением терморасширенного графита. Институт углехимии и химического материаловедения (г. Кемерово) занимается получением графена из окисленного графита. Основное направление научных исследований - глубокая переработка угля, углехимия, химия углеродных материалов, композитов и наноструктур.

В 2016 году сотрудники Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск) совместно с НГУ, НГТУ и СВФУ имени М.К. Амосова использовали метод электрохимического расслоения графита для получения графеновой суспензии для 2D-печати. В результате использования окисленного графена, полученного методом электрохимического расслоения, в сочетании с фторографеном повышается термостойкость и изоляционные свойства таких систем. Данный метод позволил создать мемристоры из серебряных чернил и фторированного графена на принтере конкретной марки.

Для создания чернил для 2D-печати и суперконденсаторов используется метод электрохимического расщепления и ультразвукового расслоения графита. Такая работа проводится сотрудниками Института проблем химической физики РАН (г.Черноголовка).

ООО «Конгран» (г. Москва) – стартап, располагающийся в Сколково, целью которого является производство суперконденсаторов на основе графена.

В Якутске, в лаборатории «Графеновые технологии» Северо-Восточного федерального университет им. М.К. Амосова изучаются тонкопленочные структуры и нанокompозиты на основе графена. Учеными университета разработан ряд продуктов на основе графена, в частности, сенсоры влажности на основе графеновой пленки, а также на основе оксида графена. Лаборатория оснащена

современным оборудованием, которое позволяет синтезировать графен, измерять его параметры и создавать электронные приборы на основе графена.

Оптические свойства графеновых пленок исследуются в Государственном университете аэрокосмического приборостроения нашей северной столицы. Там же, в Институте аналитического приборостроения РАН изучают прозрачность графеновых пленок.

Использование графена в качестве катализаторов в различных приложениях исследуется в Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

Интересны исследования, проводимые в научных лабораториях «Института графена» в Москве. Это работы по использованию высокопрочного с графеновыми добавками бетона, упроченного графеном асфальта, эффективному опреснению морской воды с помощью графеновых пленок за счет солнечного излучения. Ученые этого Института разработали электропроводящие краски и клеи с графеновым наполнителем, позволяющие создавать высокоэффективные энергосберегающие нагревательные настенные панели, «теплые полы», а также дающие возможность значительно интенсифицировать теплоотвод в различных электронных устройствах.

ООО «Русграфен» (г. Москва) производит графеновые пленки толщиной от 2-х до 10 слоёв графена на различных подложках (никелевой, медной, кремниевой, кварцевой) с максимальным размером до 80 см². Кроме того, компания проектирует и производит оборудование для синтеза графена методом химического газофазного осаждения.

ООО «МИП «Графен» (Якутск) разрабатывается технологии создания графеновых пленок, выращенных методом химического газофазного осаждения на медной пластине, перенесенных на гибкую подложку для создания прозрачных проводящих электродов и сенсорных экранов смартфонов. НПК «Современные Технологии Синтеза» поставляет полный спектр углеродных материалов, от нанотрубок и фуллерена до графена в различной форме.

Предлагается как графен, полученный методом ХОГФ, в виде плёнки на медной или кремниевой подложке, порошки и дисперсии оксида графена и восстановленного оксида графена. Ряд научно-исследовательских групп занимается получением графена методом CVD с целью создания оборудования и новых разработок.

Сотрудники Лаборатории углеродных материалов МГУ имени М.В. Ломоносова разработали несколько подходов в получении графена, в том числе с реализацией в:

- 1) установке по осаждению плазмохимическим методом, при этом осаждение производится на плоские проводящие подложки, на которых формируются тонкие углеродные пленки различной структуры и
- 2) установке по осаждению методом «горячей нити» (Seki Technotron, HF CVD), которая позволяет получать различные углеродные пленки не только на плоских подложках, но и на сложных 3D объектах.

Сотрудники ИОНХ имени Н.С. Курнакова работают в нескольких направлениях получения графена, в том числе по методу CVD и пиролизическому методу получения графена. Один из патентов включает метод производства графенового электропровода, состоящего из волокна (синтетических химических волокон, термостойких полиароматических волокон, натуральных и минеральных волокон), на которое «наносится» графеновый слой. Данный способ позволяет создавать легкие безметаллические проводники с высокой электропроводностью и минимальными электрическими потерями.

При участии ученых Лаборатории оптоэлектроники двумерных материалов МФТИ создан резонансный плазмонный детектор ТГц излучения на основе двухслойного графена.

Сотрудники МИЭТ и Физического института имени П.Н. Лебедева на базе выращенного графена создали сенсор, способный экспрессно определять содержание охратоксина А, опасного для здоровья человека вещества, выделяемого некоторыми плесневыми грибами, живущими на продуктах питания.

В Институте неорганической химии СО РАН проводятся исследования, направленные на получение новых материалов на основе графена, включая тонкие проводящие прозрачные пленки, прочную и гибкую «графеновую бумагу», композиты с высокой прочностью, катализаторы.

Институт фундаментального образования Уральского федерального университета (г. Екатеринбург) проводит исследования в области металлокерамических систем Al-Al₂O₃-графен. Одновременное введение оксида алюминия и графена в алюминиевую матрицу позволяет получать гибридные металлические композиционные материалы, обладающие уникальным сочетанием свойств: теплопроводностью выше алюминиевой, в 2 раза улучшенными твердостью и прочностью, а также увеличенным в 3 раза относительным удлинением при растяжении и повышением коррозионной стойкости в 2,5-4 раза по сравнению с исходным алюминием. Впервые в мире был синтезирован гибридный композиционный материал Al-Al₂O₃-графен, который обладает уникальным сочетанием ряда характеристик что позволяет рекомендовать его как перспективный материал для широкого круга электротехнических применений, в частности, ультратонких проводов, а также конструкционного материала для авиакосмической и судостроительной промышленности. Данное направление также представлено модификацией металлов графеном: свинцово-графеновые и свинцово-графитовые металлические композиты, которые применяются в качестве положительных токоъемников для свинцово-кислотных аккумуляторов в растворе серной кислоты.

Сотрудники Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, используя электрохимический метод получения графена, разрабатывают графен-металлические композиты.

В Институте неорганической химии имени А.В. Николаева СО РАН (Новосибирск) разработаны методики перевода графена в устойчивые дисперсии в жидких средах. Практическая значимость исследований состоит в целенаправленном получении новых материалов на основе графена, включая тонкие проводящие прозрачные пленки, прочную и гибкую "графеновую бумагу", композиты с высокой прочностью, катализаторы.

Нетрудно видеть, что география научных лабораторий, занимающихся графеновыми технологиями в России, пока невелика: с графеном работают от силы два – три десятка лабораторий. К сожалению, следует констатировать, что, несмотря на все возрастающий интерес во всем мире к графеновой тематике, в России никакого внимания к этой проблематике, ни со стороны РАН, ни со стороны каких-либо государственных структур так и не возникло. И опять мы будем выступать, как это чаще всего бывало, в роли догоняющих.

Хотим мы этого, или нет, но графеновая революция, а точнее сказать – эволюция, уже происходит. Все больше вокруг нас будут появляться принципиально новые графеносодержащие материалы, а в магазинах – бытовые товары с графеновыми добавками. Иначе говоря, уже сегодня открывается множество вариантов – от улучшения качества товаров, когда на рынке появится целый класс графеносодержащих устройств, до создания принципиально новых технологий. Можно смело утверждать, что графен – наиболее масштабная технология нашего времени. Мало того, уже в ближайшие годы в игру вступят и другие двумерные материалы на основе металлов, полуметаллов, полупроводников, диэлектриков.

В этой связи следует заметить, что графен, его компоненты и композиты являются базовым шагом к еще более грандиозному направлению – исследованию и использованию в последующие десятилетия других двумерных материалов, некоторые из которых по свойствам близки к графену, а некоторые по ряду параметров его превосходят. Уже сегодня изучения и попытки использования ряда двумерных материалов, в частности в энергетике, показывают существенные преимущества их характеристик в конкретных устройствах и элементах, а развитие технологий за последние 5-7 лет удешевило такие материалы от 3 до 5 раз! Откуда, естественно, следует, что задержка в исследованиях и разработках по графену и его компонентам приведет, понятно, к заметному отставанию и по изучению и применению других двумерных материалов.

Одной из составляющих возможного успеха российских разработок в области графена является наличие собственного российского графена высокого качества. Как уже упоминалось, в Институте

графена (Москва) создана установка по получению высококачественного графена, производительность которой позволяет обеспечить этим уникальным материалом всех сегодняшних российских заказчиков. В случае необходимости установка может быть масштабирована.

Следует заметить, что ряд разработок на основе графена уже близок к массовому внедрению в экономику. Россия отстает, но еще может попасть в число лидеров одной из самых перспективных технологий нашего времени.

Прогноз развития рынка производства графена, его производных и продукции на их основе, в Российской Федерации на ближайшую перспективу.

Графеновая индустрия РФ пока следует общемировым тенденциям, но значительно отстаёт от лидеров в Китае, США, Ю. Корею и Евросоюзе. По оценкам аналитических компаний, оценивающих перспективы производства графена и графеновых материалов, это отставание будет только возрастать, если не принять экстраординарные меры по финансированию этого направления.

По числу высокоцитируемых статей вся Россия уступает Центру двумерных материалов Сингапура, ситуация с патентами тоже запущена.

Большинство компаний производителей не готовы делиться информацией по объему и номенклатуре готовой к реализации продукции. Ниже будут приведены сведения из открытых источников, либо данные, предоставленные компаниями.

Компанией ООО «Русграфен» в 2018 году было изготовлено более 1000 см² графена на различных подложках. В 2019 – не менее 2000 см², в 2025 планируется изготовить 300 000 см² пленки общей стоимостью 48 млн. рублей и не менее 80% на экспорт. Также планируется запуск других двумерных материалов, таких как сульфид молибдена, сульфид вольфрама, гексагональный нитрид бора.

Объем продукции, выпущенной в 2018 году, и планируемой к выпуску в период с 2019 по 2025 гг. проектом graphox.ru представлен в таблице 1.

Продукция	2018 г, кг	2019 г, кг	2020 г, кг	2025 г, кг
Оксид графена (водная дисперсия)	0,3	0,5	10	1000

Оксид графена (аэрогель)	0,1	0,5	10	1000
Графен (восстановленный оксид графена, аэрогель)	0,05	0,1	2	500
Карбонилированный графен (аэрогель)	0,05	0,15	1	100
Карбоксилированный графен (аэрогель)	0,05	0,25	1	100
Аминированный графен (аэрогель)	0,05	0,2	1	100

Таблица 1.

Использование графена в электронике предусматривает развитие направления термоменеджмента и включает в себя разработки в области графеновых нанокompозитов и гибридных графеновых нанокompозитов, систем отвода тепла на основе нанопористого графенового композита и систем капельно-струйного и испарительного охлаждения электронных, сильноточных и энергетических систем.

Институт графена (Москва) готов поставлять на рынок высококачественный графен в количестве 25 кг. в месяц. В рамках графенового направления в Институте проводятся работы по созданию следующих функциональных материалов:

- графеновые полимерные пасты с теплопроводностью до 8-15 Вт/мК;
- твердые графеновые прокладки с теплопроводностью до 10-20 Вт/мК;
- гибридные графен + жидкий металл композиты с теплопроводностью до 60-80 Вт/мК;
- системы испарительного охлаждения устройств энергетики, слаботочной и сильноточной электроники с удельным тепловыделением до 150-200 Вт/см²;
- системы воздушного охлаждения с повышенными на 100-200% коэффициентами теплоотдачи с использованием графеновых структур различной сложности;
- системы жидкостного охлаждения серверов дата-центров с эффективными системами иммерсионного охлаждения с использованием графеновых структур и т.д.
- покрытия и краски на основе графеновых композитов для защиты от электромагнитного излучения, включая гигагерцовый и терагерцовый диапазоны.

Объем мирового рынка – 19,5 млрд. долларов США в год, Россия сегодня – 0,003%; Объем российского рынка (импорт) *сегодня* – 25 - 28 млн. руб. в год.

Суммарное потребление графена в РФ за период 2010-2020 гг. не превышало 5 - 10 кг в год, что составило порядка 0,1% мирового производства. Внешнеторговые операции с графеном находятся на околонулевом уровне. То есть производятся и ввозятся малые (граммовые или килограммовые) количества графена для исследований и для разработок. Основные потребители – это научные учреждения и технические университеты, например, Институт физики полупроводников

(Новосибирск); Московский институт электронной техники (Зеленоград), «Сколтех» (Сколково), Институт общей физики им Прохорова (Москва), МГУ (Москва), СВФУ (Якутск).

Промышленные потребители пока оценивают графен в качестве перспективного материала, испытывая его образцы в своих изделиях.

Рекомендованная литература

1. Сайт Института графена (<https://ingraph.ru>)
2. А. С. Дмитриев, А. В. Клименко Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика 2020 г. № 2, с.1 - 16
3. Отчет по теме «Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире» Шифр «Графен-Мониторинг 2019» на 396 стр. Письмо Минпромторга России № 81376\17 от 18.11.19.
4. А.С. Дмитриев, А.В. Клименко Перспективы использования двумерных наноматериалов в энергетических технологиях (Обзор) - в редакции журнала «Теплоэнергетика». План – сентябрь 2023 .
5. А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Введение в наноэнергетику. М. Изд-во МЭИ. 2011. 318 с.
6. А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Физико-химия наноструктур. М. Изд. Дом МЭИ. 2013. 238 с.
7. А.С. Дмитриев. Теплофизические проблемы наноэнергетики. ч.1. Теплоэнергетика, т.57, № 12, 2010, с.13-22, ч. 2. Теплоэнергетика, т.58, № 4, 2011, с.29-36.
8. А. С. Дмитриев. Введение в нанотеплофизику. Изд. БИНОМ. 2015. 792 с.
9. А.С. Дмитриев. Энергобудущее. Перспективные технологии. Хрестоматия. М. Изд. МЭИ, 2018, 123 с. Под ред. А.В. Дедова

4. Перспективы использования графена

Энергетика

Будущее мировой энергетики, может быть, вовсе не связано с органическим топливом (углеродами), а базироваться на совершенно иных принципах и критериях. В конце концов, все топливо на земле происходит от солнечного излучения, которое напрямую на земле используется только в малой доле, в основном за счет фотоэлектрического преобразования (из всего планковского спектра в таком преобразовании используется только узкая часть спектра).

Основные предпосылки смены тренда развития энергетики

высокая стоимость машинного преобразования энергии (через паровые и парогазовые турбины), в настоящее время от 1500 до 4500 \$/кВт вводимой мощности;

высокие сроки окупаемости циклов на паровых и парогазовых турбинах;

постоянное повышение стоимости углеродного топлива (нефть, газ, мазут и т.п.) и ограниченные его запасы (перспективные запасы – в основном в труднодоступных и дорогих для эксплуатации регионах);

большие выбросы диоксида углерода и проблемы экологии;

неиспользуемое низкопотенциальное тепло;

развитие новых направлений перспективных технологий (нанотехнологий, оптоэлектроники, тепломассообмена и т.д.);

открытие новых мезоскопических и наноразмерных структур и материалов с новыми функциональными свойствами.

Основные тренды развития на будущее

разработка и создание новых солнечных преобразователей на базе термофотовольтаики, которая включает преобразование не только видимого солнечного спектра, но и его тепловой части (рост эффективности преобразования с максимальных на сегодня 22-23% до 35-40%);

разработка специальных концентраторов солнечного излучения для создания высокоэффективных систем преобразования широкого планковского спектра солнечного излучения (рост эффективности преобразования с максимальных на сегодня 22-23% до 45-55%);

разработка гибридных систем преобразования солнечной энергии на основе комбинации термофотовольтаики и термоэлектрического преобразования с новыми функциональными термоэлектрическими наноматериалами (рост эффективности преобразования с максимальных на сегодня 22-23% до 65-85%);

разработка гибридных систем преобразования низкопотенциального тепла от земных источников (мусор, тепловые источники, транспорт и т.д.) (рост эффективности преобразования с максимальных на сегодня 30-40% до 60-80%);

стоимость единицы вводимой мощности на гибридных системах преобразования энергии может быть снижена до 5-10 центов/кВт, что представляет собой абсолютную ценовую революцию; кроме того, срок введения мощностей может быть сокращен в сотни раз.

подавляющее большинство задач, стоящих перед энергетикой настоящего и будущего, может быть решена с использованием графена и других двумерных материалов.

Объем производства электрического и электронного оборудования становится все более важным показателем спроса на графен, особенно с учетом того, что этот материал находит все более широкое применение в производстве дисплеев, гибкой электроники, высокочастотных устройств и других технологий. Уровень производства электрического и электронного оборудования в стране также является важным показателем для соответствующей деятельности в области НИОКР, включая разработку современных компонентов на основе графена. Ожидается, что производители электротехники и электроники будут все больше использовать графен для производства новых технологий - или модификаций существующих технологий. Предполагается, что эти усилия будут стимулировать использование графена и других наноматериалов в широком спектре применений для электроники, включая транзисторы, электромагнитное экранирование и продукты для терморегулирования.

Рассмотрим некоторые из технологий, предусматривающих использование графена.

1. Графеновые проводники электрического тока.

В связи с тем, что графен обладает высокой электропроводностью, более, чем на два порядка превышающей электропроводность меди, предлагается создать электрический проводник с использованием графена – без использования металла (алюминия, меди).

Предполагается, что токонесущей частью проводника будет слой графена, находящегося, например, в полиэтиленовой оболочке. Вес такого проводника будет фактически определяться лишь весом самой защитной оболочки, диаметр которой не будет превышать 0,3 - 0,5 мм. Таким образом существенно снизится вес провода. Фактически его вес будет определяться только весом оболочки провода, что приведет к облегчению веса конструкций любого электрооборудования и снижению потерь при передаче электроэнергии.

Ожидается, что замена металлического проводника на графеновый позволит снизить его сопротивление почти на порядок.

Иными словами, реализация этой идеи могла бы произвести переворот во всей электроэнергетике, стать пионерской разработкой, поскольку на сегодня не имеет аналогов в мире

2. Создание электродов на основе графена, покрытого каталитическими наночастицами (высокая коррозионная стойкость, большая площадь поверхности и высокая проводимость) для аккумуляторов литий-ионных, натрий-ионных и других.

Объем мирового рынка – 1,6 - 1,8 млрд. долларов США в год; Россия подобных материалов не производит.

3. Разработка на основе графеновых анодов и катодов, а также полимер-графеновых твердых электролитов суперконденсаторов и батарей с рекордной емкостью и быстротой зарядки и разрядки.

4. Теплонагреватели на основе графена и его композиций на гибкой или твердой матричной основе.

Объем мирового рынка – до 5-6 млрд. долларов США в год, Россия – 80 млн. руб. (без графена), 0 – на основе графена; эффективность использования графена в нагревателях – на 40-60% выше, чем для пленочных, керамических и других инфракрасных нагревателей.

Создание таких нагревателей даст:

- значительное увеличение энергоэффективности нагревателей (от 40 - 70% по сравнению с керамическими, конвективными или инфракрасными нагревателями);
- снижение веса нагревателя (от 1,5 до 3 раз);
- снижение рабочих токов и рабочих напряжений (до 48, 36 или 24 В), что, в свою очередь, позволит возможность работы во влажной среде;
- значительное увеличение электробезопасности (низкие токи и рабочие напряжения);
- высокая экологичность нагревателей (использование только полимеров, красок и графена), разрешенных для жилых и офисных помещений, салонов транспорта и т.д.;
- возможность саморегулировки нагрева без использования специальных термостатов (только на основе зависимости удельного сопротивления от температуры, которое падает с ростом температуры, в отличие от обычных материалов для нагрева).

Графен-полимерный слой таких нагревателей представляет собой композит на основе графеновых хлопьев (многослойный графен, число слоев – от 3 до 10, толщина – до 3, латеральный размер – до 100 мкм), нанесенный на керамику, либо тканый или нетканый материал слоем от 300 мкм до 1 - 2 мм. Рабочие напряжения от 12 до 48 В. Температура поверхности варьируется от 37 °С до 87 °С.

5. Графеновые и гибридные графеновые материалы для суперэффективных накопителей тепловой энергии на базе материалов с фазовыми переходами.

6. Использование графеноподобных материалов в качестве носителя наночастиц или в качестве функциональных добавок в составе электрокаталитического слоя топливных элементов с полимерно-электролитной мембраной, что позволяет улучшить их характеристики, а также повысить активность и стабильность электрокатализатора в реакции выделения кислорода.

7. Графен с покрытием из оксида металла является эффективным катализатором для водородных топливных элементов следующего поколения.

8. Графеновые материалы могут заменить дорогостоящие платиновые катализаторы.

9. Графеновые нанокомпозиты могут служить эффективными компонентами термоменеджмента, обеспечивая эффективную термостабилизацию и отвод тепла от водородных топливных ячеек.

10. Разработка и создание систем для хранения тепловой энергии на основе графеновых композитов с высокой удельной тепловой емкостью.

Зарубежные энергетики активно включились в процесс внедрения графена в современную энергетику и электротехнику.

Одной из ключевых отраслей программы National Graphene Action Plan, анонсированной в 2014 году правительством Малайзии, является разработка анодов с использованием графена для литий-ионных аккумуляторов

. В Технологическом Институте Италии в рамках флагманского проекта «Графен» ведутся разработки в сфере генерации энергии с использованием графена и других неорганических 2D материалов. Целью является разработка и получение необходимого количества графеновых и других неорганических 2D-красок для изготовления печатных солнечных элементов и модулей.

Исследованиями в области химических источников тока занимается также группа С. Джордани в Технологическом Институте Италии. Цель проводимых исследований: выявить перспективные трехмерные структуры на основе графена с морфологическими и химическими свойствами,

специально предназначенные для сорбции газообразного водорода. На настоящий момент получены следующие результаты:

- синтезировано органическое соединение, для функционализации оксида графена, позволяющее увеличить межслоевое расстояние и значительно повысить удельную поверхность материала;

- разработана и синтезирован ряд соединений, молекулы которых отличающихся жесткостью структуры, размером и электронными характеристиками. В дальнейшем эти соединения будут испытаны для создания набора трехмерных материалов на основе графена.

Текущая исследовательская деятельность группы сосредоточена на: - синтезе трехмерных материалов на основе графена с использованием столбчатых молекул, которые имеют разные размеры, форму, жесткость и электронные характеристики; - определении удельной площади поверхности и способности сорбции водорода этими новыми материалами.

К лидерам в области исследований применения графена в химических источниках тока относится компания Samsung. Как было отмечено, команда исследователей из Samsung Advanced Institute of Technology разработала способ получения трехмерной структуры, на основе графена с оксидом кремния в центре, называемой «графеновым шаром».

Испанская компания «Graphenano» представила вместе со своим китайским партнером «Chint» аккумуляторы, изготовленные из графенового полимера, которые, если их использовать в электромобилях, обеспечат автономию в 800 километров. Он также занимает на 20-30% меньше литиевой батареи и может заряжаться всего за 5 минут. Представленные аккумуляторы Grabat предназначены для личного использования в электромобилях, электровелосипедах, дронах и даже кардиостимуляторах.

Перспективные разработки для энергетики будущего

Развитие нашей цивилизации требует ответа на вызовы будущего, – какой будет энергетика через 30, 50 и 100 лет. В настоящее время наша цивилизация подошла вплотную к переходу на новые, более эффективные технологии, способные внести заметный вклад в стабильность энергетики и мира в целом. Однозначно, что в перспективе человечество откажется от «машинных» методов генерации электроэнергии (паровые и парогазовые турбины, вращающие валы электрогенераторов, крутящиеся лопасти ветроагрегатов, различные редуктора и т.п.) Безальтернативная перспектива - солнечная энергия с более эффективным преобразованием и хранением, исполненная в экономически выгодных вариантах и не имеющая отрицательного влияния на окружающую среду, которая всегда будет оставаться самым дешевым источником выработки электричества и теплоты тоже.

Основные мировые тенденции развития энергетики

активизация работ по указанным направлениям в некоторых странах, особенно, США; принятия государственной целевой программы США по развитию гибридной энергетики (к выполнению программы подключены десятки университетов и все национальные американские лаборатории; объем финансирования – сотни миллионов долларов; программа рассматривает перспективу до 30-40 лет);

отсутствие государственной целевой программы в России в этом направлении; отдельные направления программы в России (типа термофотовольтаики) выглядят архаичными, или их авторы пытаются списать программы зарубежные 5 - 10-летней давности;

результатом отставания России может стать разрыв в области энергетических технологий на многие годы, который невозможно будет преодолеть;

наконец, повышение энергоэффективности систем генерации энергии невозможно без новых прорывных конкурентных решений; в противном случае уровень развития энергетики в России будет всегда связан с высокими тарифами и медленным запуском новых мощностей.

Вместе с тем совершенно понятно, что будущее энергетики во многом лежит в космосе, где сосредоточены колоссальные энергетические запасы. Солнечные космические электростанции

(СКЭС) можно смело рассматривать, как одну из энергосистем будущего. СКЭС, использующие неистощимую (возобновляемую) энергию Солнца, т.е. того, уже созданного Природой термоядерного котла, благодаря которому существует все живое на нашей Планете. Иначе говоря, СКЭС – одна из наиболее перспективных, экологически чистых энергосистем будущего, которая не только базируется на широкомасштабном использовании самых современных технологий, но и будет эффективно стимулировать их развитие в дальнейшем.

Основные задачи, стоящие перед исследователями в области использования термоэлектрического преобразования энергии с использованием графена.

Разработка концепций солнечного термоэлектрического преобразования энергии как наземного, так и космического базирования с использованием современных нанотехнологий;

разработка гибридных систем преобразования низкопотенциального тепла в электричество на основе термоэлектрического и термофотоэлектрического преобразования энергии;

проведение исследований и разработок новых термоэлектрических материалов на базе наноматериалов широкого класса систем с целью поиска наиболее эффективных и экономически обоснованных.

Космическая энергетика

Рассмотрим некоторые из технологий, предусматривающих использование графена.

Графеновые системы отвода тепла в системах генерации электрической энергии в космосе.

Графен позволит создать принципиально новые датчики для мониторинга расхода, давления, температуры в области космических технологий и космической энергетике.

3. Разработка систем солнечной теплоэнергетики (без фотоэлектрического или термофотоэлектрического преобразования) энергии солнечного излучения планковского спектра.

4. Разработка капельного и пленочного космических холодильников излучателей (1) на базе графеновых наножидкостей.

5. Разработка систем термоэлектрического солнечного преобразования энергии на основе использования графеновых композитов.

6. Разработка вакуумных и криогенных тепловых ключей на базе графеновых компонент для управления режимами электромеханических и микромеханических систем в условиях космического пространства

7. Разработка тепловых аккумуляторов на фазовых переходах с механизмом накопления тепловой солнечной энергии на базе графеновых композитов.

Водородная энергетика (получение, очистка, хранение водорода)

Как известно, методы и технологии получения водорода подразделяются на фотохимические, электрохимические и фотоэлектрохимические.

В настоящее время самым эффективным способом получения водорода, как топлива, считается фотосинтез за счет солнечного излучения с применением катализаторов.

Эта технология, использующая только солнечную энергию и воду, является экологически чистой, без вредных побочных продуктов и загрязняющих веществ. И, наконец, фотохимическое преобразование солнечной энергии в водород может эффективно справляться с прерывистым характером и сезонным ходом солнечного потока энергии.

В последние годы были исследованы различные способы применения графена и графеновых материалов (как оксида графена, так и чистого графена) для повышения эффективности фотосинтеза при расщеплении воды. Показано, что возможно использование, как графеновых мембран, так и трехмерного (3D) графена. При этом, модификация графеновых поверхностей катализаторами на основе наночастиц металлов и оксидов, заметно увеличивает эффективность солнечного фотосинтеза. Только за последние три года опубликовано более 120 работ, посвященных такой технологии, где показано, что перспективность графена и его композитов заметно выше, чем других материалов.

Трехмерный (3D) графен является одним из многообещающих кандидатов для различных приложений, особенно в фотокаталитическом производстве H_2 из-за его высокой электронной проводимости, механической стабильности, быстрого переноса электронов и большой площади поверхности. Трехмерная структура может улучшить фотокаталитическую эффективность, с точки зрения, усиление адсорбции солнечного излучения, увеличения доступной активной поверхности и улучшения транспорта зарядов. Графен может действовать как акцептор электронов и сокатализатор, а также сочетая графен с оксидами металлов, дихалькогенидами переходных металлов или другими полупроводниковыми материалами, можно повысить фотокаталитическую активность композитов. Следовательно, синтез, характеристики, механизмы и производительность 3D-графена на основе фотокатализаторов в фотокаталитическом производстве H_2 могут быть существенно улучшены, производительность повышена в разы, себестоимость значительно снижена.

Производство водорода при расщеплении воды на солнечной энергии рассматривается как важнейшее решение энергетических и экологических проблем. За последние несколько лет графен внес большой вклад в улучшение солнечной производительности при генерации водорода. Основная роль графена в реакции образования водорода, включая акцептор и переносчик электронов, сокатализатор, фотокатализатор, и фотосенсибилизатор, соответственно. Сравнение между графеном и другими углеродными материалами в солнечной технологии расщепления за последние несколько лет показало, что графен внес большой вклад в улучшение солнечной производительности материалов на основе графена для выделения водорода в результате расщепления воды под действием света.

Помимо сказанного, за последние годы получены замечательные результаты по использованию наноканалов в 3D графене и оксидированном графене для эффективной проницаемости и фильтрации воды, а также для пространственного разделения ионов гидроксония и гидроксида после фотокаталитического расщепления воды. Эти данные показывают значительное преимущество графеноподобных материалов для систем получения водорода.

Графеновые материалы могут и должны заменить дорогостоящие платиновые катализаторы для систем получения водорода. Это позволяет надеяться на получение достаточно дешевого, приемлемого для экономики водорода, что, несомненно, откроет путь к дальнейшему и масштабному развитию водородной энергетики в нашей стране.

Разработка и создание систем накопления и хранения водорода в графеновых материалах, сочетающих высокую емкость, стабильность и возможность, при необходимости быстрого выделения водорода. Возможность создания обратимого хранения водорода.

Задачи, стоящие перед исследователями, занимающихся водородной энергетикой.

Разработка термостойких мембранных материалов на основе графена, позволяющих создавать новые газоразделительные мембраны для очистки водорода в процессах его получения из природного газа, обеспечивающие высокую проницаемость и селективность.

Возможность получения водорода, как топлива, используя фотосинтез за счет солнечного излучения с применением катализаторов. Эта технология, использующая только солнечную энергию и воду, является экологически чистой, без вредных побочных продуктов и загрязняющих веществ.

Исследование возможности использования графеновых мембран и графеновых композитов для систем очистки и получения сверхчистых газов, включая водород, метанол и метан.

С помощью небольших добавок графеновых материалов можно получить значительное улучшение характеристик полимерных мембран, которые в настоящее время по большей части используются в промышленности. Это позволит повысить активность и стабильность электрокатализатора в реакции выделения кислорода.

Использование графеноподобных материалов в качестве носителя наночастиц или в качестве функциональных добавок в составе электрокаталитического слоя топливных элементов с

полимерно-электролитной мембраной позволяет улучшить их характеристики, а также повысить активность и стабильность электрокатализатора в реакции выделения кислорода.

Создание электродов на основе графена, покрытого каталитическими наночастицами (высокая коррозионная стойкость, большая площадь поверхности и высокая проводимость).

Графеновые материалы обладают такими преимуществами, как высокая электрокаталитическая активность, высокая проводимость, отличные механические свойства - прочность, высокая гибкость, большая удельная поверхность и малый вес, что дает возможность хранить электрический заряд, ионы или водород.

10. Графен с покрытием из оксида металла является эффективным катализатором для водородных топливных элементов следующего поколения.

11. Графеновые нанокompозиты могут служить эффективными компонентами термоменеджмента, обеспечивая эффективную термостабилизацию и отвод тепла от водородных топливных ячеек.

Графен, как и другие двумерные наноматериалы (2D материалы) обладают набором уникальных свойств, открывающих интересные перспективы для применения этих материалов в энергетическом оборудовании при переносе тепла. Семейство таких материалов постоянно расширяется не только за счет вариаций на основе графена, но и создания принципиально новых материалов, построенных из других химических элементов и соединений.

Существуют два основных способа применения 2D материалов для интенсификации процессов теплопередачи

- получение и использование в качестве теплоносителей наножидкостей;

- нанесение различного рода покрытий из 2D материалов на поверхности теплообмена.

14. Использование двумерных наноматериалов позволяет заметно интенсифицировать процессы переноса тепла при однофазной конвекции, испарении, кипении, конденсации. Экспериментально показано, что эти материалы могут с успехом применяться в реальных конструкциях теплообменных устройств (тепловые трубы, термосифоны).

15. В последнее десятилетие оформилось новое перспективное направление в преобразовании солнечного излучения в тепло с последующим получением пара, основанное на использовании наножидкостей на базе графена в качестве рабочего тела.

16. Одним из способов хранения водорода может служить технология хранения водорода в сверхкритическом состоянии (1). Технология предусматривает изготовление тонкостенных монодисперсных (диаметром 50 – 100 мкм), заполненных конденсированным водородом. Подобные структуры могут использоваться в трех направлениях: для систем хранения и транспортировки сжатого водорода в сверхкритическом состоянии, как топливные гранулы для сжигания водородного топлива и как термоядерные сферические таблетки в энергетических термоядерных установках.

Использование монодисперсных технологий, когда на микросферы с газом можно наносить одинаковые электрические заряды и управлять ими с помощью внешних электрических полей, позволяет создать не только систему хранения и транспортировки, но и систему подачи микрогранул в блок сгорания с управляемыми расходами, как топлива, так и окислителя. Использование в качестве материала стенок микросфер высокопрочных, но легкоокисляющихся и сгораемых вместе с водородом полимеров, открывает новые возможности для создания принципиально новых конструкций всей топливной системы.

Электроника

По данным на 2015 год мировой рынок электроники, полученной с применением графена, составлял \$3 млн. К 2020 году он достиг \$24 млн. Ожидается, что основными продуктами, в которых графен найдет широкое применение для коммерциализации, будут дисплеи, проводящие покрытия, продукты для терморегулирования, радиочастотные идентификационные устройства. Что касается транзисторов и датчиков, то ожидается, что к 2035 году эта сфера применения графена будет самой развитой и достигнет объема рынка \$720 млн.

Дисплеи: если, к 2020 году мировой спрос на графен, используемый в электронных дисплеях, достиг \$6,3 млн. то к 2035 году прогнозируется \$75 млн. Данное направление представлено дисплеями для конечных продуктов: мобильные телефоны, планшеты, компьютеры, телевизоры;

Транзисторы: мировой рынок транзисторов, полученных с применением графена, в 2020 году был равен \$5,1 млн., в 2035 году - до \$145 млн..

Сенсоры: ожидается заметный рост рынка сенсоров - в 2020 году - \$5 млн. с перспективой роста к 2035 году - до \$140 млн.

Прочая электроника (проводящие композиты для бытовой электроники, спинтроники и другое): в 2020 году - \$7,6 млн. с перспективой роста к 2035 году до \$350 млн.

В Германии в 2019 году запущен проект Graph-IC, целью которого является проверка инновационного потенциала графеновых фотоприемников с кремниевой технологией для высокоскоростного и широкополосного преобразования света. Идея состоит в том, чтобы использовать графеновые фотоприемники в качестве передовой технологии для интегрированных оптоэлектронных систем с чрезвычайно высокой скоростью передачи данных. Ожидается, что такие системы могут значительно превзойти существующие с точки зрения скорости передачи данных, затрат и энергопотребления.

Недавние публикации центра перспективных 2D материалов Сингапура посвящены газочувствительным свойствам двуслойного графена при воздействии влаги и углекислого газа, исследованию контактного сопротивления графена и влиянию электростатического легирования, использованию фотоэлектронной спектроскопии для картирования соответствующих полос для метастабильных эпитаксиальных пленок GeSbTe с фазовым переходом вокруг уровня Ферми, обзору по интегрированной фотонике на основе графена для передачи данных и телекоммуникаций следующего поколения.

В Технологическом Институте Италии в рамках флагманского проекта «Графен» ведется исследовательская деятельность в направлении синтеза вертикальных 2D гетероструктур для оптоэлектроники и спинтроники.

Использование графена в электронике предусматривает развитие направления термоменеджмента и включает в себя разработки в области графеновых нанокompозитов и гибридных графеновых нанокompозитов, систем отвода тепла на основе нанопористого графенового композита и систем капельно-струйного и испарительного охлаждения электронных, сильноточных и энергетических систем.

В рамках этого направления в Институте графена (Москва) просматривается работы по созданию следующих функциональных материалов:

- графеновые полимерные пасты с теплопроводностью до 8-15 Вт/мК;
- твердые графеновые прокладки с теплопроводностью до 10-20 Вт/мК;
- гибридные графен + жидкий металл композиты с теплопроводностью до 60-80 Вт/мК;
- системы испарительного охлаждения устройств энергетики, слаботочной и сильноточной электроники с удельным тепловыделением до 150-200 Вт/см²;
- системы воздушного охлаждения с повышенными на 100-200% коэффициентами теплоотдачи с использованием графеновых структур различной сложности;
- системы жидкостного охлаждения серверов дата-центров с эффективными системами иммерсионного охлаждения с использованием графеновых структур и т.д.
- покрытия и краски на основе графеновых композитов для защиты от электромагнитного излучения, включая гигагерцовый и терагерцовый диапазоны.

Объем мирового рынка – 19,5 млрд. долларов США в год, Россия сегодня – 0,003%; Объем российского рынка (импорт) *сегодня* – 25 - 28 млн. руб. в год.

Перспективы применения графена и его производных для создания композиционных и строительных материалов.

Композиционные материалы.

По мнению большинства экспертов, мировой объем потребления графена в области создания композиционных материалов будет занимать более 30% от объема производимого графена.

Разработкой технологий и получения наноматериалов с использованием графена, аэрогелей для производства композитов занимается Graphene Composites Limited (GC).

Tetra Pak присоединилась к флагманскому проекту «Графен» в качестве эксклюзивного представителя упаковочной промышленности, чтобы изучить возможные будущие применения графена в производстве продуктов питания и напитков. Одна из областей для разработки компании – использование графеновых композитов для уменьшения веса, себестоимости применяемых сенсоров, а также увеличения энергоэффективности.

Talga Resources заключила соглашение о совместной разработке упаковочных продуктов содержащих графен со шведской упаковочной компанией Billerud Korsnäs. Подписанное соглашение является результатом успешных испытаний о применении функционализированного графенового материала Talphene, используемого для производства упаковочных продуктов на основе волокон и картона.

Colloids Group профинансировала совместный исследовательский проект для графеновых нанокомпозитов с Инженерным инновационным центром графена (GEIC) в Университете Манчестера. Команда проекта изучит применимость нанокомпозитов на основе графена и других двумерных (2D) материалов к широкому кругу термопластичных материалов, включая полиолефины, полиамиды и полиэфиры, и выяснит, как на механические, термические, электрические, реологические и газо-барьерные свойства влияют производственный процесс и используемые материалы. Основная цель этого сотрудничества заключается в разработке полимерно-графеновых нанокомпозитов с улучшенными свойствами и многофункциональными возможностями, которые в настоящее время недоступны.

Основными целевыми рынками для продукции графеновых нанокомпозитных коллоидов «следующего поколения» являются автомобильная, аэрокосмическая, электронная и электротехническая.

Компания Haydale выпустила серию препрег-материалов с улучшенными графеновыми свойствами для защиты от удара молнии, используя функционализированные наноматериалы для улучшения электропроводности. Материал был разработан в сотрудничестве с Airbus UK, BAE Systems, GE Aviation и Element Materials Technology Warwick Ltd. В настоящее время консорциум планирует изготовить демонстрационный прототип. Композиционный материал обладает повышенной электропроводностью и может быть использован для конструктивных элементов, а также для корпусов для электронных систем авионики. Разработанный материал потенциально может использоваться для создания беспилотных летательных аппаратов, космических приложений, а также лопастей ветряных турбин, особенно в морских районах, которые подвержены удару молнии.

Разработку компонентов с графеновым покрытием для авиационной промышленности ведет также 2D Fab совместно с SAAB и Blackwing Sweden. Исследования ведутся в рамках проекта Multigraph, запущенного в 2017 году с целью создания перспективных компонентов для авиационной промышленности. Цель проекта состоит в использовании многофункциональных свойств графена для повышения механической прочности и электрической проводимости используемых материалов, в том числе для сокращения объема технического обслуживания, которое необходимо при ударах молнии.

В Технологическом Институте Италии в рамках флагманского проекта «Графен» ведется научная деятельность в области разработки композиционных материалов, включая неорганические двумерные термопластичные композиты. Целью является производство смеси графена и других неорганических 2D материалов - полимерных гранул, содержащих высокие концентрации графена и других неорганических 2D материалов, которые являются стандартными промежуточными соединениями в цепочке поставок полимеров.

Строительные материалы

Новые мировые стандарты современных гражданских технологий постоянно требуют более требовательной инфраструктуры и стимулируют разработку высокоэффективных многофункциональных строительных материалов. В частности, значительные усилия направлены на повышение производительности и функциональности наиболее используемого в мире строительного материала - бетона. Действительно изменяющийся подход к улучшению механических характеристик бетона и обеспечению новых функциональных возможностей материала требует вмешательства в наномасштабе, поскольку большая часть повреждений, нанесенных бетону, может быть связана с химическими и механическими дефектами в цементной структуре. Поэтому современные исследовательские усилия направлены на изучение новых путей повышения эксплуатационных характеристик бетона путем нанотехнологического изменения химических и физико-механических свойств цемента, основного связующего элемента в составе бетона.

Частицы цемента, которые состоят из множества химических элементов (таких как силикаты кальция, алюминаты и алюмоферриты), подвергаются превращению из порошковой формы в волокнистые кристаллы при реакции с водой, известной как реакция гидратации. Их рост и механическое сцепление с течением времени являются наиболее значимыми факторами в формировании свойств материала бетона. Выдающиеся химические и физические свойства наноматериалов обеспечивают наиболее эффективное улучшение внутренней матрицы бетона.

Высокоэффективные бетонные добавки необходимы для решения следующих задач:

- уменьшение усадки, минимизация времени отверждения и улучшение сцепления с предварительно напряженным армированием
- снижение сорбционной способности, что приводит к коррозионной стойкости, которая особенно эффективна в сильно коррозионных средах, таких как канализация. Сорбционная способность - это проникновение влаги в бетонную конструкцию через капиллярный механизм, которое приводит к разрушению бетонной конструкции.

Графеновые добавки в строительные смеси, компаунды и материалы позволяют создать принципиально новые материалы и технологии. Благодаря огромной поверхности химической и абсорбционной активности, графен может быть использован как функциональный модификатор строительных компонент материалов (бетоны, асфальты, взлетные полосы, дороги специального назначения, причалы, взлетные полосы, доки и т.п.)

Проведенные «Институтом графена» (Москва) предварительные исследования показали, что возможно снижение времени созревания строительных и асфальтовых смесей, различных покрытий из цементных материалов, увеличение и прочности на сжатие, возможность управления смачиваемостью водой и скоростью впитывания последней, появление пластичности без использования химических и полимерных модификаторов и т.п.

Графен даёт возможность заметно улучшить свойства бетона.

Институт графена разработал инновационный графен с тонкими атомными слоями – наноинженерный многофункциональный бетонный композит (МБК), который демонстрирует беспрецедентный диапазон улучшенных свойств по сравнению со стандартным бетоном. Модификатор бетона МБК (добавки модификатора – водной

графеновой пасты в количестве примерно 0.1 процента в бетонную смесь) демонстрирует необычайное свойств бетона, включая увеличение сопротивляемости нагрузкам:

- до 50 % и выше — *увеличение прочности*; -
заметное, *в разы, снижение времени «застывания» свежего бетона*; - *усиление*
адгезии и текучести; - *уменьшение*
расхода цемента. -

заметное *снижение*, не менее 200 %, *водопроницаемости*
по сравнению со стандартным бетоном.

Последнее качество бетона является чрезвычайно востребованным свойством для длительного срока службы бетонных конструкций, находящихся в воде, и делает этот новый композитный материал идеально подходящим для строительства в местах, подверженных затоплению. Такой бетон не имеет конкурентов при строительстве и ремонте мостов, плотин, установке фундаментов линий электропередач и фундаментов опор ветроустановок.

Благодаря своим уникальным характеристикам, модифицированный графеном бетон начал применяться в целом ряде направлений строительства. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным бетоном:

- уменьшается расход цемента;
- резкое сокращение сроков созревания бетона (почти в два раза), что позволит существенно ускорить строительство зданий и сооружений, особенно при коттеджном строительстве и возведении сравнительно быстрых сооружений;
- модифицированный бетон лучше сохраняет накопленное тепло за счет его повышенной теплоёмкости;
- увеличение трещиностойкости бетонных сооружений за счет лучшей связи частичек цемента, песка и других компонент внутри модифицированного бетона;
- возможность использования модифицированного бетона, как основы активных конструкций, с новыми эффектами.

Особенно интересен в коммерческом плане такой материал для гидротехнических сооружений – платины, дамбы, бетонизируемые каналы, подвалы с высокой влажностью и т.д. Помимо этого, это хранилища с жидкостями, которые активно могут проникать через тело бетона и т.п.

Важно также отметить, что добавки графена в модифицированный бетон позволит при тех же параметрах конечного материала, сократить на 50% его требуемое количество при возведении сооружений, выполняя все те же нормы по нагрузке сооружений. С экологической точки зрения, сокращение производства бетона может привести к значительному сокращению выбросов диоксида углерода.

Ожидается, что к 2024 году мировой рынок строительной химии (различных добавок, включая графеновые, в строительные материалы), согласно новому отчету Grand View Research, Inc., достигнет 67,61 миллиарда долларов США..

Ожидается, что предстоящие проекты, такие как активное строительство в Индии и Китае, активное строительство речных и морских гидротехнических сооружений, гидроэлектростанций, расширение Панамского канала, будут способствовать росту рынка модифицированного бетона в течение прогнозируемого периода.

Конкретно, для России нет конечных оценок, но при активном строительстве промышленных зданий и сооружений, а также при активном жилищном строительстве,

рынок добавок в бетон может к 2024 году составить более 140 млн. долларов США. На графеновые модификаторы может приходиться до 60-70% этого рынка. Только в Москве, за счет активного строительства и возведения жилья по проекту реноваций, может приходиться рынок графеновых добавок более 10-13 млн. долларов.

Нефтегазовая промышленность.

Механизм разделения газов, фильтрации воды и других жидкостей, включая нефть и ее фракции достаточно подробно обсуждается в (1). Показано, что в мембранах на основе графена селективность определяется размером пор в оксиде графена, а скорость диффузии оказывается нелинейно связана с толщиной мембраны. И хотя графеновые мембраны пока не производятся промышленно, и вопрос находится в стадии лабораторных испытаний, уже понятно, что мембраны на основе графена и оксида графена существенно превосходят традиционные и, по-видимому, за ними будущее.

В настоящее время для этой цели успешно используются мембраны обратного осмоса, но применение в сочетании с ними мембран на основе графена/оксида графена позволило бы существенно интенсифицировать процесс. Для увеличения проницаемости мембран по воде требуется небольшой размер частиц графена, большое количество «окончаний» графеновых прослоек и относительно широкие размеры наноканалов, при этом в ходе изготовления возможно конструирование поровой структуры мембран, что позволяет увеличивать пропускную способность.

Задачи, требующие решения

Создание графеновых систем сепарации нефтяных фракций.

2. Разработка инновационных материалов на основе графена для повышения эффективности добычи нефти в рамках методов увеличения нефтеотдачи и оптимизации добычи:

3. Снижение стоимости генерации пара для добычи битумов, экономия энергии на нагрев. Разработка для этих целей различных видов высокоэффективных графеновых нагревателей (с эффективностью на 40-60% выше существующих).

4. Создание жидкостей с улучшенными свойствами для бурения и цементирования скважин. Создание наножидкостей на базе графеновых нанохлопьев и гибридных наножидкостей с увеличенным переносом тепла, что позволит решить не только задачи трибологии при течении жидких нефтепродуктов, но и заметно повысить отвод тепла от рабочих элементов и блоков бурильного оборудования.

5. Очистка попутно добываемой воды, ее обессоливание и селективное извлечение полезных компонентов. Для этого необходимо осуществить эксперименты по течениям различных рабочих жидкостей, включая смеси органических жидкостей с водой, масел с водой и фракций нефти с водой для изучения возможностей эффективной сепарации воды и органических компонентов с применением графеновых мембран и нанопористых графеновых структур.

6. Использование графена и его вариаций позволит заметно снизить коррозию оборудования и труб в нефтегазовой промышленности.

7. Разработка систем сепарации нефти и воды на базе графеновых технологий с эффективностью, в несколько раз выше существующих, причем с заметным экологическим эффектом по загрязнению окружающей среды.

Радикально новые методы глубокой переработки нефти могут привести к получению углеродных, «графеноподобных» материалов; переработка тяжелой фракции нефти и

битумов (асфальтенов) - к созданию добавок-наполнителей к разнообразным конструкционным материалам, высококачественным полимерам (электропроводящие полимеры, теплопроводящие полимеры, электрохромные полимеры, специализированная синтетическая резина, термопласты и т.п.). Позволит создать конструкционные материалы для строительства, дизайна, корпусирования электронного и энергетического оборудования, аддитивных и 3D-технологий. Здесь совершенно нетронутое технологическое поле.

Графеновые покрытия обладают важными антифрикционными свойствами при течении различных жидкостей в каналах. Исследования, проведенные сотрудниками Института графена (Москва) показали, что обтекания жидкостями различных тел, покрытых слоями графена, и течения вязких жидкостей (с вязкостью, до трех раз превышающих вязкость воды), массовые расходы не соответствуют классическим закономерностям. В частности, установлено, что наблюдается эффект проскальзывания жидкостей вдоль твердых стенок. Поэтому есть необходимость проведения исследований по антифрикционным эффектам при течении неньютоновских жидкостей, в частности нефтяных фракций, внутри труб с графеновыми покрытиями для возможностей разработки технологии снижения гидравлических потерь при транспортировке нефти.

Другие области применения графена

Разработка графеновых нанокompозитных материалов для утилизации низкопотенциального тепла. Создание совершенно новых тепловых аккумуляторов на базе гибридных графеновых композитов, которые позволяют эффективно накапливать теплоту, хранить ее в течение весьма длительного времени или генерировать электрическую энергию с помощью новейших систем конверсии тепловой энергии.

1. Теплоносители на базе графеновых наножидкостей для солнечной теплоэнергетики, эффективных систем теплосъема в тепловой и атомной энергетике, автомобильном и железнодорожном транспорте

Объем мирового рынка – 15 млн. долларов США (2021г.), 1,3 млрд. долларов США (к 2027г.); Россия не производит графеновых наножидкостей.

2. Графеновые твердые и жидкие смазки (транспорт, нефтегазовый сектор, энергетика, системы специального назначения, двойные технологии и т.п.) Разработка специальных видов сухой графеновой смазки для снижения контактного трения.

Объем мирового рынка – 2,4-3,2 млрд. долларов США в год; Россия графеновых смазок не производит.

3. Графеновые нанопористые мембраны и системы для обессоливания и очистки воды и промышленных стоков.

Объем мирового рынка – 65-75 млрд. долларов США в год; потенциально на графене – (2021г.) – 65 млн. долларов США в год; Россия графеновых мембран и систем очистки на графене не производит.

Графеновые композиты и полимерные графеновые нанокompозиты.

Эффективное опреснение морской (либо засоленной) воды с помощью графеновых пленок за счет солнечного излучения. Технология практически не требует энергетических затрат и отличается высокой экологичностью

Системы эффективного охлаждения и термостабилизации на основе графеновых композитов и графеновых наножидкостей применительно к Интернету вещей и дата-центрам.

Объем мирового рынка – 15 млн. долларов США (2021г.), 1,3 млрд. долларов США (к 2027г.); Россия не производит графеновых наножидкостей.

Графеновые системы сепарации воды.

Извлечение драгоценных металлов, включая золото, с использованием графеновых мембран; получение из растворов драгоценных металлов и сплавов на базе их осаждения на подложках и мембранах из оксида графена

Декарбонизация, энергоэффективные технологии утилизации углекислого газа. На сегодня графен является не только самым перспективным материалом для снижения выбросов углекислого газа, но и наиболее эффективным материалом для создания устройств его фотохимической трансформации в новое топливо.

10. Снижение углеродного следа (CO₂)

10.1. Исследования, разработка и изготовление CO₂-селективных мембран из слоистого нанопористого графена и оксида графена для устойчивого улавливания CO₂.

10.2 Исследования, разработка и изготовление газо-селективных мембран, включая выделение CO₂, из слоистого нанопористого графена и оксида графена с использованием солнечного излучения.

10.3. Исследования, разработка и изготовление селективных мембран и нанопористых графеновых структур для выделения CO₂ из газовых; разделение газовых смесей, таких как CO₂ / H₂, CO₂ / CH₄, CO₂ / N₂ и CO₂ / O₂, которые имеют аналогичный состав при обработке дымовых газов, очистке водорода и очистке природного газа.

10.4. Исследования и разработка возможности конверсии природного CO₂ в новое топливо на основе графеновых технологий, в том числе для использования в топливных ячейках.

11. Значительное улучшение, с помощью небольших добавок графеновых материалов, характеристик полимерных мембран, которые в настоящее время по большей части используются в промышленности.

12. Информационные технологии, интернет вещей, дата центры

12.1. Разработка и создание систем для хранения тепловой энергии на основе графеновых композитов с высокой удельной тепловой емкостью на базе материалов с фазовыми переходами для увеличения энергоэффективности и энергобезопасности дата-центров и серверных кластеров.

12..2. Разработка и создание новых вариантов материалов и систем термоменеджмента энергетического и электронного оборудования на основе пассивных и активных систем термостабилизации и охлаждения на базе графеновых технологий термоинтерфейсных материалов.

12.3. Разработка и создание новых нанокompозитов на базе графена и других двумерных материалов для электромагнитной защиты информационных систем («электромагнитные щиты») в широком частотном диапазоне (вплоть до терагерцевых частот).

12.4. Разработка и создание новых систем иммерсионного охлаждения серверов и их кластеров на базе графеновых наножидкостей.

12.5. Сенсоры и оптоэлектронные ключи на базе графеновых технологий.

13. Разработка способов генерации пара за счет поверхностного поглощения солнечного излучения графеновыми композитами, а также объемного поглощения графеновыми наножидкостями.

14. Электропроводящие краски и клеи с графеновым наполнителем, позволяющие создавать высокоэффективные энергосберегающие нагревательные настенные панели, «теплые полы», а также дающие возможность значительно интенсифицировать теплоотвод в различных электронных устройствах.

15. Разработка и создание на базе графеновых технологий новых концепций высокоэффективной мультигенерации электрической и тепловой энергии (включая, солнечные тепловое машинное и безмашинное преобразования на основе термоэлектричества, паровой генерации, систем хранения и конверсии, солнечного фотосинтеза и т.п.)

16. Разработка и создание новых вариантов материалов и систем термоменеджмента энергетического и электронного оборудования на основе пассивных и активных систем термостабилизации и охлаждения на базе графеновых технологий термоинтерфейсных материалов.

17. Важной областью применения графена в настоящее время является фотоника: оптические модуляторы, фотоприемники, болометры, лазеры. Оптический модулятор - это устройство, позволяющее изменять амплитуду, фазу, поляризацию или интенсивность оптического сигнала во времени.

18. Разработка графеновых нанокompозитных материалов для утилизации низкопотенциального тепла. Создание совершенно новых тепловых аккумуляторов на базе гибридных графеновых композитов, которые позволяют эффективно накапливать теплоту, хранить ее в течение весьма длительного времени или генерировать электрическую энергию с помощью новейших систем конверсии тепловой энергии.

Графен для специальных приложений.

Графен, обладая высокой прочностью и легкостью, может применяться для создания бронезилетов, касок и прочего бронезащитного оборудования.

Создание композитных графеновых материалов для защиты, например, систем связи от электромагнитного воздействия.

Графен, в зависимости от его слоистости, может обеспечиваться поглощение до 90% света, что позволит разработать композитные графеновые материалы для создания малозаметных объектов и осуществлять проведения операций в темное, либо вечернее время суток.

Графен, обладая высокой электропроводностью и высокой коррозионной стойкостью, может быть использован для создания накопителей электроэнергии для различных специальных устройств, которым необходима высокие электроемкость и скорость зарядки. Графен, обладая высокой коррозионной стойкостью, способности снизить трение о воду, что может быть использован для создания покрытий, например, для кораблей. Это позволит увеличить их скорость, а также снизит количество водных отложений.

Кроме того, графен может быть нанесен на металлоконструкцию, и поскольку температура плавления у графена порядка 3500 град.С (против 1500 град. С у металла), повышает устойчивость к тепловому воздействию критических конструкций, например, кораблей и мостов.

Графен, обладая высокой прочностью и легкостью, может быть использован для создания графено-композитной арматуры, критических деталей, например, в строительстве.

Графен, обладая высокой прочностью и легкостью, водонепроницаемостью, может быть использован для строительства, например, для аэродромов, взлетно-посадочных полос, причалов и пр.

Графен, обладая способностью к очистке газов, отделении нефтяных фракций от воды, может быть использован для создания мембран, например, для противогазов, опреснения и очистки загрязненной воды, где требуется автономность мест дислокации.

Графен, обладая высокой электропроводностью и легкостью, может быть использован для создания проводника электрического тока, что существенно снизит вес провода, за счет замены металла графеном. Например, в космических аппаратах, авиации, где заметную долю в весе составляют провода, позволит снизить вес обмотки электродвигателей, что в итоге уменьшит расход топлива.

Графен, обладая высокой теплопроводностью, позволяет эффективно отводить тепло. Иначе говоря, осуществлять эффективную термостабилизацию устройств микроэлектроники, силовой электроники, одежды и др. А также, позволяет создавать системы по накоплению тепла и последующей, при необходимости, выдачей его обратно. Например, позволит дополнительное обеспечение теплом в автономных местах.

Графен, обладая высокой прочностью, позволяет создавать резинотехнические изделия нового поколения - повышенной прочности. Добавляя его в углепластик - создавать очень легкие материалы так же повышенной прочности.

Нанопористый графеновый материал может быть использован для создания систем, предназначенных для хранения газов в удаленных местах дислокации, там, где отсутствуют трубопроводы. Может быть также использован в качестве резервного источника топлива, в том числе для движущейся техники.

Рекомендованная литература

1 Экономика и управление в современной электроэнергетике России. Под редакцией Е.В. Аметистова и А.Ю. Шаровой НП «КОНЦ ЕЭС», 2019 г.

2. Отчет по теме «Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире» Шифр «Графен-Мониторинг 2019» на 396 стр. Письмо Минпромторга России № 81376\17 от 18.11.19.

5. *Прогноз развития рынка производства графена, его производных и продукции на его основе в мире на период до – 2024 г.*

В настоящее время мировой рынок графена находится на стадии формирования. Сегодня его производство составляет около 4 тыс. тонн, что является сравнительно низким значением относительно других углеродных наноматериалов. Например, мировой объем производства углеродных нанотрубок составляет более 25 тыс. тонн, при том, что графен характеризуется более преимущественными свойствами и более высоким потенциалом применения.

Согласно представлениям (2), мировой рост рынка графена будет определяться достижениями в области производственных методов получения, которые с развитием технологий все больше позволят выпускать надежные высококачественные графеновые материалы в промышленных масштабах по конкурентоспособным ценам. В целом, перспективы графеновых материалов являются обнадеживающими, несмотря на то что рынок не достиг спрогнозированных темпов роста. В краткосрочной перспективе

наибольший коммерческий спрос будет сосредоточен на таких применениях, которые не требуют высококачественных графеновых продуктов.

Согласно исследованию аналитической компании «Инфомайн», мировое производство графена в 2016 г. составило 1,5 тыс. тонн и по прогнозам в 2019 г. увеличится до 4 тыс. тонн., а в 2024 составит 14 тыс. тонн. (см. рис. 1).

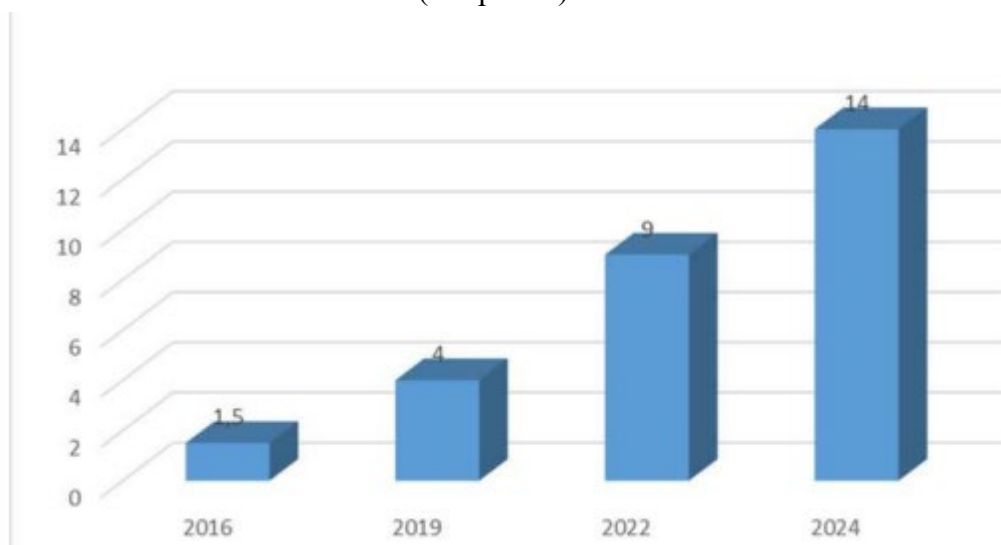


Рис. 1. Динамика мирового производства графена в 2016-2024 гг., тыс. тонн.

Распределение производственных компаний по регионам представлено на рисунке 2.

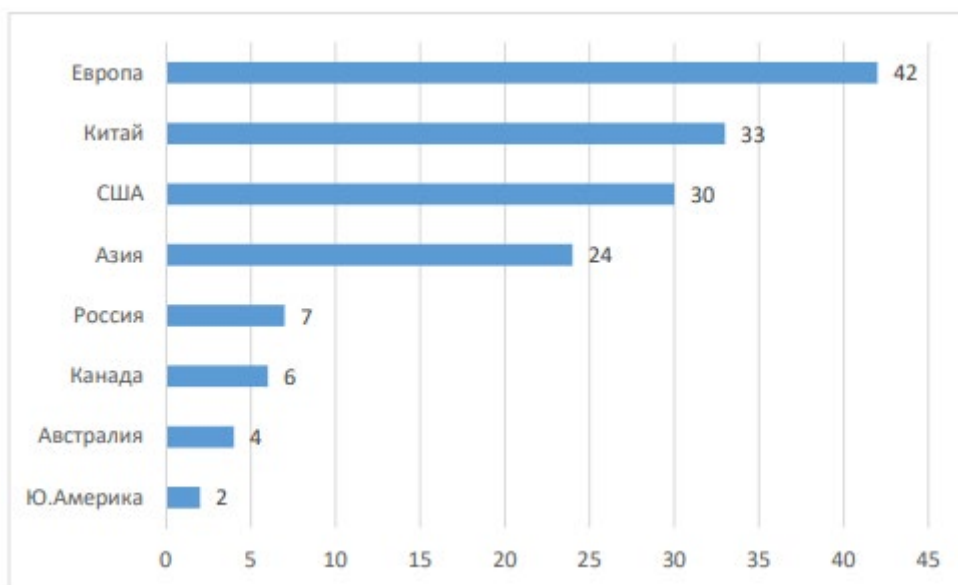


Рис. 2. Количество производственных площадок графена в мире, штук

Согласно рисунку 2, сегодня в число лидирующих входят компании из двух стран: Китая и США. При этом на Китай приходится примерно половина мирового производства графена различного качества.

До 2019 года большая часть расходов в мире на НИОКР, связанных с графеном, была сосредоточена в академических учреждениях, а также среди разработчиков товаров на основе графена, в том числе систем фильтрации, защитных покрытий, товаров спортивного назначения и других продуктов с относительно короткими сроками выхода на рынок.

В 2019 году почти половина всех затрат на НИОКР была связана с электроникой и энергетическими рынками, чему способствовало развитие в ближайшем будущем высокопрочных композитных материалов и литий-ионных аккумуляторных электродов,

изготовленных на основе графена. Ожидается, что доля общих расходов на НИОКР, приходящихся на электронику и биомедицинские применения, будет продолжать расти по мере продвижения таких продуктов, как транзисторы и биосенсоры, к более высоким уровням технологической готовности. Сегмент академических исследований, как ожидается, сократится, поскольку расходы продолжают смещаться от учреждений к частным лабораториям, предназначенным для коммерциализации конкретных продуктов.

Глобальный спрос на графеновые материалы, с 2015 года, когда объем составлял небольшие суммы, вырос до \$113 млн в 2019 году. К 2024 году мировой рынок, по прогнозам, превысит \$315 млн, поскольку материал быстро внедряется в секторах электроники, энергетики и композитных материалов.

Эксперты полагают, что до 2024 года спрос будет все больше смещаться от исследований в лаборатории к коммерческим товарам, поскольку производители графеновых материалов преодолевают технологические барьеры и снижают цены, стимулируя быстрое внедрение в растущее число коммерческих продуктов.

Мировой спрос на графен 2019 – 2024 г. по регионам представлен на рис. 3.



Рис. 3. Мировой спрос на графен по регионам 2019 и 2024 годы (\$млн.)

Страны с наиболее развитой электроникой, накопителями энергии и композитными материалами являются ведущими мировыми производителями графена, а также, по прогнозам, будут представлять собой ведущие рынки сбыта. США, по прогнозам, останутся ведущим национальным рынком для графена до 2024 года, составляя более четверти мирового объема.

Растущее внедрение графена в высокоэффективные композитные материалы, устройства накопления энергии (включая топливные элементы и суперконденсаторы) будет способствовать прогрессу, а также росту расходов на НИОКР в передовых областях электроники (таких как оптоэлектроника и спинтроника).

Развитый биотехнологический сектор страны будет способствовать дополнительным объемам по сбыту, так как планируется, что графен найдет все более широкое применение в биосенсорах и других диагностических инструментах.

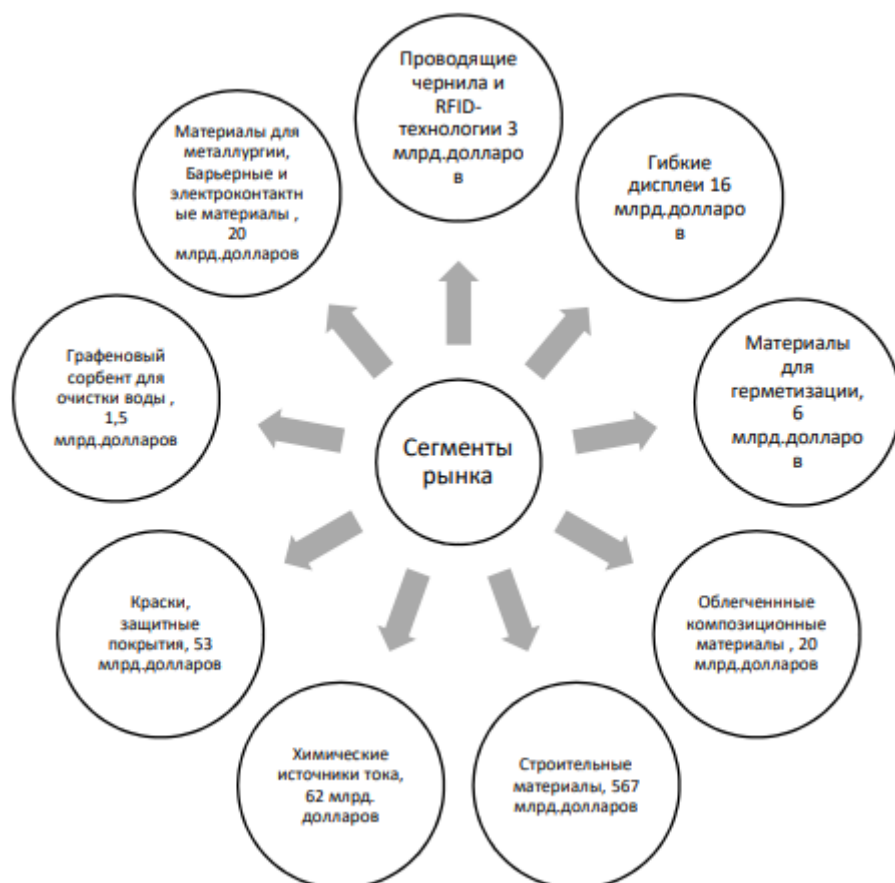
Азиатско-Тихоокеанский регион останется главным региональным потребителем графена, положение которого укрепляется передовыми электронными и энергетическими отраслями промышленности Японии, Китая и Южной Кореи. Как и США, эти страны извлекают выгоду из относительно богатого опыта исследований и разработок. Ожидается, что региональные

электронные компании останутся передовыми в области разработки графеновых продуктов до 2024 года, финансируя нанотехнологические проекты для дальнейшего изучения потенциала графена. Западная Европа, по прогнозам, останется третьим по величине региональным рынком графена, составляющим более одной пятой мирового объема в 2024 году. Огромный сектор нанотехнологий региона будет стимулировать продажи, а также передовые производственные отрасли таких стран, как Германия, Великобритания и Франция. Хотя регион и невелик по сравнению со многими азиатскими странами, он также характеризуется значительным объемом производства электроники, включая мобильные телефоны и датчики.

Ожидается, что в дальнейшем, стимулируя спрос на графен, Западная Европа будет играть важную роль в растущем производстве передовых накопителей энергии, таких как топливные элементы и суперконденсаторы, чему будет способствовать интенсивное внимание региона к альтернативным источникам энергии.

В совокупности, доля других стран в мировом спросе на графен, по прогнозам, останется небольшой, хотя некоторые страны-такие как Бразилия, Канада, Мексика и Россия - в конечном итоге будут потреблять значительное его количество. Кроме того, несколько небольших стран, таких как Израиль и некоторые более промышленно развитые страны Восточной Европы, вероятно, станут относительно важными источниками производства графена в долгосрочной перспективе.

Объем потребления графеновых производных на порядок больше объема графена, на 2019 год он составил \$1 трлн., а в 2024 г может возрасти до \$2,5 трлн. Такой объем рынка обусловлен широким спектром применения графеновых производных.



На рис. 4. представлены сегменты и емкость рынка реализации графена и его производных (1)

Расширение применения оксида графена в композитных материалах и литий-ионных (Li-Ion) батареях будет способствовать росту продаж в будущем. Прогнозируется также, что рост расходов на НИОКР в энергетическом секторе будет стимулировать спрос на оксид графена, особенно когда технологии суперконденсаторов приблизятся к этапам коммерциализации. К тому же, ожидается,

что повышение промышленного производства высококачественного оксида графена в сочетании со снижением цен повысит конкурентоспособность продукции с использованием альтернативных материалов, таких как углеродное волокно в композитах и графит в батареях.

Глобальный рынок графена можно разделить на пять основных сегментов: композиты, энергетика, электроника, биомедицинские и академические исследования. Прогнозы спроса на графен на конкретных рынках напрямую связаны с перспективами и стадиями коммерциализации.

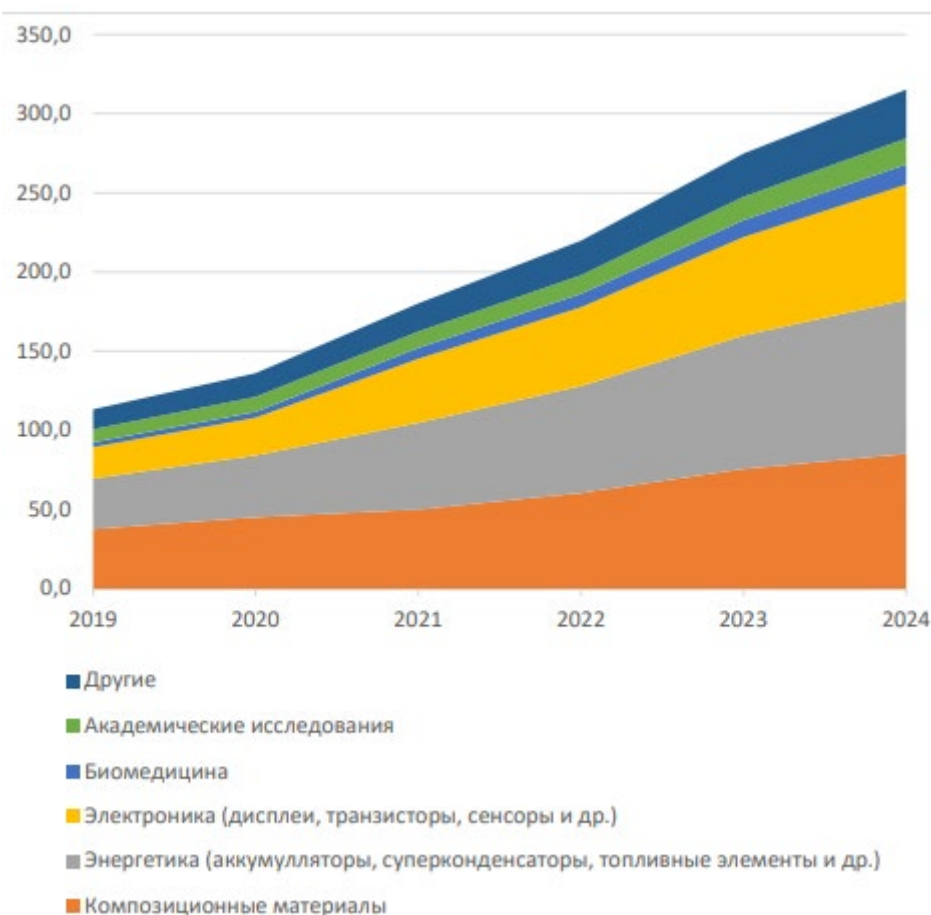


Рис. 5.

На рис. 5. представлен мировой спрос на графеновые материалы в 2019-2024 гг. в зависимости от применения (\$млн.)

Продукты на основе графена с самым быстрым выходом на рынок, такие как полимерные композиты и материалы для аккумуляторов, составляли самые высокие доли общего спроса до 2020 года. К 2024 году, по прогнозам, электронные продукты, такие как проводящие пленки, датчики, высокочастотные транзисторы станут лидирующими на рынке.

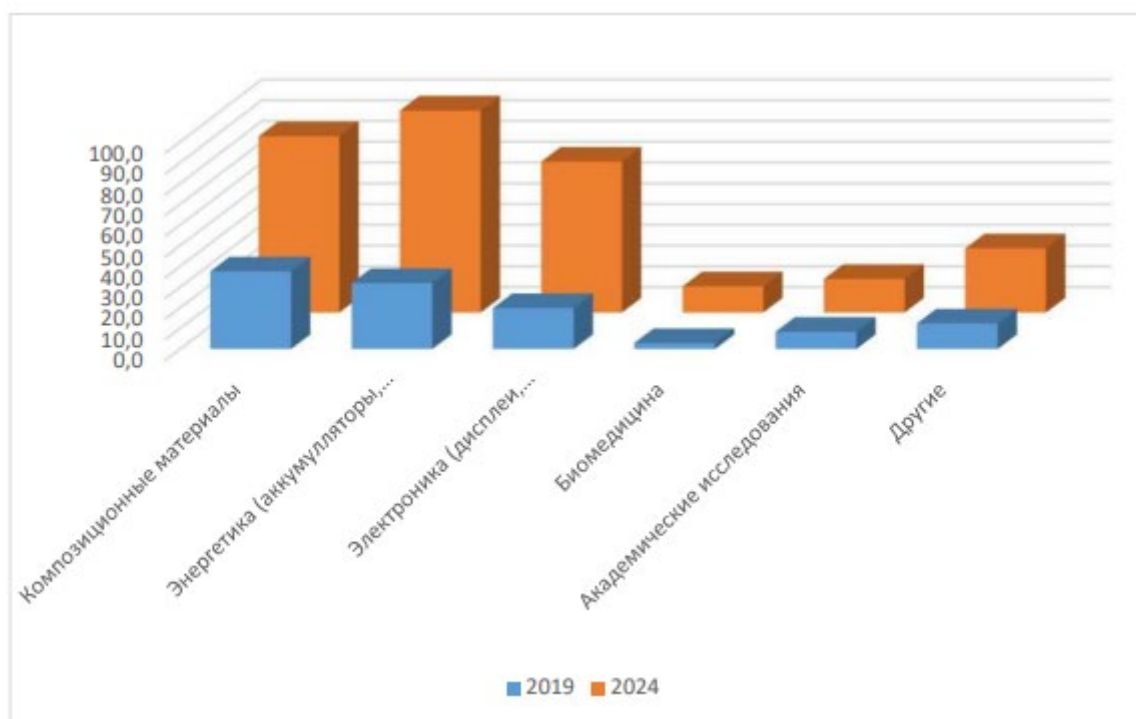


Рис. 6. Потребление графена в зависимости от сферы применения в 2019 и 2024гг. (\$млн.)

Мировой рынок композитов на основе графена в 2019 году вырос до \$37,6 млн., оставаясь ведущим потребителем в мире. К 2024 году прогнозируется расширение рынка до \$85 млн. Ожидается, что к 2025 году произойдет коммерциализация более совершенных композитов на основе графена, которые имеют более широкий спектр применения в упаковке, автомобилях и аэрокосмическом оборудовании. В целом, страны с наиболее развитыми производственными секторами, как ожидается, будут лидировать в спросе на графен в композитах. Исключением является Китай, который, по прогнозам, будет потреблять значительные объемы графена в композитах для своей крупной индустрии спортивного оборудования. Аналогичное увеличение прогнозируется для США и большинства стран Западной Европы.

Мировой энергетический рынок использования графена, вырос к 2020 году до \$39,0 млн., что является вторым по величине выходом графена после композитов. Прогнозируется, что к 2024 году объем рынка энергии превысит \$97,4 млн., в основном вследствие растущего спроса на материалы для аккумуляторов на основе графена. Ряд свойств, в том числе большая площадь поверхности, которая поддерживает высокую емкость накопления энергии, делают графен перспективным для хранения энергии. Проводимость, прозрачность и гибкость материала также являются важными характеристиками, способствующими внедрению в энергетическом секторе. Значительный размер энергетического рынка во многом обусловлен относительно ранними перспективами коммерциализации графена в литий-ионных (Li-Ion) аккумуляторных приложениях. Ожидается, что к 2024 году растущий коммерческий спрос на суперконденсаторы, топливные элементы, фотоэлектрические элементы и другие передовые технологии будут стимулировать продажи графена в других областях энергетики.

Мировой спрос на графен в топливных элементах и во всех других областях применения энергии к 2020 году достиг 7,0 млн. Долларов США, а к 2035 году увеличится до 135 млн. долларов США.

Как и на рынке суперконденсаторов, расходы на НИОКР будут в первую очередь стимулировать спрос в этом сегменте, поскольку широкое внедрение графена в этих конечных применениях не ожидается в течение следующих 10 лет. Среднесрочное применение, классифицированное здесь, включает фотоэлектрические элементы, где графен является кандидатом на замену оксида индия и олова (ITO) в прозрачных проводящих пленках. Топливные элементы, с другой стороны,

представляют собой долгосрочную перспективу для графена, поскольку коммерческий спрос на сами технологии топливных элементов все еще растет. Внедрение топливных элементов с графеновыми добавками поможет увеличить спрос сегмента до 100 миллионов долларов к 2035 году.

Рекомендованная литература

Экономика и управление в современной электроэнергетике России. Под редакцией Е.В. Аметистова и А.Ю. Шаровой НП «КОНЦ ЕЭС», 2019 г., 725 с.

2. Отчет по теме «Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире» Шифр «Графен-Мониторинг 2019» на 396 стр. Письмо Минпромторга России № 81376\17 от 18.11.19.