



Будущее передовых материалов

Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) НИУ ВШЭ на основе опроса ведущих российских ученых изучил перспективы создания передовых материалов и сравнил для выделенных главных направлений разработок сроки достижения в России и мире ключевых показателей их технологической готовности.

Справочно: оценки опираются на результаты масштабного опроса более 160 ведущих ученых в области химии и материаловедения, чьи публикации входят в топ-20% в базе данных Scopus по числу цитирований. Общий перечень перспективных материалов сформирован с помощью системы интеллектуального анализа iFORA и уточнен по итогам экспертных обсуждений с представителями научного и бизнес-сообщества.

Система интеллектуального анализа больших данных iFORA разработана ИСИЭЗ НИУ ВШЭ с применением передовых технологий искусственного интеллекта. Ее база источников включает более 850 млн документов (научные публикации, патенты, нормативная правовая база, рыночная аналитика, отраслевые медиа, материалы международных организаций, вакансии, др.) и постоянно пополняется.

В 2020 г. iFORA отмечена в журнале *Nature* в качестве эффективного инструмента поддержки принятия решений в интересах бизнеса и органов власти. В 2025 г. система представлена на глобальной встрече кафедр ЮНЕСКО как инструмент доказательного прогнозирования будущего. ОЭСР относит систему iFORA к успешным инициативам в области цифровизации науки.

Создание передовых материалов способствует достижению целей устойчивого развития, решению задач импортозамещения, а также во многом именно это направление разработок обеспечивает конкурентоспособность национальной экономики и технологический суверенитет.

В фокусе настоящего обзора – материалы, обладающие значительным инновационным потенциалом для медицины, энергетики и др. Текущие значения показателей их технологической зрелости приведены на уровне мировых лидеров на этапе опытно-промышленных образцов.

Передовые материалы для медицины

Под влиянием тренда на активное долголетие и увеличение продолжительности жизни в разработках для медицины растет доля проектов, нацеленных на создание новых материалов с усовершенствованными физико-механическими и биологическими свойствами. Многие из них применяют для восстановления функций опорно-двигательного аппарата. Например, изготавливают постоянные импланты на основе биоинертных титановых сплавов. Для замещения костных дефектов и стимуляции восстановления костной ткани используют ортопедические конструкции из биорезорбируемых магниевых сплавов. От соответствия модуля упругости этих материалов модулю упругости кости зависят эффективность лечения, отсутствие стресс-шейдинга¹ и оптимальные условия для остеоинтеграции, вследствие чего это свойство рассматривается как ключевой показатель технологической готовности по данному направлению разработок (рис. 1). В случае с титановыми сплавами достижение этого показателя сопряжено с технологическими ограничениями, тогда как магниевые дают больше возможностей управлять составом и настраивать этот показатель.

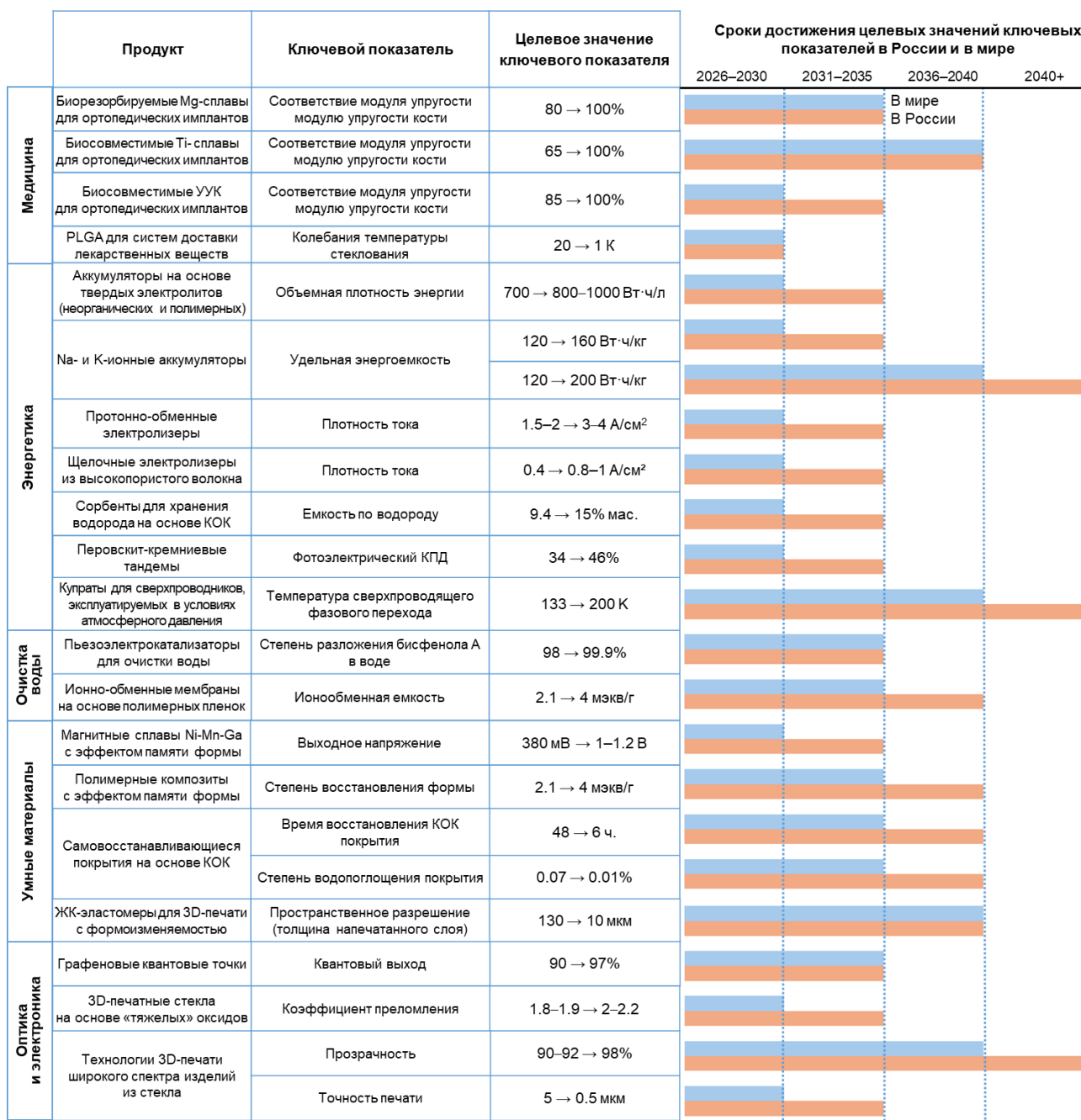
Альтернативное решение для постоянных костных имплантов, в том числе сложной челюстно-лицевой формы, – углерод-углеродные композиты (УУК). Требуемые механические параметры можно задавать через управление их внутренней структурой, при этом их высокая пористость обеспечивает хорошую совместимость с костной тканью.

Биорезорбируемые полимеры, в частности сополимеры молочной и гликолевой кислот (PLGA), лежат в основе перспективных технологий локальной доставки лекарств. Они основаны на применении полимерных капсул или имплантируемых матриц, оболочка которых деградирует с постепенным высвобождением биоактивного вещества. Для таких систем ключевое значение имеет колебание температуры стеклования², от которого зависит скорость деградации полимерной оболочки и, как следствие, – скорость высвобождения препарата. Разброс значений температуры стеклования пока достигает 20 К, его снижение до 1 К позволит обеспечить точное и безопасное высвобождение препарата и таким образом расширить применение систем доставки на основе PLGA.

¹ Стресс-шейдинг (англ. *stress shielding*) – снижение физиологической нагрузки на кость из-за присутствия импланта с более высоким модулем упругости, приводящее к ее атрофии и резорбции.

² Температура, при которой материал переходит из жесткого, стеклообразного состояния в мягкое, эластичное, не плавясь.

Рис. 1. Ожидаемые сроки достижения целевых значений показателей развития технологий получения перспективных материалов в России и в мире



Передовые материалы для энергетики

В условиях глобального перехода к углеродной нейтральности востребованы материалы для генерации, хранения и передачи энергии с наименьшими потерями и низким углеродным следом.

В солнечной энергетике перспективным направлением являются перовскит-кремниевые тандемы, сочетающие высокую эффективность преобразования солнечного излучения и масштабируемость производства. Их фотоэлектрический КПД уже достигает 34%, а приближение к теоретическим 46% позволит увеличить выработку электроэнергии без роста площади панелей и сократить расход конструкционных материалов.

Создание энергоемких и безопасных систем накопления энергии связывают с аккумуляторами на основе твердых неорганических и полимерных электролитов. Ключевой показатель технологической зрелости тут – объемная плотность энергии – в настоящий момент составляет 700 Вт·ч/л на уровне одной ячейки. Повышение до 800–1000 Вт·ч/л приведет к росту емкости сетевого хранения при тех же объеме и массе батарей, большому запасу хода электромобилей, и сформирует базу развития электрической авиации.

Параллельно развиваются разработки, ориентированные на снижение стоимости производства и эксплуатации аккумуляторов, а также повышение технологической независимости за счет отказа от дефицитных элементов и перехода к альтернативным электротехническим системам. Речь идет прежде всего о более доступных натрий- и калий-ионных аккумуляторах с ресурсом 1000–2000 циклов заряд–разряд при стабильных характеристиках. Переход к массовому использованию возможен при достижении удельной энергоемкости 160 Вт·ч/кг (текущий уровень – до 120 Вт·ч/кг).

Если аккумуляторные электрохимические системы обеспечивают краткосрочное накопление энергии, то для ее долгосрочного и масштабного хранения рассматривают водород, позволяющий удерживать избыточную энергию переменной генерации возобновляемых источников. Снижение стоимости его производства при электролизе воды связано с развитием протонно-обменных (РЕМ) и щелочных электролизеров. Ключевой параметр их эффективности – плотность тока. Ее повышение в РЕМ-электролизерах с 1.5–2 до 3–4 А/см², а в щелочных – с 0.4 до 0.8–1 А/см² означает рост производительности при той же активной площади мембраны электролизера, снижение расхода дорогостоящих материалов (прежде всего иридия) и уменьшение габаритов установок. Выйти к таким значениям плотности тока можно за счет более стабильных мембран, низкоиридиевых или безиридиевых анодов (для РЕМ-систем) и высокоактивных никелевых электродов (для щелочных электролизеров).

Развитие водородной энергетики требует надежных систем хранения. Важную роль здесь играют сорбционные материалы, в частности ковалентно-органические каркасы (КОК). Увеличение их емкости по водороду с 9.4 до 15.6 % мас. позволит удерживать больше водорода при том же объеме хранилища и более низком давлении, что повысит безопасность и компактность таких систем.

Эффективность энергетической инфраструктуры в значительной мере определяют используемые для передачи и распределения энергии материалы. Для этих задач перспективны высокотемпературные сверхпроводники на основе купратов, работающие при атмосферном давлении. Повышение температуры их сверхпроводящего перехода с 133 до 200 К позволит перейти от криогенного охлаждения жидким гелием или азотом к более простым решениям, что уменьшит сложность и габариты сверхпроводящих энергетических систем. Достижение таких параметров ожидается после 2035 г. как в России, так и в мире.

Передовые материалы для очистки воды

На фоне усиления климатических изменений и увеличения нагрузки на водные ресурсы становятся востребованными новые материалы для очистки воды. Перспективной технологией являются пьезоэлектродокатализаторы, способные разлагать растворенные органические загрязнители под действием механических колебаний. Показателем эффективности таких материалов служит остаточная концентрация бисфенола А в сточных водах после обработки. Этот широко используемый в производстве пластмасс компонент накапливается в окружающей среде и оказывает негативное влияние на эндокринную систему человека и животных. В настоящее время его остаточное содержание после пьезоэлектродокаталитической обработки составляет около 2%, а дальнейшее совершенствование материалов может снизить показатель до 0.1% – предела обнаружения.

Другим ключевым направлением остаются ионообменные мембраны на основе полимерных пленок, применяемые для удаления тяжелых металлов и других растворенных загрязнителей. Удвоение их ионообменной емкости (с 2.1 до 4 мэкв/г) может способствовать росту производительности, увеличению срока службы и повышению устойчивости систем водоочистки, а также снижению эксплуатационных затрат.

Передовые материалы для оптики и оптоэлектроники

Цифровая трансформация повышает требования к скорости передачи и обработки данных. Их выполнение все чаще связано с фотонными технологиями, посредством которых информация передается с помощью света. Это усиливает роль материалов, обеспечивающих генерацию и управление световым сигналом. Одним из решений, используемых в разработках оптоэлектронных устройств, являются графеновые квантовые точки. Повышение их квантового выхода с 84% до 97% способствует снижению энергетических потерь и повышению яркости и чувствительности элементов.

Еще одним классом материалов для фотонных систем являются стекла на основе тяжелых оксидов, получаемые аддитивными методами. Они сочетают высокую прозрачность в видимом и ИК-диапазоне (до 90–92%) с высоким коэффициентом преломления (1.8–1.9) и технологической гибкостью, что делает их пригодными для прецизионной микрооптики, компонентов VR/AR-устройств и оптических сенсоров. Дальнейшее повышение коэффициента преломления до 2–2.2

и точности печати с 5 до 0.5 мкм обеспечит оптическое качество, необходимое для интегральной оптики, продвинутых VR/AR-систем и биомедицинских сенсоров. Ограничивающим фактором остаются особенности 3D-печати, из-за которых максимальная прозрачность изделий (до 99%) пока недостижима.

Передовые умные материалы

Широкий спектр приложений – от компонентов «мягкой» робототехники и систем адаптивной оптики до миниатюрных приводных устройств – имеют материалы, способные изменять форму под воздействием внешних стимулов – температуры или магнитного поля. К ним относятся, например, сплавы на основе системы никель–марганец–галлий (Ni-Mn-Ga). Их практическое применение пока сдерживается низким генерируемым электрическим напряжением (около 380 мВ), однако повышение этого показателя до 1–1.2 В позволит интегрировать устройства на основе сплавов Ni-Mn-Ga в приводные системы (микронасосы, актуаторы, адаптивные амортизаторы и др.).

Развитие формоизменяемых систем связано также с полимерными композитами с эффектом памяти формы, способными многократно восстанавливать геометрию после деформации. Повышение степени восстановления формы с 90% до 97% расширит возможности их применения в медицинских имплантах, аэрокосмических системах и прецизионных конструкциях, где критична геометрическая точность.

К адаптивным материалам относятся и жидкокристаллические эластомеры с программируемой формоизменяемостью, в частности, применяемые в 3D-печати изделий. При текущем разрешении около 130 мкм они пригодны для создания приводов и оптических элементов для биомедицинских имплантов и сенсоров. Повышение разрешения до 10 мкм позволит перейти к микроактуаторам для систем «лаборатория-на-чипе».

Другое направление – антикоррозионные покрытия на основе ковалентно-органических каркасов (КОК). Их структура обеспечивает стимул-зависимое высвобождение ингибиторов коррозии, «самозалечивание» трещин и барьерную защиту от влаги. Снижение водопоглощения с 0.07 до 0.01% мас. и сокращение максимального времени восстановления с 48 до 6 часов могут расширить применение таких покрытий в судостроении, нефтегазовой отрасли и химическом машиностроении, где недопустимы даже кратковременные локальные очаги коррозии.

Резюме:

Сильная отечественная научная школа в области химии и материаловедения позволяет ожидать уже в ближайшие 5–10 лет внедрения систем доставки лекарств на основе PLGA и биорезорбируемых сплавов для ортопедии, которые являются важным условием развития персонализированной медицины. Разрабатываемые технологии очистки воды от вредных веществ, в частности бисфенола А, в среднесрочной перспективе могут выйти на уровень массового производства, что значительно повысит класс экологичности предприятий химической промышленности и уровень защиты здоровья населения. На том же горизонте эксперты ожидают прорывов в области фотоники и оптоэлектроники по направлению разработок квантовых точек. Масштабируемое производство передовых материалов становится ключевым условием трансформаций, определяющих облик стратегических отраслей и инфраструктуры ближайших десятилетий.



Источники: расчеты на основе системы интеллектуального анализа больших данных iFORA (правообладатель – ИСИЭЗ НИУ ВШЭ); результаты проекта «Исследование тенденций и факторов устойчивого развития сферы науки и технологий» тематического плана научно-исследовательских работ, предусмотренных Государственным заданием НИУ ВШЭ на 2026 год.

■ Материал подготовила **А. А. Гречишникова**

Данный материал НИУ ВШЭ может быть воспроизведен (скопирован) или распространен в полном объеме только при получении предварительного согласия со стороны НИУ ВШЭ (обращаться issek@hse.ru). Допускается использование частей (фрагментов) материала при указании источника и активной ссылки на интернет-сайт ИСИЭЗ НИУ ВШЭ (issek.hse.ru), а также на автора материала. Использование материала за пределами допустимых способов и/или указанных условий приведет к нарушению авторских прав.

© НИУ ВШЭ, 2026

Сайт ИСИЭЗ НИУ ВШЭ

issek.hse.ru



канал в Telegram

t.me/iFORA_knows_how



сообщество во «ВКонтакте»

vk.com/issek_hse

