



НАСТУПАЛЬНАЯ
АПЕРАЦИЯ
«БАГРАЦІЁН»:
ДЗЕНЬ ЗА ДНЁМ

4

ОСОБЕННОСТИ
НАУЧНОГО
ПОИСКА
В НАНОМАСШТАБЕ

11

АДДИТИВНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО
ПОРОШКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ

28

БОЛЬШИЕ
МАЛЕНЬКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ

48

Наука и инновации

№6 (256)

июнь 2024

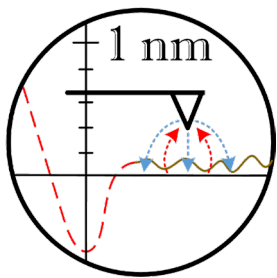
научно-
практический
журнал

Научные
сценарии
НАНОМИРА

ISSN 1818-9857



9 771818 985001 06
ISSN 2412-9372 (online)

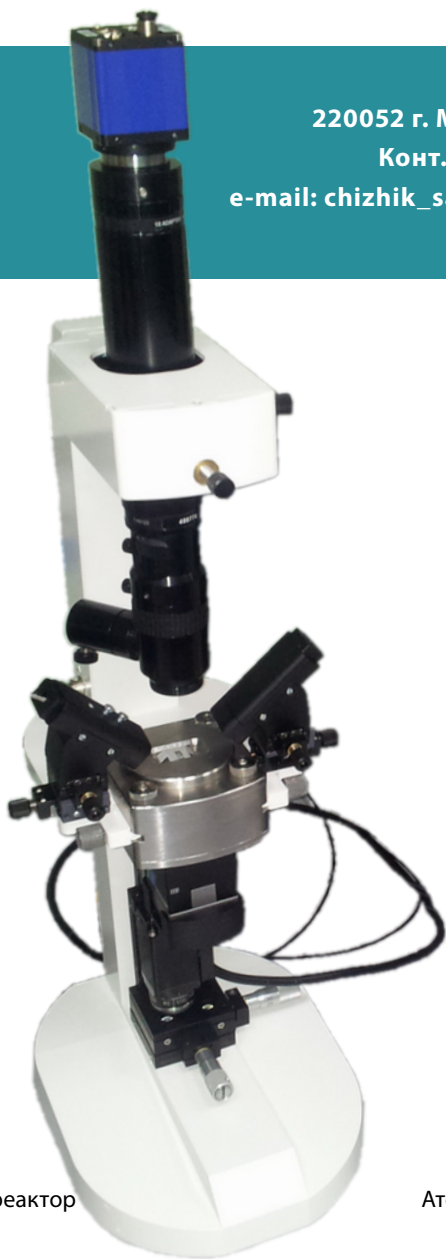


Лаборатория нанопроцессов и технологий

220052 г. Минск, ул. П. Бровки, 15
Конт.тел.: (017) 3561060
e-mail: chizhik_sa@tut.by, vasilinka.92@mail.ru



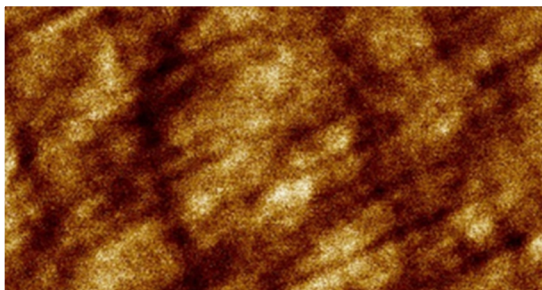
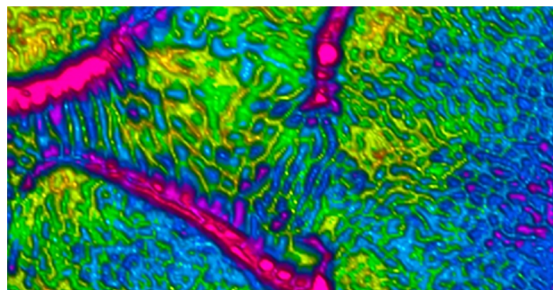
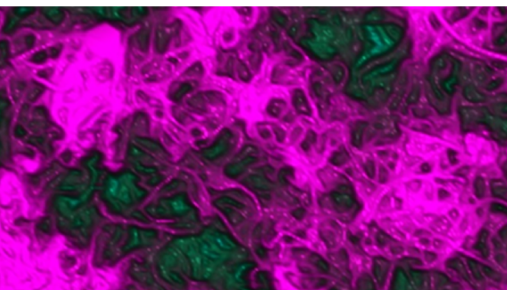
Оптический микроскоп



Биореактор



Атомно-силовой микроскоп NT-206





Установка для распылительной сушки

Направления деятельности

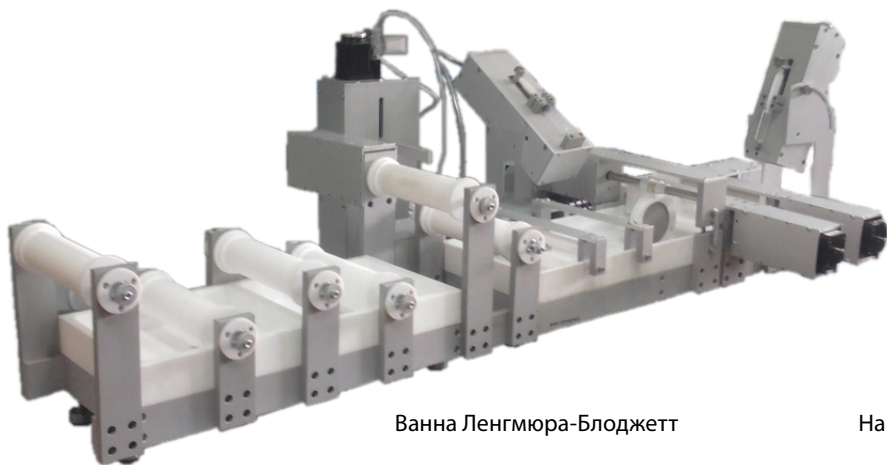
- Синтез и модифицирование микро- и наноразмерных материалов и композитов
- Микро- и наноразмерный теплообмен, контактные задачи микромеханики, моделирование маннх системах и метаматериалах, МЭМС
- Исследование и анализ структуры и свойств наноструктурных материалов, МЭМС, композитов и биологических объектов методами оптической, атомно-силовой микроскопии, наноиндентирования
- Создание сенсоров и сенсорных систем
- Метрология и стандартизация измерений в области нанотехнологий
- Разработка оборудования и технологий микроанализа и нанодиагностики материалов с высоким пространственным разрешением



Атомно-силовой микроскоп SSM-310



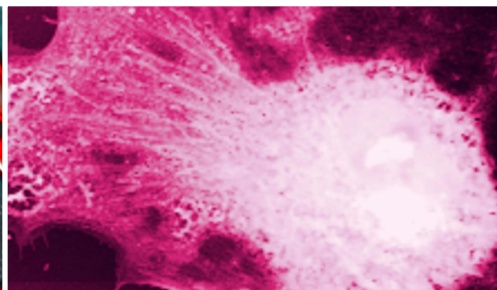
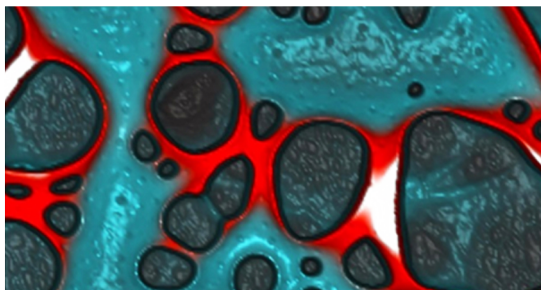
Атомно-силовой микроскоп
Dimension FastScan



Ванна Ленгмюра-Блоджетт



Наноиндентер Hysitron 750 Ubi





Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации №388 от 18.05.2009 г.

Учредитель:

Национальная академия наук Беларуси

Редакционный совет:

В.Г. Гусаков – председатель совета	А.И. Иванец
П.А. Витязь – зам. председателя	Н.С. Казак
С.А. Чижик – зам. председателя	А.В. Кильчевский
Ж.В. Комарова	Э.И. Коломиец
В.Ф. Байнев	С.А. Красный
О.Ю. Баранов	М.В. Мясникович
А.И. Белоус	О.Г. Пенязьков
В.Г. Богдан	Ф.П. Привалов
С.В. Гапоненко	С.П. Рубникович
В.Л. Гурский	О.О. Руммо
А.Е. Дайнеко	С.В. Харитончик
	И.П. Шейко
	А.Г. Шумилин
	С.С. Щербаков

Главный редактор:

Жанна Комарова

Ведущие рубрик:

Ирина Емельянович	Татьяна Жданович
Наталья Минакова	Юлия Василишина

Дизайн и верстка:

Татьяна Аверкова
Фото на обложке сгенерировано с помощью нейросети Kandinsky

Адрес редакции:

220072, г. Минск, ул. Академическая, 1-129.
Тел.: (017) 351-14-46,
e-mail: nii2003@mail.ru,
www.innosfera.belnauka.by

Подписные индексы:

007 532 (ведомственная)
007 53 (индивидуальная)
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Тираж 500 экз.
Цена договорная.
Подписано в печать 14.06.2024.

Издатель: РУП «Издательский дом «Беларуская навука». Свид. о гос. рег. №1/18 от 02.08.2013. г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40. Заказ № 118.

© «Наука и инновации»

При перепечатке и цитировании ссылка на журнал обязательна.
За содержание рекламных объявлений редакция ответственности не несет.
Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов статей.
Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Содержание

ОСВОБОЖДЕНИЕ. ХРОНИКА СОБЫТИЙ

Анатолий Криварот

Беларуская стратэгічная наступальная аперацыя «Баграціён»: дзень за днём

Завяршальны матэрыял сумеснага праекта часопіса «Навука і інавацыі» і Інстытута гісторыі НАН Беларусі «Освобождение. Хроника событий» раскрывает подрабязнасці адной з самых значных падчас Вялікай Айчыннай вайны аперацый – «Баграціён».

ТЕМА НОМЕРА: НАНОТЕХНОЛОГИИ

Наталья Минакова

Особенности научного поиска в наномасштабе

В интервью с первым заместителем Председателя Президиума НАН Беларуси, завлабораторией нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, академиком Сергеем Чижиком проанализирована область научных знаний, связанная с нанотехнологиями и наноматериалами, которая продолжает интересовать ученых, производителей, бизнесменов и экономистов как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Татьяна Кулагова, Никита Белько, Сергей Килин

Углеродные наноструктуры – перспективные наноматериалы для сенсорики и тераностики

Продемонстрированы преимущества тераностики – современного мультидисциплинарного биомедицинского подхода, сочетающего диагностику, терапию и мониторинг эффекта лечения преимущественно онкологических заболеваний.

Галина Мельникова, Александр Соломянский, Сергей Чижик

Технология «молекулярного дизайна» для создания покрытий различного функционального назначения

Представлены методы получения наноструктур на твердой поверхности путем целенаправленного изменения ее свойств на молекулярном уровне («снизу вверх») – одно из важнейших направлений фундаментальных и прикладных исследований как в Республике Беларусь, так и за ее пределами.

Алексей Труханов

Нанохимия и жизнь

Проанализированы пути дальнейшего развития и применения наноматериалов, демонстрирующих принципиально новые свойства, не наблюдаемые на макроскопическом уровне. Представлены достижения ученых из Института физико-органической химии НАН Беларуси и Института химии новых материалов НАН Беларуси в данной области.

Александр Ильющенко, Татьяна Талако, Андрей Лецко

Аддитивное производство металлических и керамических порошковых материалов

Показаны преимущества, ограничения и пути улучшения аддитивного производства металлических и керамических порошковых материалов, представлены основные этапы полного производственного цикла построения и основных параметров, определяющих структуру и свойства получаемых продуктов.

Василина Лапицкая

Путешествие в наномир: увидеть невидимое...

Проиллюстрировано, как высокоточные зондовые методы используются для описания структуры и свойств синтезированных новых материалов и помогают увидеть то, что не разглядеть человеческим глазом.

Владимир Макаревич

Эталонная база Республики Беларусь в области наноизмерений

41

Показано, как создание Национального эталона единицы длины – метра в нанометровом диапазоне позволило решить проблему метрологического обеспечения в сфере нанотехнологий.

Юлия Василишина

Ключ к нанопродвижению: от исследований до готовых решений

43

Интервью с академиком, основателем предприятия «Передовые исследования и технологии» Сергеем Жданком посвящено особенностям разработки и продвижения наноструктурированных материалов на рынок.

Жанна Комарова

Большие маленькие технологии

48

Дан обзор инновационных разработок и продуктов в различных отраслях экономики, созданных с применением нанотехнологий, показан их потенциал и риски, связанные с развитием нанонауки.

Ирина Емельянович

Медицина субмикронного уровня

55

Представлен обзор новейших мировых достижений в области наномедицины.

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРАКТИКИ АНАЛИЗА

Ирина Римашевская

Открывая «зеленые» окна

60

По материалам доклада ЮНКТАД представлена концепция создания новых или усовершенствованных товаров с минимальным углеродным следом, открывающих «зеленые» окна возможностей.

INVENTA MATHEMATICORUM

Валентин Гороховик

Без формул о математическом моделировании в теории потребления

66

Статья в рамках совместного проекта с Институтом математики НАН Беларуси, в которой доступно излагается суть механизмов и факторов, влияющих на формирование потребительских предпочтений на рынке товаров и услуг.

ДИССЕРТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Виктор Колесникович

Формализация объектов исследования и предпосылки для создания информационной многофакторной модели

72

Проработаны методы отраслевого управления, позволяющие обеспечить достоверное наполнение отраслевых баз знаний, которые служат источником информации, способной формировать модели, приближенные к человеческой логике, на базе опыта, фактов, правил (эвристики).

Светлана Разумова

Управление клиентским опытом в концепции маркетинга 4.0

78

Проанализированы проблемы применения концепции CEM в деятельности зарубежных и белорусских организаций, приведены данные исследований Adobe на данном рынке и результаты опроса отечественных специалистов.



СТР. 4



СТР. 28



СТР. 43



Беларуская стратэгічная наступальная аперацыя «Баграціён»: дзень за днём

23 чэрвеня – 28 ліпеня 1944 г.



Калона 9-й нямецкай арміі, разбітая
ударам з паветра непадалёк ад Бабруйска



Партызанскі парад у Мінску. 16 ліпеня 1944 г.



Анатоль Крыварот,
вядучы навуковы
супрацоўнік цэнтра
ваеннай гісторыі Беларусі
Інстытута гісторыі
НАН Беларусі, кандыдат
гістарычных навук,
дацэнт

Завяршальны матэрыял сумеснага праекта часопіса «Навука і інавацыі» і Інстытута гісторыі НАН Беларусі «Освобождение. Хроника событий», прысвечанага 80-годдзю вызвалення нашай краіны ад нямецка-фашысцкіх захопнікаў, раскрывае падрабязнасці адной з самых значных падчас Вялікай Айчыннай вайны аперацый – «Баграціён», якая складалася з двух этапаў.

Этап першы: ліквідацыя нямецкай абароны

Пачатак стратэгічнаму наступленню паклалі Віцебска-Аршанская і Магілёўская франтавыя аперацыі. Раніцай 23 чэрвеня 1944 г. галоўныя сілы 1-га Прыбалтыйскага, 3-га і 2-га Беларускага фронтоў (камандуючыя І.Х. Баграмян, Г.Ф. Захараў, І.Д. Чарняхоўскі) пасля магутнай артылерыйскай і авіяцыйнай падрыхтоўкі перайшлі ў наступленне на віцебскім, аршанскім і магілёўскім напрамках. На наступны дзень, 24 чэрвеня, разгарнулі наступленне на бабруйскім напрамку войскі правага крыла 1-га Беларускага фронту (камандуючы К.К. Ракасоўскі) [1].

Войскі 1-га Прыбалтыйскага фронту ва ўзаемадзеянні з 3-м Беларускім фронтам 25–28 чэрвеня падчас Віцебска-Аршанскай аперацыі акружылі і разграмілі віцебскую групіроўку ворага ў складзе 5 дывізіяў. У выніку баявых дзеянняў войскамі франтоў сумесна былі вызвалены Віцебск (26 чэрвеня) і Лепель (28 чэрвеня). У раёне Віцебска праціўнік страціў 20 тыс. чалавек забітымі і больш за 10 тыс. палоннымі [1, 2, 4, 5].

Ва ўпартых баях да 4 ліпеня 1944 г. часцямі і злучэннямі 1-га Прыбалтыйскага фронту былі вызвалены ад германскіх войск больш за тысячу населеных пунктаў і 12 раённых цэнтраў БССР, у тым ліку Чашнікі (27 чэрвеня), Ушачы (29 чэрвеня), Докшыцы (2 ліпеня), Глыбокае (3 ліпеня), Полацк (4 ліпеня). У раёне райцэнтра Ветрына 29 чэрвеня савецкімі войскамі была перарэзана чыгунка Полацк – Маладзечна. У вызваленні Полацка прымалі ўдзел часці і злучэнні 6-й гвардзейскай арміі, штаб якой узначальваў беларус – генерал В.А. Пянькоўскі, а таксама 119-я

стралковая дывізія пад камандаваннем ураджэнца Віцебшчыны генерала І.І. Харуна [1, 3, 4, 6, 7].

Войскі 3-га Беларускага фронту за тры дні наступлення прарвалі абарону немцаў у паласе шырынёй 100 км ад Заходняй Дзвіны да Дняпра, заглыбіліся ў баявыя парадкі немцаў на 30–50 км, у некалькіх месцах перарэзалі чыгунку Віцебск – Орша. У паласе 5-й арміі (камандуючы М.І. Крылоў) уведзеная ў прарыў конна-механізаваная група і стралковыя часці арміі 25 чэрвеня вызвалілі райцэнтры Багушэўск і Сянно, войскі 31-й арміі (камандуючы В.В. Глаголеў) 26 чэрвеня выбілі акупантаў з райцэнтра Дуброўна. У той самы дзень часці 3-га гвардзейскага танкавага корпуса авалодалі Талачыном [1, 4, 7].

Падчас правядзення Віцебска-Аршанскай аперацыі войскамі левага крыла 3-га Беларускага фронту быў ліквідаваны моцны вузел нямецкай абароны на ўсход ад Оршы, што дазволіла 27 чэрвеня часцям 11-й гвардзейскай (камандуючы К.М. Галіцкі) і 31-й армій вызваліць горад. У ворага былі захоплены 9 чыгуначных эшалонаў, 37 гармат, 19 танкаў і бронемашын, 161 трак-

тар, 1950 аўтамашын і цягачоў. Страты праціўніка забітымі склалі 1,2 тыс. Былі ўзяты ў палон больш за 100 салдат і афіцэраў [1, 5, 7]. Баявыя дзеянні наземных сіл у раёне Дуброўна і Оршы надзейна прыкрывалі з паветра лётчыкі 2-га знішчальнага авіяцыйнага корпуса пад камандаваннем беларуса – Героя Савецкага Саюза, генерал-лейтэнанта авіяцыі А.С. Благавешчанскага [1, 4, 5, 7].

Па стане на 27 чэрвеня 1944 г. у паласе наступлення фронту савецкія часці заглыбіліся ў абарону ворага на 115 км і пашырылі прарыў на 150 км, вызвалілі 1674 населеныя пункты, акружылі і поўнасю знішчылі 2 пяхотныя і 2 авіяпалявыя дывізіі, разграмілі 4 пяхотныя дывізіі, яшчэ 2 пяхотным і 1 ахоўнай дывізіям былі нанесены вялікія страты [5].

На наступны дзень пасля вызвалення Оршы перадавым падраздзяленнем 3-га гвардзейскага кавалерыйскага корпуса ўдалося фарсіраваць важны водны рубж – Беразіну – і захапіць плацдарм на заходнім беразе. Калі наступленне армій правага крыла і цэнтра 3-га Беларускага фронту разгортвалася даволі паспяхова, то прасоўванне



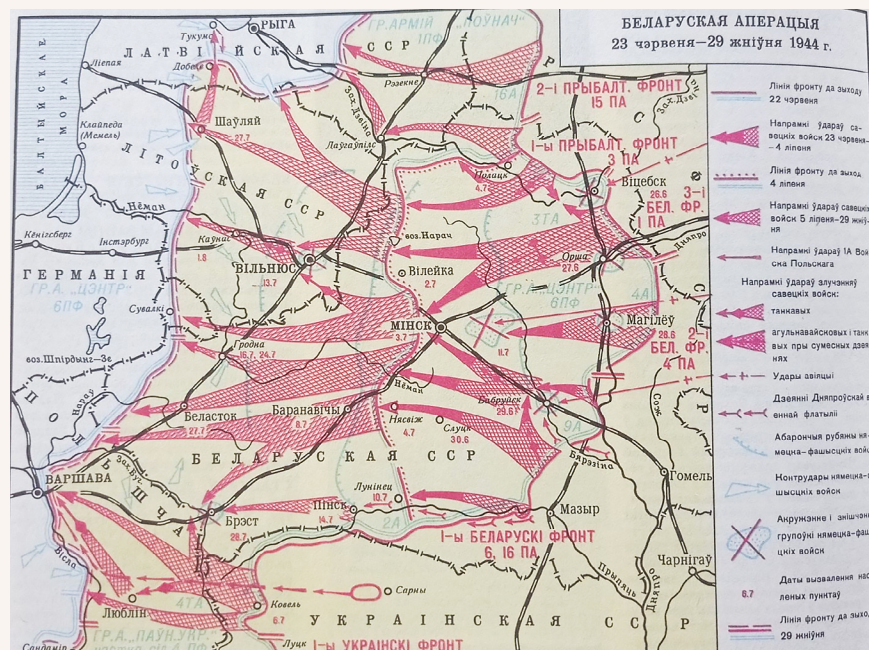
Камандуючы 1-м Беларускім фронтам генерал арміі К.К. Ракасоўскі ў першыя дні аперацыі «Баграціён»

левафланговых войск ажыццяўлялася з вялікімі цяжкасцямі, у тым ліку і з прычыны ўпартага супраціўлення гітлераўцаў, перад якімі была пастаўлена задача прыкрыцц адступлення магілёўскай групіроўкі [5].

Пераадольваючы моцную абарону праціўніка, войскі 3-га Беларускага фронту на завяршальным этапе Віцебска-Аршанскай аперацыі і пры разгортванні Мінскай вызвалілі абласны цэнтр Вілейка (2 ліпеня) і 9 райцэнтраў, у тым ліку Крупкі і Круглае (28 чэрвеня), Барысаў (1 ліпеня), Лагойск і Смалевічы (2 ліпеня). Савецкія войскі адсеклі 3-ю танкавую армію вермахта ад 4-й палявой арміі і перарэзалі чыгунку Мінск – Вільнюс. У баях па фарсіраванні Беразіны і вызваленні Барысава паспяхова дзейнічаў 25-ы танкавы корпус пад камандаваннем ураджэнца г. Дзяржынска Мінскай вобласці генерала Я.І. Фаміных, які быў уведзены ў прарыў 25 чэрвеня 1944 г. У гэтым жа раёне вызначылася 1-я гвардзейская Пралетарская, Маскоўска-Мінская стралковая дывізія ўраджэнца Барысава гвардыі палкоўніка П.Ф. Тоўсцікава [1, 4, 6].

Аб упартым супраціўленні нямецкіх войск у паласе наступлення 3-га Беларускага фронту сведчаць страты яго фарміраванняў з 23 чэрвеня і да канца месяца: 51 526 чалавек асабовага складу, у тым ліку 11 014 загінуўшых, 318 танкаў, 59 гармат і мінамётаў, 113 самалётаў [5].

У складзе 2-га Беларускага фронту 23 чэрвеня разгарнулі наступленне 33-я (камандуючы В.Д. Кручонкін), 49-я (камандуючы І.Ц. Грышын), 50-я (камандуючы І.В. Болдзін) і 4-я паветраная (камандуючы К.А. Вяршынін) арміі. Для развіцця прарыву абароны праціўніка была створана франтавая рухомая



Беларуская аперацыя 23 чэрвеня – 28 ліпеня 1944 г.

група пад камандаваннем генерала А.А. Цюрына. Галоўны ўдар у напрамку Магілёва наносілі часці і злучэнні 49-й арміі, якія ва ўмовах жорсткага супраціўлення немцаў паслядоўна фарсіравалі рэкі Проня і Бася. Пасля ўпартых баёў войскі фронту 26 чэрвеня прарвалі абарону на рацэ Рэста. У той самы дзень 49-я армія дасягнула Дняпра на поўнач ад Магілёва, і яе перадавыя часці фарсіравалі раку і захапілі плацдарм на заходнім беразе. Раніцай 27 чэрвеня падраздзяленні франтавой рухомай групы пераправіліся праз Днепр і абышлі Магілёў з паўднёвага захаду і захаду, чым адрэзалі шляхі адыходу праціўніка. На наступны дзень войскі фронту завяршылі фарсіраванне Дняпра. Шэсць спробаў ворага вырвацца з Магілёва былі спынены савецкімі войскамі. Пасля штурму спецыяльна створанымі групамі рэшткі нямецкага гарнізона ў 18 гадзін 28 чэрвеня спынілі супраціўленне і склалі зброю. У вызваленні г. Чавусы, акружэнні і знішчэнні

групіроўкі немцаў у раёне Магілёва ўдзельнічаў 38-ы стралковы корпус пад камандаваннем генерала А.Д. Церашкова, беларуса. У баях за Магілёў немцы панеслі адчувальныя страты ў жывой сіле, тэхніцы і ўзбраенні: больш за 6 тыс. забітымі, 3,4 тыс. палоннымі, 70 танкаў і штурмавых гармат, больш за 200 гармат і мінамётаў, 840 аўтамашын [1, 4, 5].

У час правядзення Магілёўскай аперацыі войскі 2-га Беларускага фронту вызвалілі абласны і 4 раённыя цэнтры: Чавусы (25 чэрвеня), Горкі (26), Шклоў (27), Быхаў (28), сотні вёсак і пасёлкаў [1, 4, 5, 7].

У Мінскай аперацыі 2-гі Беларускі фронт сваімі актыўнымі дзеяннямі пазбавіў немцаў магчымасці адарвацца і арганізавана адысці да Беразіны, скаваў сілы праціўніка і стварыў спрыяльныя ўмовы для наступлення непасрэдна на сталіцу БССР. Пры пераследзе ворага, які адступаў, часці і злучэнні фронту 29 чэрвеня фарсіравалі Друць і 2 ліпеня Беразіну, вызвалілі райцэнтры

Бялынічы (29 чэрвеня), Чэрвень (2 ліпеня), Беразіно (3 ліпеня). Воіны 33-й арміі пры разгроме групіроўкі ворага ў раёне в. Жукавец ліквідавалі 2500 нямецкіх салдат і афіцэраў, з якіх 500 патанула ў Беразіне, захапілі 17 танкаў, 20 самаходных гармат, 52 мінамёты, 120 палявых гармат, 1500 аўтамашын [1, 4–6].

Нягледзячы на ўпартае супраціўленне 9-й і 4-й армій вермахта, у цэлым паспяхова разгортвалася распачатае 24 чэрвеня наступленне правага крыла 1-га Беларускага фронту. Тут былі нанесены ўдары з раёна Рагачова ў напрамку Бабруйск – Асіповічы і з раёна на поўдзень ад пасёлка Парычы (вызвалены 26 чэрвеня) у бок Бабруйска – Слуцка. За 6 дзён войскі правага крыла 1-га Беларускага фронту акружылі і разграмілі сіламі 48, 65, 16-й паветраных армій, авіяцыі дальняга дзеяння 40-тысячную бабруйскую групіроўку вермахта ў складзе 6 дывізій і 29 чэрвеня авалодалі Бабруйскам. У акружэнні і ліквідацыі бабруйскай групіроўкі ворага актыўна ўдзельнічала 1-я брыгада рачных караблёў Дняпроўскай ваеннай флатыліі. У выніку былі разбіты галоўныя сілы 9-й нямецкай арміі, знішчана да 50 тыс. гітлераўскіх салдат і афіцэраў, узята ў палон больш за 23 тыс. акупантаў, падбіты і захоплены 366 танкаў, больш за 5 тыс. гармат і мінамётаў. Пры вызваленні горада вызначыліся часці і злучэнні корпусаў пад камандаваннем ураджэнцаў Беларусі генералаў В.К. Урбановіча і А.З. Каравацкага, 399-я стралковая дывізія генерала Д.В. Казакевіча, таксама беларуса [1, 4, 7, 8].

Галоўныя сілы 1-га Беларускага фронту яшчэ да завяршэння разгрому бабруйскай групіроўкі ворага развілі наступленне на Мінск і Слуцк. Часці і

злучэнні 28-й арміі (камандуючы А.А. Лучынскі) і конна-механізаванай групы (камандзір І.А. Пліеў) пры прасоўванні на захад паслядоўна вызвалілі райцэнтры Глуск і Акцябрскі (27 чэрвеня), Старыя Дарогі (28 чэрвеня), Любань і Слуцк (30 чэрвеня), Капыль (1 ліпеня). У баях па вызваленні Слуцка адзначыліся воіны 3-га гвардзейскага стралковага корпуса пад камандаваннем генерала Ф.І. Перхаровіча, беларуса. Частка сіл 3-й (камандуючы А.В. Гарбатаў) і 65-й (камандуючы П.І. Батаў) армій пры наступленні на мінскім напрамку 28 чэрвеня авалодалі райцэнтрам Клічаў, горадам і буйным чыгуначным цэнтрам Асіповічы [1, 4, 7].

Да канца чэрвеня 1944 г. у выніку моцных удараў чатырох франтоў Чырвонай Арміі група нямецкіх армій «Цэнтр» апынулася ў катастрофічным становішчы. Абодва флангі групіроўкі былі абыдзены войскамі 3-га і 1-га Беларускіх франтоў. Пасля авалодання 2 ліпеня часцямі 48-й арміі і конна-механізаванай групы станцыямі Стоўбцы і Гарадзья была перарэзана чыгуначная лінія Мінск – Баранавічы, што пазбавіла асноўныя сілы ворага магчымасці мець чыгуначную сувязь з Баранавічамі і Брэстам. Такім чынам, склаліся спрыяльныя ўмовы для вызвалення Мінска [4, 5, 7].

Вызваленне сталіцы

Выгнанне акупантаў з Мінска мела выключнае значэнне для далейшага прасоўвання савецкіх войск. Гарнізон праціўніка ў горадзе складаўся з 3 пяхотных і 1 танкавай дывізіі, 3 палкоў СС і розных спецпадраздзяленняў. Вызваленне Мінска пачалося раніцай 3 ліпеня, калі ў горад з паўночнага ўсходу ўварваўся пера-

давы атрад 2-й гвардыі Тацынскага танкавага корпуса. Затым з поўначы да Мінска падышлі перадавыя часці 5-й гвардзейскай танкавай арміі. Танкістаў падтрымлівалі 11-я гвардзейская і 31-я арміі 3-га Беларускага фронту, якія таксама ўвайшлі ў горад. У сярэдзіне дня 3 ліпеня з паўднёвага ўсходу ў Мінск увайшлі войскі правага крыла 1-га Беларускага фронту (1-ы гвардзейскі Данскі танкавы корпус і часці 3-й арміі), якія на сваім шляху разбілі групіроўку ворага ў раёне Пухавічаў. На ўсходзе ад Мінска гітлераўскія фарміраванні не мелі магчымасці адарвацца ад войск 2-га Беларускага фронту і вялі баі на Беразіне [4, 5–8].

Да зыходу дня 3 ліпеня войскі 3-га і 1-га Беларускіх франтоў ачысцілі сталіцу БССР ад нямецкіх войскаў. Злучэнне ў горадзе і на захад ад яго войск гэтых франтоў завяршыла акружэнне ўсёй мінскай групіроўкі ворага. У катле на ўсход ад Мінска апынуліся асноўныя сілы 4-й, часткі 3-й танкавай і 9-й армій вермахта, якія мелі ў сваім складзе звыш 105 тыс. салдат і афіцэраў [4–6].

Вынікам першага этапу аперацыі «Баграціён» стала нанясенне цяжкага паражэння нямецкай групе армій «Цэнтр». Абарона германскіх войскаў была перарвана ў паласе шырынёй 400 км. За гэты час войскі 1-га Прыбалтыйскага, 3, 2 і правага крыла 1-га Беларускага франтоў прайшлі з цяжкімі баямі ў заходнім напрамку на глыбіню 225–280 км і вызвалілі больш за палову тэрыторыі Беларусі.

Узятыя ў акружэнне на ўсход ад Мінска нямецкія войскі спрабавалі арганізаваць прарыв у абыход горада з поўначы і поўдня ў агульным напрамку на Баранавічы. Для прарыву акружэння ў заходнім кірунку з асабовага складу разбітых дывізій былі створаны

баявыя групы. Рашэннем Стаўкі ВГК задача па ліквідацыі праціўніка была ўскладзена на войскі 2-га Беларускага фронту. Выдзеленыя для гэтага 33-я армія, частка сіл 49-й і 50-й армій пры актыўным удзеле фарміраванняў беларускіх партызан ва ўпартых баях з 5 па 13 ліпеня разграмілі рэшткі 4-й і 9-й армій вермахта. 7 ліпеня вораг прадпрыняў адчайную спробу ўварвацца ў Мінск. Буйной групіроўцы гітлераўцаў удалося захапіць аэрадром, пранікнуць у горад у раёне Тэатра оперы і балета. У такой сітуацыі Беларускі штаб партызанскага руху 5 ліпеня загадаў часова прыпыніць расфарміраванне партызанскіх брыгад і атрадаў у вызваленых ад акупантаў раёнах і накіраваць іх у Мінск. На працягу 8 і 9 ліпеня ў ваколіцы сталіцы было сцягнута да 17 партызанскіх брыгад, многія з якіх адразу прыступілі да ліквідацыі варожых груп. Партызаны ўзялі пад ахову ўрадавыя будынкі, заводы, аэрадром і іншыя аб'екты. Больш за 15 баёў правялі партызаны з 8 да 13 ліпеня ў ваколіцах Мінска, разграмілі каля 10 батальёнаў і рот акупантаў, знішчылі, па розных звестках, ад некалькіх сотняў да больш за тысячу гітлераўцаў і звыш 2 тысяч узялі ў палон [3, 4, 9].

Па звестках штабоў 2-га Беларускага фронту і яго армій, у баях з праціўнікам, узятым у «кацёл», было забіта 72 500 салдат і афіцэраў, разбіта 950 гармат і мінамёты, звыш 1,5 тыс. аўтамашын, узяты ў палон 35 743 нямецкія салдаты і афіцэры, з якіх 12 генералаў, у тым ліку 3 камандзіры корпуса і 6 камандзіраў дывізій. Савецкія войскі захапілі 550 гармат і мінамётаў, 900 аўтамашын, шмат складоў з ваенным рыштункам [2, 5, 6].

У гонар вызвалення Мінска 16 ліпеня на тэрыторыі былога іпадрома адбыўся мітынг працоўных і партызан з удзелам дэлегацый

войнаў 3-га Беларускага фронту і працоўных г. Горкага. Пасля мітынгу адбыўся парад больш як 30 тыс. партызан [4, 9, 10].

Этап другі: рух у заходнім напрамку

Пасля вызвалення Мінска і завяршэння першага этапу аперацыі «Баграціён», у адпаведнасці з указаннямі Стаўкі ВГК, савецкія войскі прыступілі да ажыццяўлення другога этапу і правялі 5 франтавых наступальных аперацый. Задача 1-га Прыбалтыйскага і 3-га Беларускага франтоў палягала ў тым, каб разграміць войскі вермахта ў Літве і Латвіі і адсекчы групу армій «Поўнач» ад астатніх групіровак праціўніка. Для зрыву наступлення 1-га Прыбалтыйскага і трох Беларускіх франтоў германскае камандаванне перакінула ў паласу іх дзеянняў дадатковыя сілы з групы армій «Поўнач», «Паўночная Украіна», «Паўднёвая Украіна», з Нарвегіі, Германіі, Венгрыі, Польшчы. Войскі 1-га Прыбалтыйскага фронту падчас наступлення ў агульным напрамку на Шаўляй паслядоўна вызвалілі беларускія райцэнтры: Паставы (5 ліпеня), Браслаў (6), Відзы (8) [4–7].

У наступальных дзеяннях 3-га Беларускага фронту на Вільнюс і Ліду савецкія войскі вызвалілі ад акупантаў 5 ліпеня Маладзечна, Свір, Смаргонь, райцэнтры Валожын, Івянец і перамысціліся за дзень на 14–20 км. У далейшых баях на тэрыторыі Беларусі ў межах Вільнюскай аперацыі часці і злучэнні 3-га Беларускага фронту авалодалі Ашмянамі і Іўем (8 ліпеня), Лідай (9), Радунню (11) [4, 6, 7].

Адразу пасля завяршэння Мінскай аперацыі асноўныя сілы 2-га Беларускага фронту без апэратыўнай паўзы сталі

рухацца ў заходнім напрамку. Часці і злучэнні 49-й арміі 7 ліпеня вызвалілі Дзяржынск, а 8 ліпеня войскі 3-й арміі і армейскі рухомы атрад 50-й арміі авалодалі Карэлічамі і Навагрудкам. Захоўваючы высокія тэмпы наступлення, войскі фронту за наступныя 5 дзён, нягледзячы на ўпартае супраціўленне немцаў, фарсіравалі тры водныя рубяжы і прасунуліся на захад на 120–125 км. За гэты перыяд былі адбіты ў ворага райцэнтры Зэльва, Скідаль (12 ліпеня), Масты, Шчучын (13), Ваўкавыск (14). Часці і злучэнні 50-й арміі, уведзеныя ў аперацыю 10 ліпеня, за 6 дзён баёў выйшлі на мяжу рэк Свіслач і сярэдняга цячэння Нёмана, фарсіравалі водныя перашкоды і 16 ліпеня сумесна з 31-й арміяй 3-га Беларускага фронту вызвалілі асноўную частку Гродна [4, 6, 7].

Найбольш жорсткія баі адбываліся ў раёне Гродна і райцэнтра Свіслач, куды гітлераўскае камандаванне здолела падцягнуць да 10 дывізій. Тут супраціўленне праціўніка было зламана 23–24 ліпеня, што дало магчымасць сілам 2-га і 3-га Беларускіх франтоў 24 ліпеня поўнасцю вызваліць Гродна, а часцям і злучэнням 3-й арміі 27 ліпеня авалодаць буйным прамысловым цэнтрам і важным траспартным вузлом – г. Беластокам. У выніку Беластоцкай аперацыі войскі 2-га Беларускага фронту з 5 па 27 ліпеня прайшлі з баямі больш за 300 км і выйшлі на подступы да граніцы Усходняй Прусіі. Савецкія воіны вызвалілі каля 30 тыс. км² тэрыторыі і сотні населеных пунктаў, разграмілі 3 пяхотныя і 1 танкавую дывізіі. Акрамя таго, 4 пяхотным і 2 танкавым дывізіям, 2 брыгадам, паліцэйскай групе «Готберг» са складу 4-й нямецкай арміі былі нанесены вялікія страты ў баявой тэхніцы, розных

матэрыяльных сродках і людзях – з 1 па 31 ліпеня 1944 г. забіта 9812 нямецкіх салдат і афіцэраў [2, 4–7].

Яшчэ да завяршэння першага этапу аперацыі «Баграціён» арміі правага крыла 1-га Беларускага фронту выйшлі да важнага транспартнага вузла – г. Баранавічы. У сувязі з тым, што ў першых эшалонах стралковых карпусоў меліся абмежаваныя сілы і сродкі, з ходу горад узяць не ўдалося. Падчас наступлення на баранавіцка-брэсцкім напрамку часці 28-й арміі і конна-механізаванай групы І.А. Пліева 5 ліпеня вызвалілі Ляхавічы – населены пункт, які немцы ператварылі ў моцны пункт абароны. Баранавічы былі раптоўна атакаваны ноччу 8 ліпеня злучэннямі 65-й і 28-й армій з розных напрамкаў, і нямецкія часці былі вымушаны пакінуць горад. Пры пераследзе праціўніка савецкія войскі захапілі плацдармы каля Слоніма і 10 ліпеня цалкам ачысцілі горад, авалодалі райцэнтрам Быцень, а 12 ліпеня вызвалілі Ружаны [4–8].

Адначасова з рухам галоўных сіл правага крыла 1-га Беларускага фронту на Баранавічы, Слонім, Ружаны войскі 61-й арміі ва ўзаемадзеянні з Дняпроўскай ваеннай флатыліяй, партызанскімі злучэннямі Палескай і Пінскай абласцей, аператыўнай групай умацаваных раёнаў і 55-й стралковай дывізіяй 28-й арміі развівалі наступ па паўночным беразе рэк Прыпяць, Гарынь і Стыр. Пераадольваючы ўпартую абарону праціўніка і шматлікія водныя перашкоды, савецкія воіны за кароткі час вызвалілі райцэнтры Тураў (5 ліпеня), Жыткавічы (6), Ганцавічы і Столін (7), Лунінец (10). Разгром праціўніка ў раёне Баранавіч, дзе паспяхова дзейнічаў 3-ці гвардзейскі стралковы корпус пад камандаваннем генерала Ф.І. Перхаровіча, і на рубяжы р. Шчара



Савецкія танкісты на вуліцах вызваленага Магілёва. 28 чэрвеня 1944 г

стварыў пагрозу для Пінскай групіроўкі, якая была вымушана пачаць адыход. Гэта паскорыла рух 61-й арміі ўздоўж паўночнага берага Прыпяці, у выніку чаго яе часці і злучэнні ва ўзаемадзеянні з караблямі Дняпроўскай рачной ваеннай флатыліі да раніцы 14 ліпеня 1944 г. зламалі супраціўленне гарнізона ў Пінску. Такім чынам, германскае камандаванне страціла добра ўмацаваны пункт на кобрынска-брэсцкім напрамку і важнейшы транспартны вузел [4–6, 8].

Войскі правага флангу 1-га Беларускага фронту за 12 дзён другога этапу аперацыі «Баграціён» прасунуліся на 150–170 км і значна палепшылі сваё аператыўнае становішча – працягласць яго лініі скарацілася практычна ўдвая. 17 ліпеня лінія размежавання праходзіла на захад ад райцэнтра Свіслач (вызвалены 17 ліпеня) і Відамлі, на ўсход ад Кобрына і на захад ад Драгічына (вызвалены 17 ліпеня) і да Ковеля [4–6, 8].

Частка акупіраванай тэрыторыі на поўначы Беларусі была вызвалена войскамі 2-га Прыбалтыйскага фронту (камандуючы А.І. Яроменка). Падчас Рэжыцка-Дзвінскай наступальнай аперацыі (10–27 ліпеня) вой-

скі 4-й ударнай арміі (камандуючы П.Ф. Малышаў) 12 ліпеня авалодалі райцэнтрамі Дрыса (Верхнядзвінск) і Расоны, 17 ліпеня – Асвея [4, 6, 7].

Вызваленне усёй тэрыторыі Беларусі

Завяршальны этап вызвалення Беларусі адбываўся ў Люблін-Брэсцкай аперацыі (18 ліпеня – 2 жніўня 1944 г.). З першых дзён яе разгортвання, нягледзячы на моцнае супраціўленне гітлераўцаў, савецкія войскі паслядоўна вызвалілі населеныя пункты і сціскалі акружэнне вакол Брэста. Ужо да зыходу 18 ліпеня злучэнні 48-й і 65-й армій вызвалілі г.п. Антонаполь і кантралявалі транспартныя вузлы – Свіслач і Гайнаўку. Пасля заняцця 18 ліпеня райцэнтра Жабінка часцям і злучэнням 28-й арміі на наступны дзень давялося адбіць 12 контратак гітлераўцаў. Пры наступленні ў напрамку Брэста 61-я армія, прарваўшы абарону праціўніка па р. Мухавец, раніцай 20 ліпеня авалодала буйным транспартным вузлом – г. Кобрынам, а 23 ліпеня заняла Дамачава за 45 км на поўдзень ад Брэста [3, 4].

Акружэнне брэсцкай групіроўкі акупантаў пачалі і злучэнні 65-й арміі, якія выйшлі 21 ліпеня да р. Заходні Буг і пасля яе фарсіравання захапілі плацдарм. Войскам арміі ў раёне населеных пунктаў Высокае і Кляшчэлі давялося дзейнічаць ва ўмовах моцнага супрацьдзеяння нямецкіх пяхотных часцей, якія 22 ліпеня пры падтрымцы да 85 танкаў і штурмавых гармат перайшлі ў наступленне. 23–26 ліпеня ў гэтым раёне адбываліся напружаныя баі. У контрудары супраць групіроўкі праціўніка ў складзе 5 дывізій (2 з якіх танкавыя) разам з войскамі 65-й арміі ўдзельнічалі злучэнні 48-й арміі і стралковы корпус 28-й арміі. За дзень баёў 25 ліпеня толькі войскі 65-й арміі падбілі 38 танкаў, знішчылі звыш 1300 салдат і афіцэраў [3, 4].

Пры прасоўванні на іншых напрамках войскі 28-й і 70-й армій 27 ліпеня выйшлі да рэк Лясная і Заходні Буг і тым самым завяршылі акружэнне варожых сіл у раёне Брэста. Нямецкія і венгерскія фарміраванні, якія імкнуліся любой цаной вырвацца з акружэння, на працягу 28 ліпеня зрабілі больш за 50 атак сіламі пяхоты з танкамі і штурмавымі гарматамі. Адбіўшы ўсе контрудары праціўніка, войскі 28-й і 70-й армій сумесна з 9 гвардзейскім стралковым корпусам 61-й арміі спачатку рассеклі брэсцкую групіроўку ворага, а затым штурмам авалодалі горадам і ўмацаваным раёнам. У гэты ж дзень часці 34-й гвардзейскай і 152-й стралковых дывізій 28-й арміі авалодалі г. Высокае. Такім чынам, 28 ліпеня 1944 г. у выніку Люблін-Брэсцкай аперацыі было завершана вызваленне Чырвонай Арміяй усёй цяперашняй тэрыторыі Беларусі [3, 4, 6, 7].

Аперацыя «Баграціён» паводле замыслу, маштабаў, эфектывасці і значнасці займае аса-

блівае месца ў Вялікай Айчыннай і Другой сусветнай войнах. Была павержана адна з наймацнейшых групіровак вермахта – група войск «Цэнтр». Разгром гітлераўскіх захопнікаў меў вялікае значэнне для вызвалення Прыбалтыкі, Заходняй Украіны, Польшчы і стварыў спрыяльныя ўмовы для далейшага наступлення Чырвонай Арміі на тэрыторыю Германіі [3, 4, 10].

Падчас гэтай аперацыі вялізную дапамогу савецкім войскам аказалі партызаны, падпольшчыкі і насельніцтва Беларусі. У першыя дні наступлення франтоў дыверсійныя групы партызанскіх фарміраванняў падарвалі 20 тыс. рээк, а толькі з 26 па 29 чэрвеня – 147 воінскіх эшалонаў. На рахунку народных мсціўцаў – 8 разбураных чыгуначных мастоў. Пасля першых удараў партызан поўнасю спыніўся рух на многіх чыгуначных лініях, з-за чаго пры адступленні нямецкае камандаванне не мела магчымасці ў дастатковай меры выкарыстоўваць транспарт для перакідвання рэзерваў і эвакуацыі сваіх часцей і тылоў. Партызаны таксама захоплівалі чыгуначныя станцыі (Будслаў, Гудагай, Княгінін, Парахонск і інш.) і ўтрымлівалі іх да прыходу Чырвонай Арміі [3, 4, 10].

Партызанскія фарміраванні ў месцах сваёй дыслакацыі бралі пад кантроль участкі шашэйных і грунтовых дарог, знішчалі жывую сілу і тэхніку падраздзяленняў, якія адступалі, разбівалі штабы, гарнізоны. Партызаны захапілі і пабудавалі новыя масты і пераправы праз рэкі Друць, Пціч, Случ, Бярэзіну, Нёман, указвалі часцям Чырвонай Арміі найбольш бяспечныя і зручныя шляхі руху, рамантавалі дарогі, забяспечвалі часці і падраздзяленні Чырвонай Арміі праваднікамі і разведвальнымі дадзенымі аб групіроўках і рубя-

жах абароны нямецкіх войск. Брыгады і атрады ратавалі насельніцтва ад знішчэння, а гарады і вёскі ад разбурэння і спалення, стойка ўтрымлівалі буйныя партызанскія зоны, праз якія спрабавалі прабівацца нямецкія войскі. Усяго ў баях з нямецка-фашысцкімі захопнікамі ў час іх адступлення партызаны знішчылі больш за 15 тыс. і ўзялі у палон больш за 17 тыс. акупантаў [3, 4, 10].

Партызанскія фарміраванні сумесна з савецкімі часцямі вызвалялі Мінск, абласныя цэнтры Вілейку і Пінск, 35 райцэнтраў. Астравец, Відзы, Івянец, Ілля, Капыль, Куранец, Карэлічы, Любча, Рудзенск, Свір, Старобін, Узда былі вызвалены брыгадамі і атрадамі самастойна і ўтрымліваліся да прыходу Чырвонай Арміі [3, 4, 10].

Па меры вызвалення тэрыторыі Беларусі каля 600 тыс. жыхароў рэспублікі, з якіх больш за 180 тыс. партызан – байцоў і камандзіраў прызыўнога ўзросту, уліліся ў шэрагі Чырвонай Арміі [3].

СПІС ВЫКАРЫСТАНЫХ КРЫНІЦ

1. Великая Отечественная война – день за днем (по материалам рассекреченных оперативных сводок Генерального штаба Красной Армии). Т. 7. – М., 2010.
2. История Второй мировой войны 1939–1945. В 12 т. Т. 9. – М., 1978.
3. Ваенная энцыклапедыя Беларусі. – Мінск, 2010.
4. Беларусь у Вялікай Айчыннай вайне, 1941–1945: энцыклапедыя. – Мінск, 1990.
5. Великая Отечественная война 1941–1945 годов. В 12 т. Т. 4. Освобождение территории СССР. 1944 год. – М., 2012.
6. Великая Отечественная война – день за днем (по материалам рассекреченных сводок Генерального штаба Красной Армии). Т. 8. – М., 2010.
7. Освобождение городов: справочник по освобождению городов в период Великой Отечественной войны. – М., 1985.
8. Рокоссовский К.К. Солдатский долг // К.К. Рокоссовский. – Минск, 1984.
9. Калинин П.З. Партизанская республика / П.З. Калинин. 3-е изд. – Минск, 1968.
10. Всенародная борьба в Белоруссии против немецко-фашистских захватчиков в годы Великой Отечественной войны: в 3 т. – Минск, 1983–1985. Т. 3. – 1985.



Особенности научного поиска в наномасштабе

Нанотехнологии и наноматериалы продолжают интересовать ученых, производителей, бизнесменов и экономистов как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Об этом — наш разговор с первым заместителем Председателя Президиума НАН Беларуси, заведующим лабораторией нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, академиком Сергеем Чижиком.

– Интерес к нанотехнологиям действительно не ослабевает, хотя накал темы уже не столь впечатляющий. В научной сфере широко используют междисциплинарные знания, которые позволяют разрабатывать материалы и технологии для реализации в наномасштабе. Если обратиться к истории, то впервые заговорили о нанотехнологиях в 1959 г. Американский физик-теоретик Ричард Фейнман на ежегодном собрании физического общества в Калифорнийском технологическом институте произнес сакраментальную фразу: «Там, внизу, полно места!» – предрекая большое будущее нанотехнологий. Ученый утверждал, что нет никаких физических препятствий для того, чтобы в производстве манипулировать размерами молекулярно-атомарного масштаба. Считается, что перелом наступил в 1980–1982 гг., когда физиками Гердом Биннигом и Генрихом Рорером в научно-исследовательской лаборатории IBM в Цюрихе был изобретен сканирующий туннельный микроскоп. Прибор позволил визуализировать атомы, и главное – продемонстрировать возможность их контролируемого перемещения с помощью зонда: из нескольких десятков атомов была

выстроена надпись «IBM». Через 5 лет – а это необыкновенно короткий срок для осознания научным сообществом высочайшей ценности открытия – эти ученые получили Нобелевскую премию по физике.

Спустя 10 лет труды по нанотехнологиям следовали уже один за другим, а сама область стала невероятно популярной. Массово появлялись сообщества и организации с приставкой нано- в названии. Вначале это был несколько раздутый бум. Под ажиотажный интерес можно было добыть средства. Но и сегодня обществу необходимо объяснять, что же такое нанотехнологии, то есть технологии «снизу-вверх», когда продукт возникает в результате молекулярной сборки. Яркие примеры мы можем найти в окружающей нас природе. Как, например, возникают листья на деревьях? Вроде как ниоткуда и без особых усилий. Необходимые питательные вещества в молекулярных объемах поступают из почвы, воздуха, воды, энергия получается путем фотосинтеза, когда преобразуется энергия солнца в химическую. По сути, трудятся миллиарды наномашин, собирая атомы и молекулы в нужных комбинациях и создавая биомассу в огромных объемах.

И это самоуправляемый процесс: на дубе появляются дубовые листья, на березе – березовые, естественно, благодаря программе-инструкции, записанной в молекуле ДНК. Человек мечтал бы овладеть подобными безотходными и энергоэффективными технологиями. Но пока нам еще очень далеко до того, чтобы реализовать нанотехнологии по природному алгоритму.

Многое уже, конечно, получается. Ученые овладевают секретами наноинженерии, находя и используя факторы самоорганизации материи на наномасштабном уровне. Таким образом создаются наночастицы различных веществ, тонкие пленки и нанопокрывтия в современном материаловедении, лекарства и микроудобрения целевой доставки и др.

Например, ученые обнаружили, что с помощью углеродных нанотрубок можно преобразовать свойства субстанции. Но это не потому, что, создавая таким образом композиции, мы армируем материал. Благодаря включению в его состав нанообъектов инициируются изменения во взаимодействии между молекулами вещества. Частицы наноразмера, обладающие избыточной поверхностной энергией, становятся центрами роста кристаллов. Достаточно всего одной тысячной доли вещества, чтобы кристаллическая решетка трансформировалась, а, следовательно, существенно изменилась структура и улучшились эксплуатационные характеристики материала.

Можно привести примеры достижений в области нанотехнологий в мире и в нашей стране? Каковы перспективы использования методов прямого «выращивания» изделий?

– Нанотехнологии проникли в материаловедение, электронику, медицину, биотехнологии, стали неотъемлемой частью разработок в разных отраслях экономики. В Беларуси несколько десятилетий ведутся исследования в данной сфере. Функционируют лаборатории, нацеленные на изучение наноструктур. На рынке есть компании, которые создают необходимый объем углеродного наноматериала для последующего его применения. Пример тому – новые композиционные материалы, модифицированный бетон, инновационные материалы в дорожных покрытиях.

В свое время мы разработали белорусский вариант атомно-силового микроскопа, что подстегнуло исследования в области нанотехнологий и развитие наноиндустрии. Открылись возможности визуализировать и измерить рельеф, структуру и локаль-

ные физико-механические свойства поверхностных слоев с нанометровым разрешением. Несмотря на то, что это было более 20 лет назад, приборы работают, выполняя свои функции, востребованы и поставлялись во многие страны.

В агросекторе активно применяют уникальную разработку Института физико-органической химии и Института экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича – удобрение Наноплант. В чем его секрет и сила? Содержащиеся наноразмерные частицы соединений микроэлементов – железа, меди, кобальт, селен и другие, полученные путем синтеза, за счет сверхмалых размеров легко проникают сквозь мембрану клетки растения, не задерживаясь при этом транспортные белки, что очень экономно и эффективно. Небольшой объем концентрата позволяет подкормить гектары посевов, к тому же препарат безвреден и разрешен к применению в сельском хозяйстве, что подтверждено Европейским экологическим сертификатом.

В фарминдустрии появились препараты с целевой доставкой. И пусть сегодня их перечень не так широк, как хотелось бы, но это дело ближайшего будущего.

Самый яркий пример использования нанотехнологий – современная электроника. Сегодня мы активно пользуемся изделиями, предназначенными для облегчения и усовершенствования нашей жизни – электронными девайсами и гаджетами. Их чипы имеют топологию менее 10 нанометров, а ведущие компании в области микроэлектроники уже заявляют о том, что выходят на 5 нм и даже 3 нм, а это, по существу, лишь несколько атомов. Не будь такой концентрации транзисторов в одном чипе, наши мобильники были бы размером с чемодан и с гораздо более слабыми функциями. Что же касается Беларуси, то у нас есть такое предприятие, как ОАО «Планар», выпускающее уникальное сверхточное оборудование для производства в электронике, которое по ряду операций переходит в нанометровый диапазон. ОАО «Интеграл», производящий электронные чипы, пока находится в субмикронном диапазоне. Сложно встать на один уровень с мировыми лидерами в производстве элементов электроники, но отечественные предприятия, тем не менее, занимают свою нишу в микроэлектронике, а движение в направлении наноразмерного технологического диапазона будет продолжаться.

С удовлетворением можно констатировать, что в системе Госстандарта, в БелГИМ создана лаборатория, необходимая для сертификации оборудования, приобретены тестовые образцы для калибровки

приборов, работающих в наномасштабе. Имеется современная метрологическая база, которую хотелось бы использовать более активно.

Чтобы объединить усилия предприятий и институтов, которые работают в сфере нанотехнологий, 11 лет назад была создана Республиканская ассоциация наноиндустрии (РАНИ). Кто туда входит и помогает ли эта структура ученым в их работе?

– В ассоциации свыше 20 белорусских организаций. Среди них научные академические институты, ведущие университеты, промышленные компании и предприятия – Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Институт биоорганической химии НАН Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, БГУИР, БНТУ, БГУ, предприятия ООО «Изовак», ОАО «Оптоэлектронные системы» и др.

Ими выполнено большое количество исследований, разработаны инновационные материалы (сверхтвердые, тугоплавкие и композиционные наноматериалы, резины, фильтрационные мембраны, микроудобрения, катализаторы, фармацевтические препараты, смазочные материалы и бетоны с нанодобавками и др.), сенсоры различного назначения. Благодаря таким разработкам мы можем наглядно видеть, как ничтожно малые добавки наночастиц обуславливают уникальные потребительские свойства изделий и продуктов, что в итоге может приносить ощутимый экономический эффект. Исследования в этой области и далее будут нацелены на создание технологических процессов получения и использования наноструктурных материалов, разработку и изготовление измерительных приборов и устройств для контроля на наноуровне.

В настоящее время ученые заняты подготовкой Словаря «Наноматериалы и нанотехнологии», Каталога высокотехнологичного оборудования, имеющегося в Беларуси, которое может использоваться при разработке нанотехнологий. Мы планируем сформировать Центр коллективного пользования таким оборудованием, чтобы к нему имели доступ все участники РАНИ. Разумеется, главная сила такого центра – люди. Закупить уникальное оборудование, не имея профессионалов, которые глубоко понимают особенности его использования – значит нерационально использовать средства. Именно поэтому так важна роль Ассоциации, деятельность которой нацелена не только на материальное обеспечение исследова-

ний, но и на подготовку высококвалифицированных специалистов. Здесь мы рассчитываем и на собственные силы, и на профильные кафедры вузов, призванные готовить кадры для нанотехнологической области, которых, к слову, немало.

Часто нанотехнологии сравнивают с аддитивными. Чем обусловлен возрастающий интерес к последним? Почему проводятся параллели между этими понятиями?

– В общепринятой производственной практике используется подход «сверху-вниз»: берется материал и от него отделяется лишнее, при этом тратится колоссальная энергия, производится огромное количество отходов, и в результате получается необходимое изделие металлообработки. То же изделие можно создавать и «снизу-вверх». Олицетворение аддитивных технологий – 3D-принтеры. Принцип их работы – добавляя небольшое количество материала, создавать законченный объект. Это одна и та же парадигма, сходная с нанотехнологиями «снизу-вверх», именно поэтому между нано- и аддитивными технологиями проводится параллель. Для нас важно нащупать возможность уникальных решений. К примеру, сделать полимерное изделие с магнитными добавками, использовать наноструктурные полимеры, печатать детали на 3D-принтере не только пластиком, но и металлом или керамикой, работать с биочернилами, содержащими живые клетки. В последнем случае напечатанное изделие является «живым», что поможет решать многие медицинские проблемы, в том числе и такую важную, как изнашивание хрящевой ткани в суставах. Если создать «живую заплатку», содержащую клетки пациента, и поставить ее на поврежденный участок хряща, можно избежать травматичной операции по установке искусственных суставов. Работа над этим идет, и через некоторое время все станет реальностью.

Применение подхода 3D-печати может рассматриваться как возможность реализации нанотехнологий путем манипулирования нано- и микрообъемами материалов. Реализация таких технологий с перемещением на микроуровень возможна с использованием, например, сканирующих зондовых микроскопов, в том числе с применением многозондовых моделей.

Можно заключить, что наноиндустрия остается перспективной, активно развивающейся областью, без которой невозможно представить будущее мировой науки и экономики. ■

Наталья МИНАКОВА



Татьяна Кулагова,
заведующая сектором
биофизических
исследований лаборатории
наноэлектромагнетизма
Института ядерных
проблем БГУ, кандидат
биологических наук,
доцент



Никита Белько,
младший научный
сотрудник Центра
«Квантовая оптика и
квантовая информатика» Института
физики
им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси



Сергей Килин,
заведующий Центром
«Квантовая оптика и
квантовая информатика»
Института физики
им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси, академик,
профессор, иностранный
член РАН

Углеродные наноструктуры — перспективные наноматериалы для сенсорики и тераностики

Тераностика — современный мультидисциплинарный биомедицинский подход, сочетающий диагностику, терапию и мониторинг эффекта лечения преимущественно онкологических заболеваний. Комплексное решение терапевтических и диагностических проблем осуществляется путем создания сложных фармацевтических композиций и/или наноструктур, которые можно использовать в комплексе с лекарственными веществами, — тераностических агентов. С одной стороны, они должны специфически накапливаться в поврежденных и/или опухолевых клетках, предоставлять исследователю возможность для диагностики и направленной управляемой (адресной) визуализируемой доставки его. Тераностический агент может содержать в структуре специфический лиганд для опухолевых клеток, должен обладать флуоресцентными или магнитными свойствами для визуализации и детектирования его накопления. С другой стороны, тераностический агент либо должен иметь модифицируемую поверхность для внедрения функциональных групп и функционализации лекарственными препаратами, либо обладать свойствами, активация которых под действием ультразвука, электромагнитного излучения, температуры и прочих видов воздействия приведет к гибели клеток [1].

Перспективными тераностическими агентами являются углеродные наноструктуры (УНС), включающие углеродные точки (УТ), фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ), наноалмазы, углерод-луковичные структуры [2]. УТ представляют собой нульмерные квазисферические углеродные наночастицы с размерами 2–10 нм, состоящие как из sp^2 -, так и из sp^3 -гибридизированных атомов углерода, и в зависимости от структуры подразделяются на графеновые квантовые точки (ГКТ), углеродные квантовые точки и углеродсодержащие полимерные точки. Фуллерены – это молекулы в виде выпуклых замкнутых многогранников из атомов углерода, гибридизация которых находится между sp^2 - и sp^3 -состояниями. Наноалмазы содержат алмазное ядро из sp^3 -гибридизованного углерода, которое окружено оболочкой из других аллотропных модификаций углерода (sp^2 -, аморфного) и функциональных групп. УНТ представляют собой аллотропную модификацию углерода в состоянии sp^2 -гибридизации в виде свернутых в трубку плоскостей графена. Углерод-луковичные структуры – это вложенные друг в друга углеродные сферы (многослойный фуллерен).

УНС, обладающие высоким соотношением площади поверхности к объему, обычно имеют поверхностные дефекты, неоднородности и функциональные группы, которые являются сайтами для функционализации лигандами (рис. 1). Ковалентная модификация углеродных наноструктур различными группами позволяет придавать им гидрофобные/гидрофильные свойства, способствующие перераспределению УНС между различными органеллами внутри опухолевых клеток и селективному их накоплению, что снижает степень токсичности данных структур по отношению к здоровым клеткам и тканям. Делокализованные π -связи на поверхности УНТ, ГКТ, окисленного графена и наличие полостей у фуллеренов и УНТ содействует нековалентному взаимодействию и комплексообразованию с фармакологическими веществами [3]. При этом на поверхности графеноподобной структуры можно эффективно иммобилизовать ДНК, ферменты, антитела, лиганды к рецепторам, химиотерапевтические препараты. Возникающие полости могут являться контейнерами для хранения и изолирования радионуклидов и токсичных атомов металлов. Так, фуллерены могут быть использованы для внедрения

ионов металлов в их структуру (например, Gd^{3+}), выступать в роли контрастных агентов для МРТ и применяться в ядерной медицине [4].

Функционализация УНС фармакологическими препаратами улучшает фармакодинамику лекарств. Установлено, что время циркуляции комплексов одностенных УНТ с противоопухолевыми препаратами в крови значительно превышает время циркуляции самого противоопухолевого препарата, что может способствовать более длительному воздействию лекарства на опухолевые клетки и увеличению его концентрации в них [5].

УНС обладает уникальными оптическими характеристиками для визуализации их в биосистемах методами флуоресцентной микроскопии и микроскопии комбинационного рассеяния (рис. 2).

Углеродные точки интенсивно флуоресцируют во всем видимом спектральном диапазоне. При этом длины волн возбуждения и флуоресценции, время жизни возбужденного состояния, интенсивность и квантовый выход люминесценции зависят от методов синтеза, используемых углеродных прекурсоров, размера, количества поверхностных дефектов и легирования углеродного ядра УТ атомами бора, азота, серы, фосфора, кремния, числа сопряженных π -электронов, а также от функциональных групп на их поверхности [6]. Показано, что при изменении параметров синтеза из одних и тех же прекурсоров можно получить УТ с максимумами люминесценции в диапазоне от 430 нм



Рис. 1. Функционализация УНС

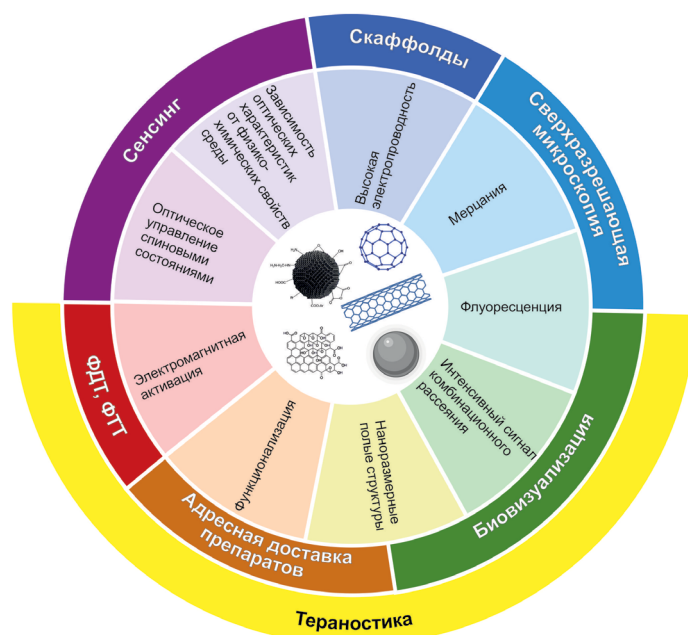


Рис. 2. Свойства УНС

до 630 нм за счет вариации латерального размера и количества поверхностных функциональных –COOH-групп. Квантовый выход люминесценции УТ достигал 52,6%, 35,1% и 12,9% в синей, зеленой и красной областях видимого диапазона соответственно. Гидротермальным методом синтеза можно получить УТ с кислородсодержащими группами, такими как гидроксильные (–ОН), карбоксильные (–COOH), эпоксидные (–COC–) и т.д., что улучшает растворимость УТ в воде [7].

Благодаря своим размерам углеродные точки хорошо накапливаются в опухолевых клетках и визуализируются. Их взаимодействию посвящены многочисленные работы. Выявлено, что УТ, функционализированные аспарагиновой кислотой, накапливаются и визуализируются в клетках глиомы С6. Исследование таких структур *in vivo* подтверждает селективную локализацию наночастиц в тканях глиомы по сравнению с нормальной тканью головного мозга. Нами изучалось накопление в клетках крови графеновых квантовых точек. Показано, что они эффективно концентрируются в нейтрофилах [8], на поверхности эритроцитов [9] и тромбоцитов. Выявлена биodeградация ГКТ с сопряженным ослаблением сигнала флуоресценции в присутствии генерируемой нейтрофилами хлорноватистой кислоты [8].

Благодаря высокой чувствительности флуоресценции УТ к параметрам внешней среды они используются при разработке сенсоров молекул

(тетрациклина, сазасульфapiидина, метиленового синего), ионов (Fe^{3+} , Hg^{2+} , Cr^{6+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Ag^{+}), pH-сенсоров и сенсоров температуры вне- и внутриклеточной жидкости [3, 9, 10]. При взаимодействии с различными аналитами или при изменении физико-химических параметров среды наблюдаются изменения спектральных свойств УТ. Показано, что группы –NH и –ОН на поверхности УТ связываются Fe^{3+} с образованием хелатных комплексов железа, которые тушат флуоресценцию. Добавление O_2^- приводит к восстановлению Fe^{3+} до Fe^{2+} и флуоресценции УТ [11].

Попытки применения углеродных точек в качестве сенсоров pH и агентов для pH-управляемой доставки лекарственных веществ описаны в нескольких работах. В работе [12] синтезированы модифицированные УТ, которые изменяют конформацию в кислой среде опухолевых клеток (pH 6,5–6,9), высвобождая при этом терапевтические агенты. Показано, что, когда значение pH среды увеличивается, поверхностный заряд N-допированных УТ превращается из положительного в отрицательный за счет ионизации amino-, карбоксильных и гидроксильных групп.

Углеродные точки перспективны для разработки редокс-сенсоров [11, 13]. Сенсор на основе УТ для определения H_2O_2 по механизму фотоиндуцированного переноса электрона был изготовлен группой Zhang. Поверхность УТ была ковалентно функционализирована дифенилфосфином, который является донором электронов для УТ и тушит флуоресценцию. При взаимодействии с H_2O_2 дифенилфосфин окисляется, флуоресценция УТ регистрируется. В работе [14] были исследованы комплексы УТ с доксорубицином в качестве системы доставки лекарств с визуальным контролем. Интенсивность флуоресценции углеродных точек уменьшалась после локализации доксорубина, после высвобождения его с поверхности УТ она восстанавливалась [14].

Следует отметить, что для применения УНС с целью визуализации их накопления в клетках и тканях предпочтительны наноструктуры, имеющие поглощение в диапазоне оптической «прозрачности» биологических тканей – 650–1350 нм. Например, в работе [15] использовались ГКТ, легированные азотом и бором, с излучением в ближней ИК-области и максимумом около 1000 нм.

Среди УНС особой химической инертностью и фотостабильностью отличаются наноалмазы [16]. Матрица sp^3 -гибридизованного углерода не обладает флуоресценцией, однако создаваемые в микро- и наноалмазах центры окраски позволяют полу-

чить флуоресцентные наночастицы. Нейтральные азот-вакансии (NV^0), отрицательно заряженные азот-вакансии (NV^-) и вакансии с химическими элементами IV группы (Si, Ge, Sn и Pb) в центрах окраски перспективны для флуоресцентной визуализации, оптической магнитометрии [17, 18], квантовых компьютеров [19].

Центры окраски в алмазах наиболее перспективны для точного измерения температуры на наноуровне. Наиболее изученные и широко применяемые – азото-замещенные вакансии (NV^0 и NV^- -центры). Однако исследование температурно-зависимого сдвига частоты спинового резонанса NV -центров требует применения микроволнового излучения, которое приводит к дополнительному нежелательному нагреву образца. Центры окраски с исчезающе малыми постоянными дипольными моментами, такие как GeV (германий-вакансия) и SiV (кремний-вакансия), обладают узкими яркими бесфонными линиями (602 нм для GeV и 740 нм для SiV), что позволяет измерять температурные эффекты без использования микроволновых полей. В работе [20] с помощью нейроморфного оптоволоконного зонда с торцевым наноалмазом с GeV-центрами было проведено полностью оптическое измерение температуры мозга свободно перемещающихся мышей с точностью до 0,1 °C. Используя биосовместимые алмазные монокристаллические микроиглы, обогащенные NV/SiV-центрами окраски, в [21] был продемонстрирован полностью оптический мониторинг температуры *in vitro* в физиологически значимом диапазоне (25–55 °C). Одновременное обнаружение флуоресценции NV- и SiV-центров позволяет осуществлять двухполосную визуализацию живых клеток в сочетании с измерением температуры [21].

Одно из перспективных направлений применения УНС в биомедицине – сверхразрешающая микроскопия (SRM). Многие ее модальности требуют от флуорофоров мерцаний – многократных переходов между излучающими и неизлучающими состояниями при отсутствии необратимого фотообесцвечивания. Мерцания полупроводниковых квантовых точек описаны во многих работах и позволили успешно использовать такие наноматериалы для SRM. В то же время полупроводниковые квантовые точки демонстрируют существенные недостатки с точки зрения биомедицинских применений, в особенности выраженную токсичность и сложность синтеза и функционализации. УНТ, напротив, не обладают данными недостатками, однако закономерности их мерцания пока мало изу-

чены. Во многих литературных источниках сообщается о высокой фотостабильности УТ и ГКТ, однако в наших предыдущих работах было продемонстрировано быстрое фотообесцвечивание ГКТ в различных микроокружениях, включая мембраны эритроцитов [22, 23]. В некоторых работах показано, что УТ и ГКТ могут мерцать за счет процессов переноса электрона между наночастицей и окружением [24]. Также существуют малочисленные примеры успешного применения таких наноматериалов для SRM [22, 24].

Наноалмазы с центрами окраски превосходят обычно используемые флуоресцентные метки и красители для SRM. Это связано с тем, что, несмотря на гораздо меньший квантовый выход фотолюминесценции и меньшее сечение поглощения, высокая фотостабильность этих центров окраски без мерцания совместима с длительными временами накопления [3], что улучшает пространственное разрешение при визуализации.

УНС имеют интенсивные линии в спектре комбинационного рассеяния (КР) света. Спектры КР УНС чувствительны к их структурной организации, и по их характеристикам можно определять появление дефектов и модификаций в структуре наноматериала при комплексообразовании с лекарственными препаратами и биodeградации. Сигнал КР УНС может применяться для исследования их локализации в клетке [25]. Например, вследствие малых размеров УНТ их небольшие скопления очень трудно зарегистрировать с помощью флуоресцентной конфокальной микроскопии. Однако, анализируя спектры КР клеток после взаимодействия с наноматериалом, можно выявлять внутриклеточное накопление и распределение УНТ [25–27]. Нековалентная модификация УНТ сохраняет собственную sp^2 -гибридизованную структуру стенки нанотрубки и предпочтительна для исследований методом КР-света. Следует отметить, что полосы КР, относящиеся к клеточным структурам, имеют низкую интенсивность по сравнению с сигналом от УНТ. Одним из современных направлений в изучении механизмов накопления и метаболизма УНТ в живых клетках является применение машинного обучения для анализа большого массива спектров КР. Так, в нашей работе было продемонстрировано применение кластеризации K-средних и анализа главных компонент (PCA – *principal component analysis*) спектров для разделения сигналов от УНТ и клеточных компонент [28].

Фотофизические свойства УНС позволяют использовать их в качестве фотосенсибилизатора

(ФС) для фототермической терапии (ФТТ) и/или фотодинамической терапии (ФДТ). УНТ, поглощая излучение в ближней ИК-области (700–1100 нм), эффективно преобразует его в теплоту, приводя к разрушению накопившихся УНТ опухолевых клеток за счет локального повышения температуры. Большой коэффициент поглощения при достаточно невысоком квантовом выходе люминесценции и образования $^1\text{O}_2$ при применении УТ свидетельствует о том, что при действии электромагнитного излучения большая часть энергии тратится на безызлучательную релаксацию и приводит к повышению температуры среды. Следовательно, УТ более перспективны для ФТТ. Многими авторами отмечается, что квантовый выход генерации синглетного кислорода с использованием УТ не так высок, как с применением молекулярных ФС. Поэтому исследуются УТ в качестве носителей ФС и антенн для сбора и передачи энергии оптического излучения на молекулярный ФС. УТ, активные в ИК-области, посредством двухфотонного механизма возбуждения могут одновременно обеспечивать интенсивную флуоресценцию, генерировать $^1\text{O}_2$ и проявлять фототермический эффект. Нами показано, что ГКТ, накапливаясь в мембранах эритроцитов, при воздействии излучения видимого диапазона индуцируют гемолиз, обусловленный фотохимическими и фотодинамическими эффектами [9].

Хорошо поглощающие нано- и микроstructures при импульсном высокоэнергетичном облучении способствуют формированию акустической волны в среде и могут использоваться для фотоакустической (ФА) визуализации. УТ, легированные серой и азотом, высокоэффективны для ФТТ на моделях мышей (эффективность преобразования 59%) и могут легко определяться благодаря фотолюминесценции и ФА-визуализации при низкой плотности мощности излучения ($0,8 \text{ Вт/см}^2$) [30].

Нами показано, что УНТ, накопленные в клетках в виде агломератов, при импульсном высокоэнергетичном облучении способствуют формированию акустической волны, в результате чего образуются области с $\Delta P \sim 0,7 \text{ МПа}$, достаточным для разрыва биологических мембран и повреждения клеток. Мы подтвердили это предположение экспериментально [31].

УНТ, ГКТ и графен обладают высокой электропроводностью и при добавлении к диэлектрическим материалам снижают электрическое сопротивление в них. Такие УНС могут быть использованы в качестве каркасного материала и проводящих функциональных поверхностей в инженерии клеточных тка-

ней, особенно нервной, а также для создания на их основе биосенсоров. Нами показано, что при действии электрического поля на клетки глиомы крысы линии С6 ускоряются процессы транспорта и внутриклеточного накопления УНТ [27].

Таким образом, УНС могут применяться не только как терапевтические препараты (например, для термической абляции опухолевых клеток и адресной доставки препаратов), но и одновременно для визуализации их распределения в клетках, отслеживания динамики накопления и определения локальных концентраций.

Важным ограничением применения наноматериалов в медицине является отсутствие стандартизации, что затрудняет сравнение данных различных исследований и продвижение нанотехнологий. В доклинических исследованиях с наноматериалами для получения надежных и воспроизводимых данных необходимо стандартизировать (учесть) следующие аспекты экспериментальных протоколов:

- *производство наноматериалов: очистка от побочных продуктов синтеза, получение стабильной суспензии, функционализация;*
- *структурная и спектральная характеристика наноматериалов, физико-химические процессы в системах, содержащих наноматериалы, при внешнем воздействии (электромагнитного излучения, ультразвука и др.);*
- *оценка биосовместимости наноматериалов: подбор оптимальных клеточных культур (использование 2D- и 3D-моделей) и концентраций наноматериалов, выявление механизмов внутриклеточного накопления и распределения наноматериалов;*
- *изучение клеточных культур, накопивших наноматериалы, после внешнего воздействия: оценка цитотоксичности несколькими методами, механизмов повреждения и гибели клеток;*
- *исследования на животных: индуцирование заболевания (привитие опухоли), целенаправленное накопление наноматериалов, осуществление внешнего воздействия, оценка состояния организма и патологических клеток-мишеней до и после него;*
- *изучение механизмов элиминации наноматериалов после разрушения клеток-мишеней: биодеградация первых или экскреция из организма.*

Таким образом, в мировой научной практике ведется постоянный поиск новых лекарственных веществ для тераностики. УНС – перспективные соединения, которые могут применяться для созда-

ния агентов, обеспечивающих управляемую визуализируемую доставку лекарственных средств, а также способных под действием электромагнитного излучения регистрировать и менять физико-химические параметры среды (редокс-состояние, температуру, давление), индуцируя гибель опухолевых клеток. Актуальной является разработка точных протоколов синтеза УНС с заданными параметрами и возможностью функционализации. Необходимо исследовать механизмы взаимодействия УНС с клеточными и молекулярными компонентами крови, опухолевыми клетками. При этом актуально привлечение методов машинного обучения и нейрон-

ных сетей для анализа пространственного и временного распределения и поведения УНС в биосистемах. Применение электромагнитного излучения к живым системам, накопившим наноматериалы, требует тщательного предварительного анализа для учета фототермического, фотодинамического, фототермоакустического, фотоакустического и других возможных эффектов.

Проведение междисциплинарных систематических исследований УНС и их использование в терапии и биосенсорике позволит разработать на их основе инновационные биомедицинские агенты и тест-системы. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Smart Nanomaterials in Cancer Theranostics: Challenges and Opportunities / B.K. Kashyap [et al.] // ACS Omega. 2023. Vol. 8, №16. P. 14290–14320.
- Patel K.D. Carbon-based nanomaterials as an emerging platform for theranostics / K.D. Patel, R.K. Singh, H.W. Kim // Materials Horizons. 2019. Vol. 6. P. 434–469.
- Speranza G. Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications / G. Speranza // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, No 4. P. 967.
- Large Metal Ions in a Relatively Small Fullerene Cage: The Structure of Gd₃N@C₂(22010)-C₇₈ Departs from the Isolated Pentagon Rule / C.M. Beavers [et al.] // Journal of American Chemical Society. 2009. Vol. 131. P. 11519–11524.
- Circulation and long-term fate of functionalized biocompatible single-walled carbon nanotubes in mice probed by Raman spectroscopy / Z. Liu [et al.] // PNAS. 2008. Vol. 105. P. 1410–1415.
- Carbon dots for in vivo bioimaging and theranostics / J. Du [et al.] // Small. 2019. Vol. 15, №32. P. 1805087.
- Synthesis of carbon dots with multiple color emission by controlled graphitization and surface functionalization / X. Miao [et al.] // Advanced Materials. 2018. Vol. 30. P. 1704740.
- Visualizing hypochlorous acid production by human neutrophils with fluorescent graphene quantum dots / L. Golubewa [et al.] // Nanotechnology. 2022. Vol. 33, №9. P. 095101.
- Photostability and phototoxicity of graphene quantum dots interacting with red blood cells / T. Kulahava [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2023. Vol. 248. P. 112800.
- Herbal medicine derived carbon dots: synthesis and applications in therapeutics, bioimaging and sensing / Luo [et al.] // Journal of Nanobiotechnology. 2021. Vol. 19, №320.
- Superoxide anion turns on the fluorescence of carbon dots-ferric complex for sensing / J. Yue [et al.] // Microchemical Journal. 2021. Vol. 168, №106412.
- pH-responsible fluorescent carbon nanoparticles for tumor selective theranostics via pH-turn on/off fluorescence and photothermal effect in vivo and in vitro / E.B. Kang [et al.] // Nanoscale. 2018. Vol. 10. P. 2512–2523.
- Near-infrared chemiluminescent carbon nanodots and their application in reactive oxygen species bioimaging / C.L. Shen [et al.] // Advanced Science. 2020. Vol. 7, №1903525.
- Highly fluorescent carbon dots for visible sensing of doxorubicin release based on efficient nanosurface energy transfer / B.B. Wang [et al.] // Biotechnology Letters. 2016. Vol. 38, №1. P. 191–201.
- Nitrogen and boron dual-doped graphene quantum dots for near-infrared second window imaging and photothermal therapy / H. Wang [et al.] // Applied Materials Today. 2019. Vol. 14. P.108–117.
- Single-molecule scale magnetic resonance spectroscopy using quantum diamond sensors / J. Du [et al.] // Reviews of Modern Physics. 2024. Vol. 96, № 2. P. 025001.
- Векторная магнитометрия с помощью одиночного комплекса NV – ¹³C в алмазе / А.П. Низовцев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. Т. 89, №6. С. 807–814.
- Wrachtrup, J. Quantum computation using the ¹³C nuclear spins near the single NV defect center in diamond / J. Wrachtrup, S.Y. Kilin, A.P. Nizovtsev // Optics and Spectroscopy. 2001. Vol. 91. P. 429–437.
- Pezzagna, S. Quantum computer based on color centers in diamond / S. Pezzagna, J. Meijer // Applied Physics Reviews. 2021. Vol. 8, №1. P. 011308.
- All-optical brain thermometry in freely moving animals / I.V. Fedotov, M.A. Solotnikov, M.S. Pochechuev, O.I. Ivashkina, S.Ya. Kilin, K.V. Anokhin, A.M. Zheltikov // ACS Photonics. 2020. Vol. 7, №12. P. 3353–3360.
- All-optical thermometry with NV and SiV color centers in biocompatible diamond microneedles / L. Golubewa [et al.] // Advanced Optical Materials. 2022. Vol. 10. P. 2200631.
- Hysteresis and Stochastic Fluorescence by Aggregated Ensembles of Graphene Quantum Dots / N. Belko [et al.] // Journal of Physical Chemistry C. 2022. Vol. 126, №25. P. 10469–10477.
- Single-photon spectroscopy and emission statistics of graphene quantum dots in organic structures / N.V. Belko [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. 2023. Vol. 90. P. 316–324.
- Super-resolution optical fluctuation bio-imaging with dual-color carbon nanodots / A.M. Chizhik [et al.] // Nano letters. 2016. Vol. 16, №1. P. 237–242.
- Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа распределения углеродных нанотрубок в клетках / Е.Н. Голубева [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85, №6. С. 999–1005.
- Rapid and delayed effects of single-walled carbon nanotubes in glioma cells / L.N. Golubewa [et al.] // Nanotechnology 2021. Vol. 32, №50. P. 505103.
- Enhancement of single-walled carbon nanotube accumulation in glioma cells exposed to low-strength electric field: Promising approach in cancer nanotherapy / L. Golubewa [et al.] // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2020. Vol. 529, №3. P. 647–651.
- Golubewa L. Specificity of carbon nanotube accumulation and distribution in cancer cells revealed by K-means clustering and principal component analysis of Raman spectra / L. Golubewa, I. Timoshchenko, T. Kulahava // Analyst. 2024. Vol. 149, №9. P. 2680–2696.
- In vivo near-infrared mediated tumor destruction by photothermal effect of carbon nanotubes / H. K. Moon [et al.] // ACS Nano. 2009. Vol. 3, №11. P. 3707–3713.
- In vivo theranostics with near-infrared-emitting carbon dots—highly efficient photothermal therapy based on passive targeting after intravenous administration / X. Bao [et al.] // Light: Science and Applications. 2018. Vol. 7, №1. P. 91.
- Single-walled carbon nanotubes as a photo-thermoacoustic cancer theranostics agent: theory and proof of the concept experiment / L. Golubewa [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. P. 22174.



Галина Мельникова,
старший научный
сотрудник лаборатории
нанопроцессов и
технологий Института
тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси, кандидат
технических наук, доцент



Александр Соломянский,
ведущий научный
сотрудник
лаборатории микро- и
наноструктурированных
систем Института химии
новых материалов
НАН Беларуси, кандидат
химических наук, доцент



Сергей Чижик,
завлабораторией
нанопроцессов и технологий
Института тепло- и
массообмена им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси, академик

Технология «молекулярного дизайна» для создания покрытий различного функционального назначения

Накопленный опыт, обширные новые знания в области материаловедения позволяют создавать перспективные структуры и покрытия с новыми уникальными свойствами. Разработка методов получения наноструктур на твердой поверхности путем целенаправленного изменения ее свойств на молекулярном уровне («снизу вверх») – одно из важнейших направлений фундаментальных и прикладных исследований как в Республике Беларусь, так и за ее пределами. Совершенствуются методики формирования органических и неорганических композиционных, многослойных покрытий на твердой поверхности, такие как физическое и химическое осаждение из газовой фазы, лазерная наплавка, электростатическое напыление, послойное осаждение, метод центрифугирования (спин-коатинг) и др.

Одна из перспективных задач – научиться создавать наноконпози́ты, встраивая органические и/или биоорганические молекулы в различные упорядоченные матрицы в качестве новых функциональных элементов, в частности для распознавания изо-

бражений, определения запахов («искусственный нос»), звуковых и химических сигналов, то есть для разработки различных сенсоров, в качестве преобразователей сигналов в информационных системах (биокомпьютеры) и для многих других целей.

Наиболее привлекательной технологией для получения покрытий с прогнозируемой структурой, а также тонких мономолекулярных слоев является метод Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ), или технология «молекулярного дизайна» – простой, но мощный инструмент, позволяющий встраивать в монослой различные молекулы и молекулярные комплексы, в том числе и биологически активные. Он представляет собой симбиоз науки и искусства: исследователь создает новые уникальные «картины» (структуры), смешивая «краски» (составы растворов) в различном соотношении и «прижимая кисть с различными усилиями» (поверхностное давление формирования пленок). Уникальность и перспективность ЛБ – в возможности получать одно- и многослойные покрытия на поверхности материалов раз-

личного функционального назначения с заданной структурой и толщиной в нано- и субмикронном диапазоне.

Основной принцип метода заключается в одно- или многократном пропускании пластины, на которой необходимо получить пленку ЛБ, сквозь предварительно сформированный на водной поверхности слой молекул, имеющих гидрофильную полярную группу («гидрофильную голову») и гидрофобную неполярную часть («гидрофобный хвост») – так называемый ленгмюровский слой амфифильных молекул (рис. 1). Для его получения на поверхность воды (субфазы) наносят определенный объем раствора амфифильного вещества в легколетучем растворителе, после испарения которого на водной поверхности образуется двумерный «газообразный» слой. При уменьшении площади с помощью подвижных барьеров происходит упорядочение и ориентация молекул в ленгмюровском слое, в результате чего он последовательно претерпевает различные двумерные фазовые состояния: от газообразного (G) до твердого (S).

Пример изменения плотности пленки поливинилпиридина на кремниевых подложках при различных поверхностных давлениях выделения моно слоя ЛБ (π) представлен на рис. 2.

История развития способов формирования моно- и мультимолекулярных покрытий ЛБ отсчитывается с 1744 г. Бенджамин Франклин, экспериментируя с масляными пленками на поверхности воды, установил, что толщина такой пленки составляет не более десятка нанометров. В 1882 г. Агнесс Поккельс провела серию опытов по выявлению влияния различных веществ на поверхностное натяжение воды, положив

начало исследованиям в этой области. В 1890 г. лорд Рэлей повторил эксперимент Франклина, показав, что слой масла на поверхности воды имеет толщину в одну молекулу. В 1917 г. Ирвинг Ленгмюр, развивая представления о строении мономолекулярных адсорбционных слоев на поверхности жидкостей, показал, что разреженные монослои обладают свойствами двумерного газа, а в насыщенных монослоях молекулы ориентированы в зависимости от полярности их концевых групп, что в ряде случаев позволяет установить их строение, форму и размеры. В 1932 г. он удостоен Нобелевской премии «за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений».

В 1919 г. его ученица Кэтрин Блоджетт разработала метод полу-

чения моно- и полимолекулярных слоев на стеклянных и металлических поверхностях. Используя его, в 1925 г. Гортен и Грендель предсказали двухслойную структуру мембраны биологической клетки, в 1965 г. Кун Ханс использовал данную технологию для создания супрамолекулярных систем. В 1982 г. прошла первая конференция, посвященная достижениям в области создания и применения пленок Ленгмюра – Блоджетт. В 1991 г. появился микроскоп Брюстера для изучения тонких пленок на жидкой поверхности (рис. 3).

Пленки ЛБ находят практическое применение в различных областях науки и техники: электроника (наноитография; изолирующие и проводящие ультратонкие пленки; туннельные диэлектрики; матрицы, содержащие полупроводниковые

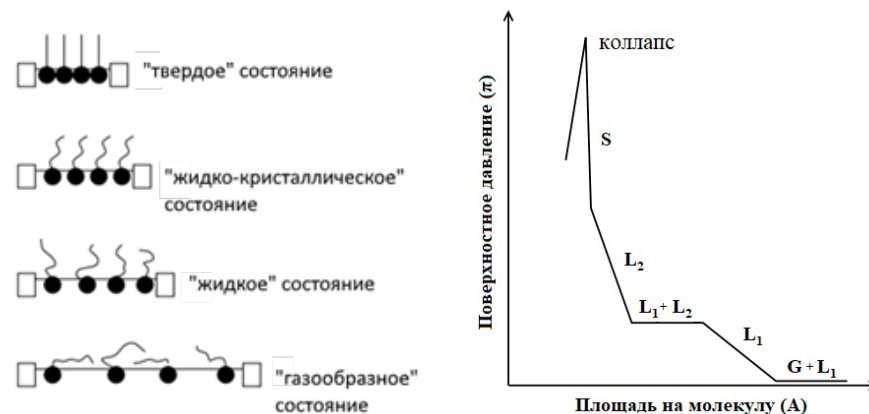


Рис. 1. Формирование ленгмюровского слоя

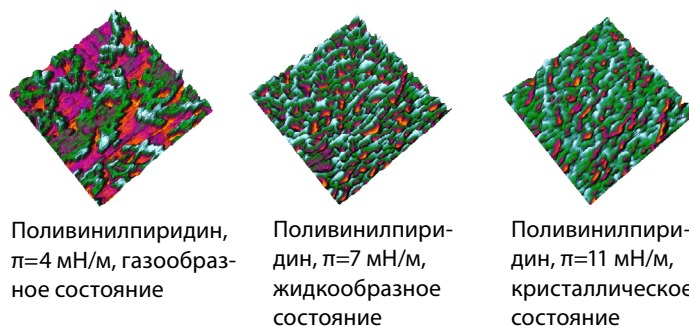


Рис. 2. Пленка поливинилпиридина на кремниевых подложках при различных поверхностных давлениях выделения моно слоя ЛБ (π)

наночастицы; для создания ультратонких слоев оксидов металлов; как элементная база молекулярной электроники; пассивирующие и защитные покрытия), оптика (активные слои для записи информации; фотохромные и просветляющие покрытия; интерференционные и поляризационные светофильтры; плоские моно- и полимодовые световоды; удвоители частот; барьерные слои в фотодиодах), микромеханика (антифрикционные покрытия для прецизионных узлов трения), прикладная химия (химия поверхностных явлений; катализ; фильтрация и обратный осмос мембран; адгезия), биосенсоры и датчики (электронные и электрохимические сенсоры с чувствительными слоями на основе упорядоченных молекулярных структур), а также в фундаментальных исследованиях в качестве модельных объектов для изучения физических свойств упорядоченных двумерных структур, межмолекулярных взаимодействий в условиях, когда расстояния между молекулами и их взаимная ориентация строго фиксированы.

С конца XX в. мировой фундаментальной наукой получено немало результатов о влиянии различных факторов (температуры, концентрации, состава растворов) на структуру формируемых пленок ЛБ. В начале XXI в. особый интерес вызвали работы, направленные на увеличение проводимости пленок ЛБ путем введения катионов металлов за счет их связывания с поверхностно-активными веществами (например, комплексообразования). Перспективна задача применения пленок ЛБ в качестве тонких диэлектрических слоев в системе «металл – диэлектрик – полупроводник» как полупроводника некоторых современных материалов, не выдерживающих высокотемпературной обра-



Устройство LT-103 для выделения слоев ЛБ вертикальным и горизонтальным способом



Устройство LT-111 для выделения слоев ЛБ вертикальным способом

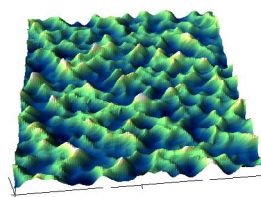


Рис. 3. Структура ЛБ-пленки полиметакрилата

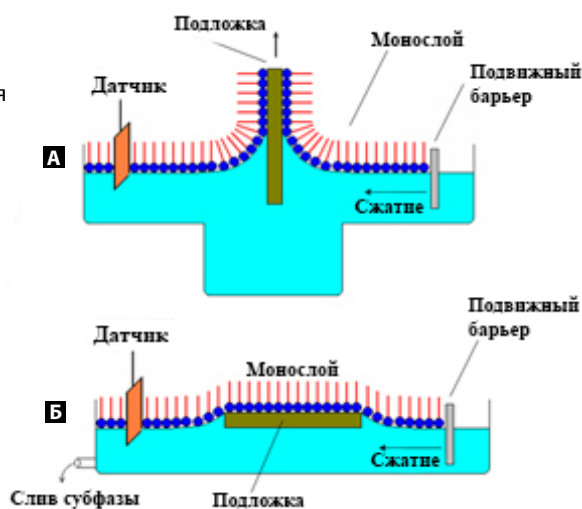


Рис. 4. Установки и способы получения пленок ЛБ:
а – вертикальный способ выделения; б – горизонтальный способ



Рис. 5. Установка LT-201

ботки. Характерно, что, в отличие от ряда других методов формирования диэлектрического слоя, нанесение пленок ЛБ не меняет свойств подложки. Следует отметить большой интерес исследователей к созданию гибких акустоэлектронных устройств на основе пленок поливинилиденфторида. Этот материал обладает пьезосвойствами и в последние годы активно используется для создания гибких звукопроводов и сенсорных устройств. Немало-

важными являются работы по формированию композиционных слоев ЛБ, содержащих наночастицы (керамические, металлов и их оксидов и др.), углеродные нанотрубки, фуллерены, с целью расширения функциональных свойств формируемых покрытий.

Большое внимание уделяется и приборной реализации метода. Широко распространен классический способ получения пленок ЛБ – вертикальный, позволяющий формировать как моно-, так и многослойные покрытия. В 2002 г. специалистами Института химии новых материалов НАН Беларуси (Агабеков В.Е., Жавнерко Г.К. и др.), предприятия «Микротест-машины» (Сулов А.А., Шашолко Д.И. и др.) и Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси (Чижик С.А., Чичу-

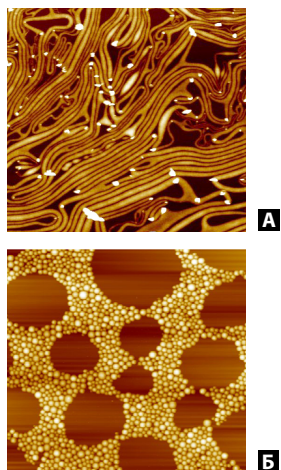
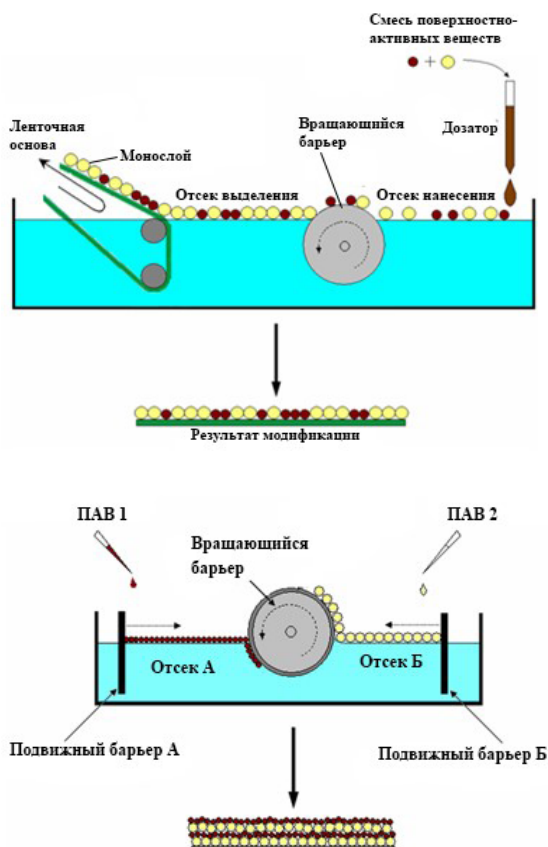


Рис. 6. Формирование монослоя ЛБ на ленточной основе (а) и чередующихся слоев ЛБ двух различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) и/или наночастиц на полимерной пленке, закрепленной на вращающийся барьер цилиндрической формы (б)

нов В.В. и др.) разработано устройство, в котором реализован принципиально новый метод формирования мономолекулярных покрытий ЛБ – способ горизонтального осаждения, позволяющий получать более упорядоченные и бездефектные монослои по сравнению с традиционной технологией ЛБ, что существенно расширяет спектр пленкообразующих соединений, в частности, формировать полимер-липидные пленки ЛБ на пористой основе и др. Способ заключается в понижении уровня субфазы и осаждении слоя на поверхность пластины, предварительно размещенной под ее поверхностью (рис. 4).

В 2008 г. для фундаментальных исследований в области приоритетных научных направлений и нанотехнологий, а также разработки подходов формирования композиционных структур с заданными свойствами (износостойкость, проводимость, намаг-

ниченность и т.д.) и функциями (сенсорный слой, магнитная сепарация и т.д.) разработана универсальная установка LT-201 (рис. 5), с применением которой возможно получение широкого спектра тонкопленочных покрытий, в том числе композиционных и наноструктурированных. Основным отличием устройства от отечественных и зарубежных аналогов является ее многофункциональность. Она позволяет формировать моно- и мультислойные композиционные покрытия на твердой поверхности из органических соединений, высокомолекулярных веществ и неорганических наночастиц как методами самоорганизации, послойного осаждения веществ на поверхность из их растворов, так и по технологии ЛБ. Установка может быть использована для формирования пленок с помощью «рулонных» технологий за счет согласованного движения вращающегося цилиндра

(ВЦ), разделяющего ванну ЛБ на два отсека (рис. 6). В первом случае вещество перемещается из одного отсека в другой с последующим выделением пленки ЛБ на гибкую основу площадью более 1 м² (рис. 6а). Во втором – чередующиеся слои ЛБ двух различных органических соединений и/или частиц формируются на ВЦ за счет его вращения (рис. 6б).

В 2012 г. в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова совместно с Институтом химии новых материалов НАН Беларуси создан автоматизированный комплекс для формирования молекулярных и ультратонких слоев различного функционального назначения на подложках с широким спектром геометрических форм: ленточной, плоской, цилиндрической (рис. 7).

Разработанные стандартные, а также специализированные, по требованиям заказчика, установки (более двух десятков) имеют широкую географию поставок в страны ближнего и дальнего зарубежья: Российская Федерация, Польша, Украина, Италия, Корея, Малайзия, Словакия, Швеция, Саудовская Аравия.

Следует также отметить достижения ООО «Изовак», где были предприняты успешные попытки масштабирования устройства ЛБ. В частности, разработана установка, позволяющая формировать покрытия способом горизонтального осаждения, защищающие от различных загрязнений изделия из стекла вплоть до размера стандарта Jumbo (6000×3210 мм).

В Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси проведен ряд фундаментальных исследований по изучению свойств функциональных покрытий на основе полимерных соединений с различным содержанием неорганических

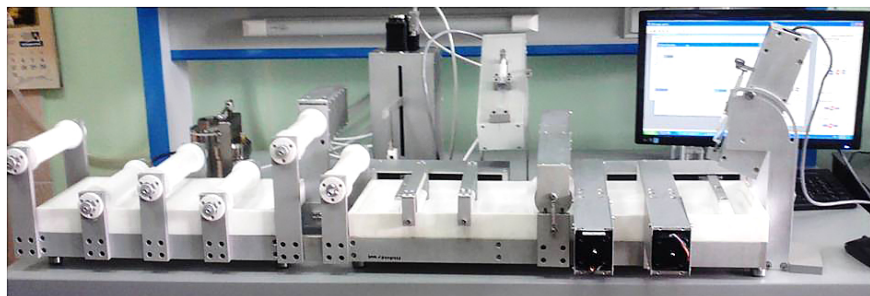


Рис. 7. Установка для формирования молекулярных и ультратонких слоев на образцах различной геометрической формы

наночастиц. Исследованы термомеханические характеристики нанопленок амфифильных полимерных соединений. На основании данных локальных механических свойств пленок толщиной от 10 до 20 нм показан сдвиг фазовых переходов в область более низких температур по сравнению с пленками толщиной от нескольких микрон и более. Совместно с Институтом физико-органической химии НАН Беларуси разработана технология модифицирования монослоями амфифильных полимеров поверхности ультрафильтрационных мембран, что позволило придать им антибактериальные свойства относительно бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*, а также уменьшить их засорение в процессе фильтрации белковых систем.

С 2020 г. продолжены исследования в области модифицирования поверхности полиэтилентерефталатных трековых мембран (рис. 8) в сотрудничестве с Евразийским национальным университетом им. Л.Н. Гумилева и Астанинским филиалом Института ядерной физики (Республика Казахстан). Разработаны композиционные трековые мембраны, модифицированные амфифильными полимерными монослоями ЛБ, позволяющие разделять водо-масляные эмульсии, что экспериментально подтверждено на

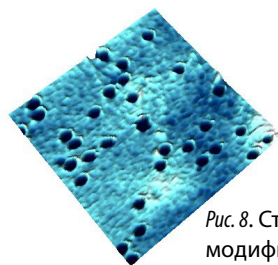


Рис. 8. Структура модифицированной полиэтилентерефталатной мембраны

примере смазочно-охлаждающих жидкостей. Активно проводятся работы по созданию гибких датчиков на основе модифицированных ПЭТ ТМ для мониторинга катионов металлов в воде. Для анализа их содержания в области предельно допустимой концентрации (ПДК) разработаны гибкие датчики с чувствительным слоем на основе высших фторированных кислот.

В Институте химии новых материалов НАН Беларуси установлены закономерности формирования и трибологические свойства моно- и мультислоев ЛБ низкомолекулярных соединений, что позволило, в частности, получить покрытия из высших органических кислот с неорганическими наночастицами (дисульфид молибдена, нитрид бора и др.). Данные покрытия применяли для защиты от изнашивания деталей манометров на Минском часовом заводе. Разработаны «рулонные» технологии изготовления композиционных тонкопленочных нано-

структурированных покрытий с заданными свойствами (оптическими, магнитными, механическими и др.). Сформированы слои ЛБ из различных красителей для светофильтров с заданным спектром поглощения, а также композиционные пленки ЛБ липида и флуоресцентных частиц для различных биосенсоров.

В лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси дан старт развитию «молекулярного дизайна» пленок ЛБ в качестве сенсорных слоев датчиков портативных устройств контроля температуры, анализа содержания тяжелых металлов и летучих органических соединений в водных растворах, что актуально для решения задач современной аналитической химии в интересах медицины, пищевой промышленности, ветеринарии, мониторинга окружающей среды. В лаборатории микро- и наноструктурированных систем Института химии новых материалов НАН Беларуси разрабатываются и совершенствуются способы создания водоотталкивающих покрытий из неорганических наночастиц и кремнийорганических соединений, которые могут быть использованы для защиты от влаги, биообрастания, коррозии, обледенения и органических загрязнений поверхности материалов различного функционального назначения. Результаты работы способствуют продвижению фундаментальных исследований в области химии и физики поверхностных явлений, материаловедения и востребованы в инженерии поверхности материалов, при создании композиционных наноструктурированных пленок для микромеханики, электроники, фотоники, спинтроники. ■



Нанохимия и жизнь



Алексей Труханов,
академик-секретарь
Отделения химии
и наук о Земле
НАН Беларуси,
доктор физико-
математических наук

Развитие нанотехнологий и тенденция к миниатюризации – ключевые направления научно-технического прогресса, которые, без сомнения, будут играть важную роль в развитии промышленности на протяжении всего XXI в. В последние десятилетия наноматериалы, чей потенциал обусловлен в первую очередь их уникальными оптическими, электронными, механическими и иными физико-химическими свойствами, появляющимися благодаря влиянию размерных, поверхностных и кооперативных эффектов, были предметом активных исследований как в академических кругах, так и в различных отраслях промышленности наряду с био- и информационными технологиями. Классификация наноматериалов в первую очередь зависит от формы структурных элементов: 0D- (нульмерные) частицы и квантовые точки; 1D- (одномерные) нанотрубки, волокна и стержни; 2D- (двумерные) пленки, слои и ленты; 3D- (трехмерные) поликристаллы.

Материаловедение в области низкоразмерных систем (наноматериаловедение) – одна из молодых дисциплин, которая за короткий период времени стала передовой современной наукой. Анализ статистических данных одной из обширнейших наукометрических баз данных Scopus по количеству публикаций на тему «nanomaterials» показал, что интерес к данной сфере возрастает экспоненциально в последние два десятка лет. В международных рецензируемых изданиях с ключевым словом nanomaterials за 2023 г. значатся около 15 тыс. научных статей. При этом лидирующие позиции занимают страны с развитой и стремительно развивающейся экономикой: Китай (31%), США (19%), Индия (11%) и др. Республика Беларусь находится на 61-м месте с показателем 165 публикаций.

Основные задачи современного этапа – поиск новых высокоэффективных методов синтеза и установление взаимосвязи между его условиями, структурой и функциональ-

ными свойствами полученных наноразмерных объектов. Возможность контролировать свойства и «управлять» поведением материала на этой стадии открывает широкие перспективы для развития новых технологий и производства принципиально новой продукции.

Наноматериалы находятся в поле зрения отечественных ученых из Института физико-органической химии НАН Беларуси (ИФОХ) и Института химии новых материалов НАН Беларуси (ИХНМ). В ИФОХ созданы носители для твердофазного автоматизированного синтеза олигонуклеотидов (коротких фрагментов ДНК или РНК) на основе стекла с контролируемым размером нанопор. Благодаря этому было налажено производство отечественных реагентов для ПЦР-РВ диагностики – флуоресцентных ДНК-зондов. Завершаются исследования новых нанопористых носителей, предназначенных для синтеза РНК-олигонуклеотидов для генной терапии с адресной доставкой.



Разработаны методы получения конъюгатов олигонуклеотидов с флуоресцентными нанокристаллами (квантовыми точками), плазмонными наночастицами, оксидом графена для перспективных биосенсорных материалов. Планируется изучить липидные системы доставки для генной терапии – липидные наночастицы (ЛНЧ). Уже получен ряд катионных липидов – компонентов ЛНЧ, ведется синтез ионизируемых аминокислот (аналогов соединений для мРНК-вакцин и пегилированных липидов).

Продолжается работа над новыми формами нанопрепаратов для АПК под торговой маркой Наноплант. Сверхпроницаемость наночастиц соединений

микроэлементов в растительные клетки позволяет обеспечивать высокую биологическую эффективность при меньших в десятки раз расходах в сравнении с традиционными соевыми и хелатными формами. За период с 2017 г. произведены микроудобрения Наноплант для предпосевной подготовки семян и внекорневой обработки посевов на площади 669 тыс. га (в том числе на экспорт – для обработки 386 тыс. га). В 2023 г. определены эффективность, оптимальные расходы микроудобрений Наноплант-Сера и Наноплант-Ультра при выращивании салата защищенного грунта. Изучены возможности Нанопланта для стимуляции укоренения одревесневших черенков голубики в

сравнении с хелатными микроудобрениями (Кристалон, Яра, производства Нидерланды) и гормональным стимулятором корнеобразования Корневин. Установлено, что применение Нанопланта в 2 раза, в сравнении с Корневином и Кристалоном, увеличило количество укоренившихся черенков. В их клетках продуцируются природные эндогенные гормоны – более эффективные стимуляторы роста и развития по сравнению с искусственными экзогенными гормональными препаратами.

С целью освоения рынка Узбекистана выполнены предварительные исследования возможности повышения энергии роста хлопчатника благодаря обработкам Наноплантом в операциях прайминга и инкрустации опушенных семян. В модельных экспериментах по выращиванию этой культуры в вегетативных сосудах выбрана более эффективная операция подготовки семян (инкрустация), обеспечивающая увеличение энергии роста на 25%.

В лаборатории микро- и наноструктурированных систем ИХНМ НАН Беларуси не первый год ведутся работы над новыми композиционными наноматериалами, содержащими наночастицы серебра. Представлены экологичные подходы по их «зеленому» синтезу с помощью природных биополимеров – биосовместимых и нетоксичных полисахаридов (пектин, хитозан, альгинат), выделяемых из природного сырья: пектин – из яблок и цитрусовых, альгинат – из водорослей, хитозан – из грибов и панцирей ракообразных. Полисахариды способны восстанавливать катионы серебра с получением наночастиц этого элемента, одновременно

образуя на их поверхности стабилизирующую оболочку, которая защищает их от агрегации. Более того, это позволяет снизить их токсичность для живых организмов. Таким образом формируется наноккомпозит, который включает в себя достоинства каждого из компонентов – полисахарида и серебра.

Оценка биологической активности наноккомпозитов Ag-полисахарид является междисциплинарной задачей, поэтому ИХНМ НАН Беларуси тесно сотрудничает как с отечественными научными организациями (Институт микробиологии НАН Беларуси, Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, РУП «Научно-практический центр гигиены», РУП «Институт мясо-молочной промышленности»),

так и с зарубежными коллегами (Ереванский государственный университет, Белградский университет). В ходе совместных исследований установлено, что наноккомпозиты Ag-полисахарид обладают выраженными антибактериальными свойствами в отношении как коллекционных штаммов бактерий, так и клинических изолятов, при этом они не токсичны и не оказывают кожно-раздражающего и сенсибилизирующего действия. Совместно с коллегами из Ереванского государственного университета показано, что наночастицы серебра, покрытые оболочкой альгината, ингибируют рост вирулентных штаммов *Pseudomonas* и потенциально пригодны для профилактики и лечения псевдомонадных инфекций радужной

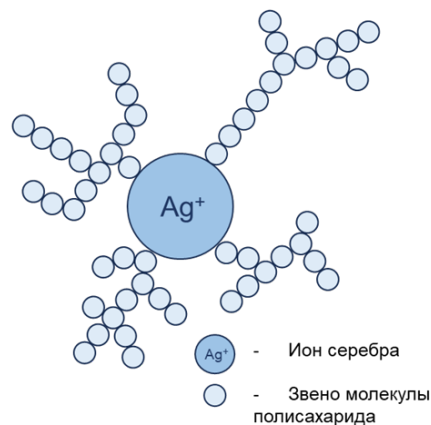
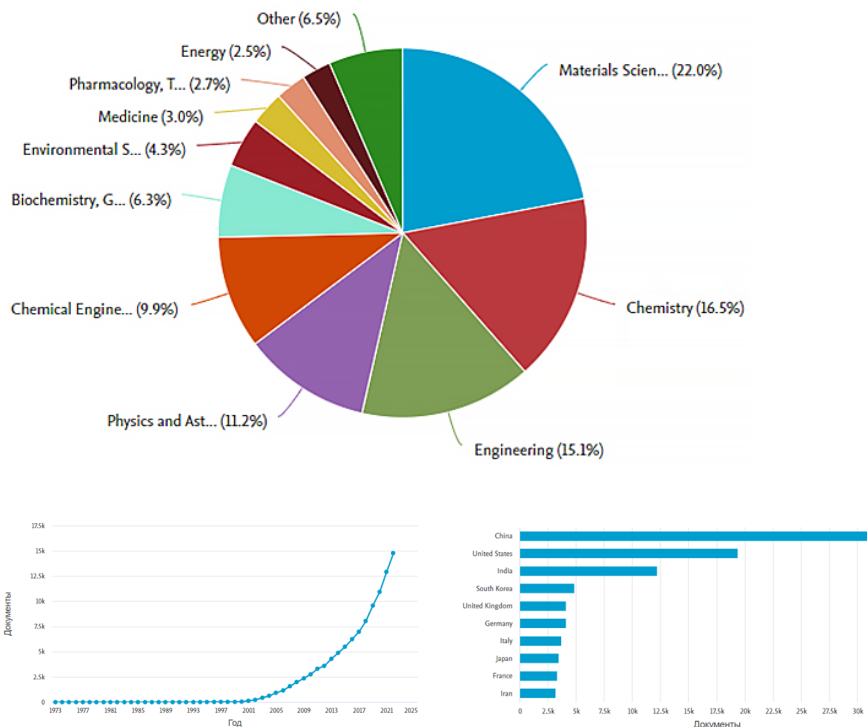


Схема композита на основе иона Ag⁺ и полисахарида

форели. Наночастицы серебра, стабилизированные оболочкой хитозана, проявляют активность в отношении полевых штаммов, вызывающих мастит у крупного рогатого скота. При комбинации наноккомпозитов Ag-полисахарид с коммерческими антибиотиками и антисептиками наблюдается аддитивный или синергетический антибактериальный эффект, что позволяет существенно снизить рабочую концентрацию антибиотика. Потенциал применения наноккомпозитов в растениеводстве оценен совместно с Институтом экспериментальной ботаники НАН Беларуси. В предварительных исследованиях показано, что Ag-пектин может действовать на возбудителей сетчатой и темно-бурой пятнистостей ячменя, способствовать замедлению некрозообразования и сохранению жизнеспособности растений.

Наноккомпозиты Ag-полисахарид представляют интерес в качестве основы для новых материалов различного функционального назначения. С их использованием методом послойного осаждения разработаны подходы к формированию



Статистические данные о количестве научных публикаций в международных рецензируемых изданиях на тему «nanomaterials» согласно наукометрической базе данных Scopus

ультратонких (толщина <100 нм), обладающих анти-бактериальными свойствами модифицирующих покрытий. Они проявляют как бактерицидное действие за счет входящих в их состав компонентов, так и антиадгезионные свойства, препятствующие сцеплению белков и бактерий, и могут использоваться для модификации изделий медицинского назначения (хирургические сетки, имплантаты и др.) с целью их защиты от бактериального заражения и расширения функционала.

Несмотря на то, что в последнее время есть ощущение, что термины «наноматериалы» и «нанотехнологии» широко общественностью понимаются в определенной степени как исчерпавшие свою актуальность и используемые ранее для «хайпа», следует отметить, что материалы при переходе на наноразмерный уровень все-таки демонстрируют принципиально новые свойства, не наблюдаемые на макроскопическом уровне. Именно это и привлекает внимание многих ученых как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Дальнейшее развитие и применение наноматериалов обещает множество возможностей, включая создание сверхточных систем доставки лекарств, нанороботов для производства микрообъектов, наноэлектроники, ультра-селективных молекулярных сит и нанокомпозитов для высокопроизводительных транспортных средств. Данные технологии будут и в дальнейшем привлекать внимание исследователей и инженеров, поскольку их потенциал и возможности далеко не исчерпаны. ■



Александр Ильющенко,
директор Института
порошковой металлургии,
генеральный директор
ГНПО порошковой
металлургии, академик,
профессор



Татьяна Талако,
заместитель академика-
секретаря Отделения
физико-технических наук,
доктор технических наук,
профессор



Андрей Лецко,
заведующий НИЛ №15,
кандидат технических
наук, доцент

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аддитивное производство (АП) находится в авангарде передовых технологий XXI в. Это связано с уникальными возможностями дизайна конструкций (повышенная свобода проектирования по сравнению с традиционными решениями: возможность изготовления облегченных решетчатых структур, сложных внутренних каналов или единых встроенных моделей вместо нескольких частей), широким набором методов построения и перечнем материалов. Однако для эффективного использования открывающихся в связи с этим перспектив необходимо полное переосмысление инженерного цикла АП.

Основные этапы аддитивного производства

Термин «аддитивное производство» (от англ. additive manufacturing) объединяет перечень перспективных технологий кастомизированного изготовления деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала (как правило, послойного), в противоположность так называемому вычитающему производству [1].

Несмотря на то, что до сих пор единой устоявшейся классификации аддитивных технологий не существует, в соответствии со стандартом ASTM F2792 (США), по принципу построения выделяют 7 основных групп процессов:

- *material extrusion* – выдавливание материала;
- *material jetting* – разбрызгивание материала, струйные технологии;
- *binder jetting* – разбрызгивание связующего;
- *sheet lamination* – соединение листовых материалов;
- *vat photopolymerization* – фотополимеризация;
- *powder bed fusion* – расплавление материала в заранее сформированном слое;
- *directed energy deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Невзирая на многообразие процессов, типовой технологический цикл аддитивного производства включает следующие этапы:

- 3D-моделирование, при котором используют проектирование в среде САПР либо обратный инжиниринг

(3D-сканирование), результатом которых является создание виртуальной 3D-модели (CAD-модель);

- преобразование CAD-модели в формат «.stl» (от первого метода – стереолитография), в котором описаны внешние замкнутые поверхности изначальной САПР-модели, формирующие основу для расчета слоев. Как правило, в формате «.stl» 3D-модель представляют последовательностью треугольников-фасет, каждый из которых описывается 4 наборами данных (координатами x , y , z для каждой из вершин и вектором нормали, указывающим ориентацию фасета). Таким образом создается набор послойных сечений 3D-модели;

- передача .stl-файлов в 3D-принтер, где они корректируются (исправление размеров, закрытие полостей и открытых структур, позиционирование и ориентация изделия для конкретного способа построения, проектирование поддержек);
- настройка 3D-принтера (установка параметров процесса, например характеристик источника энергии, стратегии сканирования, толщины слоя и др.);
- непосредственно процесс построения (как правило, полностью автоматизирован);
- извлечение изделия (удаление неиспользованного порошка, поддержек, платформы построения);
- последующая обработка, которая может включать термическую или термомеханическую (горячее изо-

статическое прессование (ГИП)) для удаления остаточной пористости, уменьшения остаточных напряжений и регулирования структуры и фазового состава материала, а также различные варианты механической обработки для обеспечения необходимой точности и шероховатости поверхности (шлифовка, полировка).

Среди порошковых технологий получения металлических и керамических изделий наиболее широкое применение получили платформенные технологии селективного лазерного (SLM) (рис. 1) и электронно-лучевого сплавления (EBM), а также струйной 3D-печати с использованием связующего вещества.

В первых двух методах (SLM, EBM) слой порошка сначала наносится на платформу построения, после чего энергия сфокусированного лазерного или электронного луча локально (в соответствии с цифровой моделью) спекает или расплавляет порошок, формируя изделие. Затем платформу опускают, и цикл повторяется до тех пор, пока деталь не будет сформирована, после чего излишки порошка удаляются, а деталь отделяется от платформы.

В технологиях струйной печати используется печатающая головка, которая селективно наносит капли жидкого связующего вещества (3DP) на платформу с порошком в соответствии с информацией о наборе сечений детали. После ее формирования изделие осторожно извлекают из слоя порошка, так как оно представляет собой сырую (неспеченную) заготовку. Затем связующее удаляют, и начинается процесс спекания, иногда с последующей инфильтрацией.

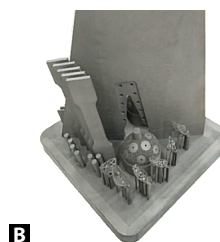
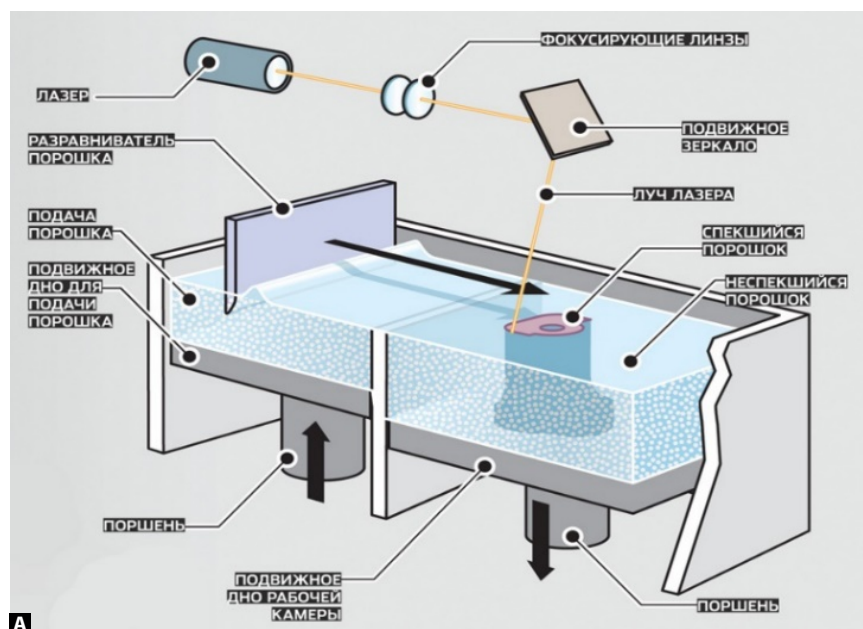


Рис. 1. Селективное лазерное сплавление (SLM): а) схема работы установки селективного лазерного сплавления (SLM); б) установка SLM ProX300 («3D Systems», США) Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа; в) детали на платформе построения

Основные требования к порошкам для аддитивных технологий

Особенности послойного формирования изделий обусловили специфические требования к порошкам, применяемым в аддитивном производстве. Принято считать, что основными характеристиками, обеспечивающими возможность достижения близкой к теоретической плотности порошковых изделий, получаемых данными методами, является сферическая форма частиц и оптимизация их распределения по размерам под конкретную технологию [2]. Кроме указанных характеристик при выборе порошков для АП важное значение имеют химический состав, в первую очередь содержание кислорода, примесей и растворенных газов, а также дефекты типа сателлитов, открытой или закрытой пористости, которые обычно стремятся минимизировать.

Основной метод получения металлических порошков железных, никелевых и кобальтовых сплавов для аддитивных технологий – распыление расплава газовой струей, при котором плавление осуществляют в защитной атмосфере или вакууме, что обеспечивает низкое содержание кислорода и примесей. Метод позволяет соз-

давать качественные порошки для селективного лазерного сплавления, селективного электронно-лучевого сплавления, послойной лазерной наплавки и других аддитивных технологий.

На рис. 2 представлена морфология поверхности никелевого жаропрочного сплава Inconel 718, полученного в Институте

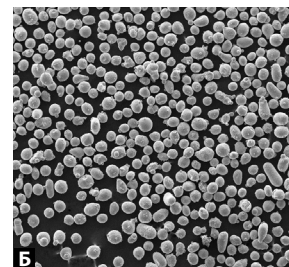


Рис. 2. Установка распыления и порошки, полученные по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии имени академика О.В. Романа: а) установка вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом; б) морфология поверхности распыленных порошков никелевого жаропрочного сплава, полученных по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии им. академика О.В. Романа

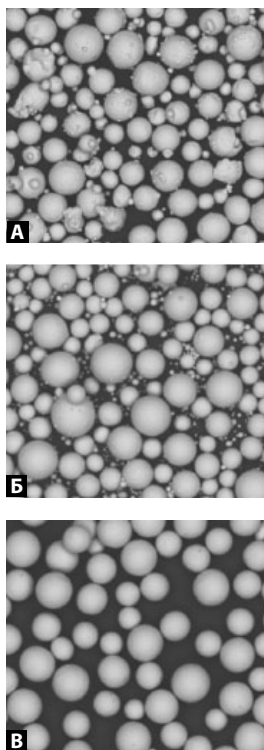


Рис. 3. Морфология поверхности порошков титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных различными методами: а) технология EIGA; б) плазменное распыление; в) технология PREP [3]

порошковой металлургии им. академика О.В. Романа на установке вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом «JT-QWH-25KG» (технология VIGA). Фактор формы порошков варьируется в диапазоне 0,85–0,92, что находится на уровне лучших зарубежных аналогов.

Традиционным методом производства особо чистых порошков реакционноспособных сплавов сферической формы является технология EIGA, основанная на индукционном плавлении вращающегося электрода с последующим его распылением инертным газом, не предусматривающая его контакт с тиглем либо другим электродом. Это наиболее экономичный способ получения

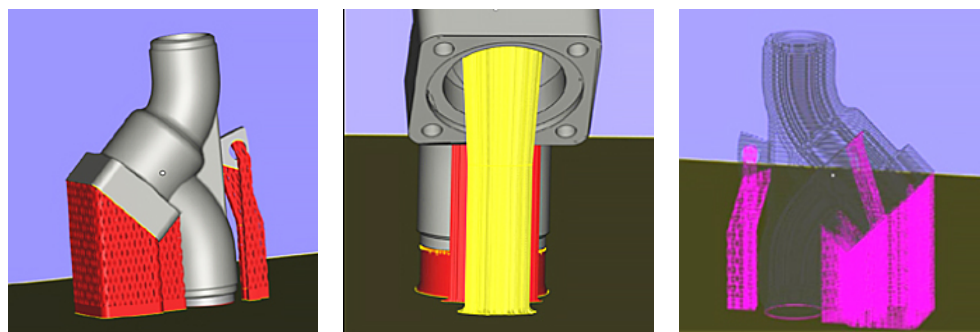


Рис. 4. Разработка поддержек (и разбивка на слои) с использованием программного обеспечения Magics (собственность компании Materialise)

реакционноспособных порошков размером менее 500 мкм (рис. 3а). Близка к нему так называемая плазменная технология вращающегося электрода (PREP), при которой материал плавится при контакте электрода с плазмой. При этом порошки имеют правильную сферическую форму размером менее 100 мкм (рис. 2в), и стоимость их очень высока.

Относительно нова технология плазменного распыления (PWAP или PA), позволяющая выпускать высококачественные сферические порошки размером менее 200 мкм (рис. 2б). Однако возможности здесь ограничены материалами, которые могут быть изготовлены в виде проволоки.

Более подробный обзор методов получения металлических порошков для аддитивного производства представлен в [4].

Ограничения технологии АП

Чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами аддитивных технологий, важно учитывать имеющиеся ограничения.

Принято считать, что процессы АП обычно эффективны для единичного или мелкосерийного производства. Тем не менее уже имеется опыт изготовления серий до 25 тыс. деталей в год [5].

Несмотря на то, что в аддитивных процессах уже опробован и успешно применяется широкий перечень материалов (полимеры, металлы, сплавы, керамика, композиты и др.), их выбор, как правило, ограничен способностью к свариваемости. Трудносвариваемые компоненты требуют особого подхода.

В платформенных порошковых технологиях имеется целый ряд конструктивных ограничений. Прежде всего, максимальный размер деталей ограничен размерами платформы. Ориентация детали в слое порошка является ключевым моментом как с точки зрения качества, так и стоимости, и определяет продолжительность печати, количество поддержек, шероховатость поверхности и остаточные напряжения.

Важное правило при послойном построении детали с нависающими частями – избегать слишком малого угла выступа, поскольку каждый новый слой должен хотя бы частично поддерживаться материалом предыдущего. Если угол между деталью и платформой построения составляет менее 45°, необходимо использовать поддержки элементов нависающих частей, позволяющие предотвратить высокую шероховатость поверхности, а также искажения и деформации,



Рис. 5. Коробление поверхности из-за слишком малой толщины стенки (собственность компании Renishaw)

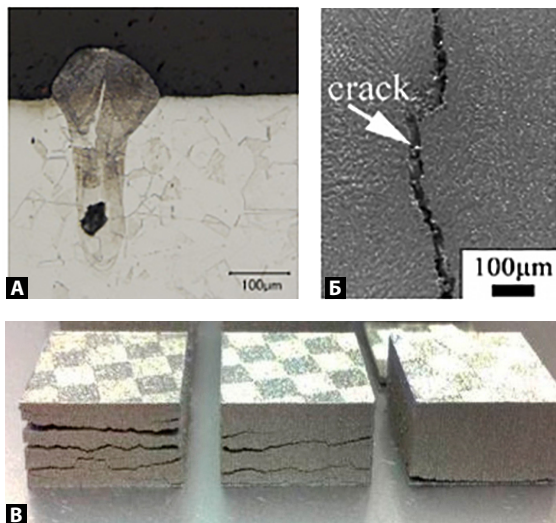


Рис. 6. Дефекты в АП-изделиях: а) пористость; б) трещина; в) расслоение [8]

приводящие к разрушению структуры в условиях быстрого нагрева и охлаждения материала. В этом случае поддержки выполняют функцию своеобразного анкера, обеспечивая формирование ровного слоя без изгиба вверх, и рассеивают избыточное тепло от сфокусированного источника энергии (рис. 4).

Рекомендуемый минимальный размер отверстия (полости) в технологии селективного лазерного сплавления, как правило, составляет около 0,4 мм. Толщина стенки обычно ограничивается значением 0,2 мм, но зависит от типа машины, используемого материала и свойств порошка. Если толщина стенки слишком тонкая и нет поддержек, есть шанс коробления поверхности, как это видно на рис. 5. В этом случае толщину стенки секции необходимо увеличивать, чтобы избежать эффекта коробления.

Максимальное соотношение длины и высоты в технологиях SLM обычно не должно превышать 8:1. Но в случае оптимизации сечения детали или геометрии поддержек возможно превы-

шение рекомендуемого соотношения. Некоторые рекомендации по оптимизации конструкций представлены в [6, 7].

Основные дефекты в материалах, получаемых аддитивными методами

Специфические дефекты, характерные для изделий аддитивного производства, связаны с особенностями их формирования и обусловлены главным образом неправильной стратегией построения, некорректным

выбором ориентации детали и параметров процессов либо недостаточным качеством порошка. К числу наиболее распространенных недостатков следует отнести чрезмерную шероховатость поверхности («эффект ступеньки лестницы»), анизотропию структуры (как правило, в направлении построения (по оси Z)), недостаточное проплавление материала, высокую пористость, примесные включения, растрескивание и расслоение, скручивание, коробление, краевые эффекты и неточность размеров (рис. 6).

Следствие этого – появление отклонений в размерах, неприемлемого качества поверхности, структурной и механической анизотропии, которая также может быть связана с формированием определенной текстуры зерен, обусловленной направлениями теплоотвода. Сокращение анизотропии может быть достигнуто путем выбора соответствующей ориентации виртуальной конструкции. При наличии высоких остаточных напряжений в зависимости от локальной кривизны поверхности могут возникать разрывы.

Еще один важный дефект, определяющий свойства изделия, – пористость. Под напряжением она действует как кон-



Рис. 7. Установки горячего изостатического прессования, используемые в Институте порошковой металлургии имени академика О.В. Романа

центратор напряжений и может привести к снижению механической прочности за счет развития микротрещин.

Некоторые из дефектов (высокие внутренние напряжения, обширная остаточная пористость, анизотропия структуры и др.) могут быть исправлены с помощью последующей обработки, например горячим изостатическим прессованием (ГИП) [7] (рис. 7).

На рис. 8 представлена микроструктура SLM-образца из распыленного порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до и после ГИП. Последующая обработка образцов этим методом позволила не только обеспечить рекристаллизацию и формирование однородной структуры, но и повысить плотность SLM-образцов до теоретической.

Более детальную информацию о фазовых и структурных превращениях в SLM-образцах до и после обработки можно получить с помощью метода дифракции обратно-рассеянных электронов (ДРОЭ). В частности, анализ прямых и обратных полюсных фигур (рис. 9) позволяет определить направление преимущественной ориентации зерен относительно направления построения,

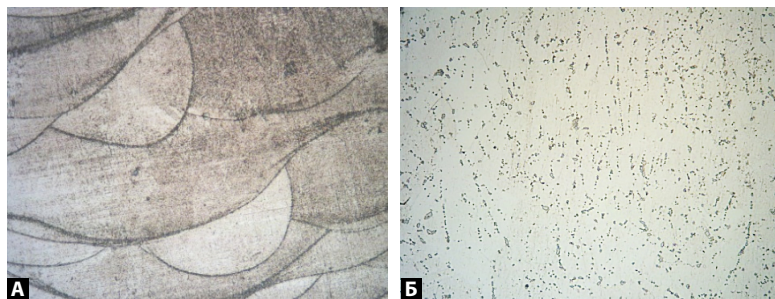


Рис. 8. Оптические микрофотографии поперечного сечения SLM-образца из порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до (а) и после (б) ГИП

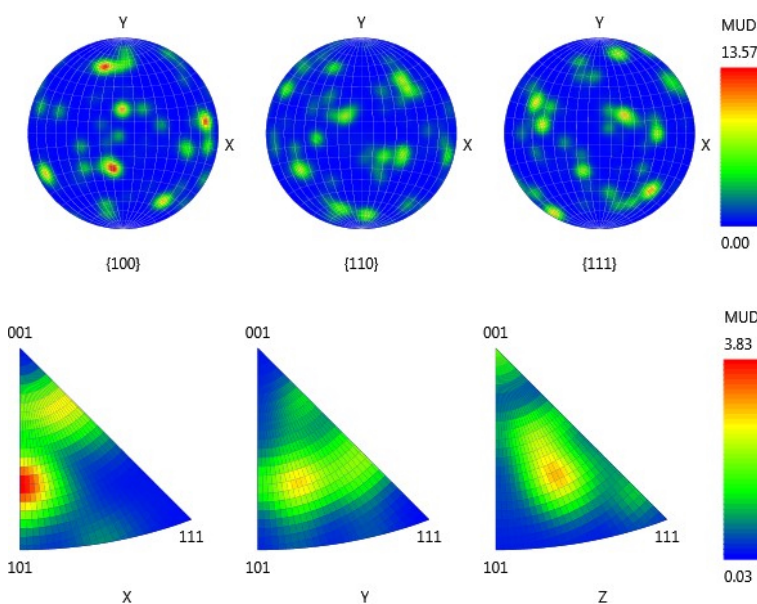


Рис. 9. Прямая и обратная полюсные фигуры для никелевого жаропрочного сплава Inconel 718

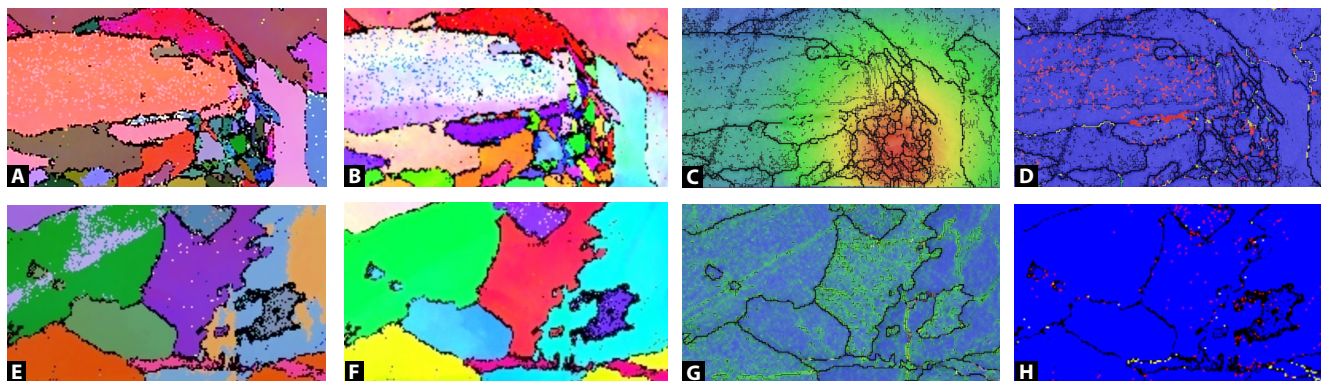


Рис. 10. Карты ДРОЭ SLM-образца из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718 до (а–д) и после ГИП (е–h): цвета Эйлера (а, е), разориентация кристаллов относительно плоскости Z (b, f), внутренние напряжения + границы зерен (с), локальные деформации + границы зерен (g), распределение фаз + границы зерен (d, h)



	Шероховатость, Rz															
	0.04	0.06	0.10	0.16	0.25	0.40	0.63	1.0	1.6	2.5	4.0	6.3	10	16	25	40
Токарная обработка																
Фрезерование																
Полирование																
После построения (напечатанный)																
После кратковременной дробеструйной обработки																
После полировки																

Рис. 11. Стандартная шероховатость деталей SLM в зависимости от способа механической обработки и полированная центробежная топливная форсунка для авиакосмической промышленности

	Основной диапазон
	Менее типичная область

которое в данном случае соответствует (100). Сравнительный анализ карт ДОЭ (рис. 10) полезен для контроля процессов рекристаллизации, выявления областей с повышенной локальной деформацией и др.

Шероховатость поверхности изделий, полученных АП, зависит от размеров используемых порошков для построения и обычно находится в пределах Rz 16–63 мкм. Разработаны технологии электрохимической полировки, при которой достигается шероховатость поверхности Rz 0,1 мкм (рис. 11).

Более подробный анализ причин и способов борьбы с дефектами представлен в обзоре [10].

Аддитивное производство металлических материалов

Наибольшее распространение в аддитивном производстве получили сплавы титана и алюминия, нержавеющие стали и жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта [8]. Разрабатываются и исследуются также медные и магниевые сплавы, драгоценные (золото, серебро, платина)

и тугоплавкие металлы и сплавы на основе Mo, W и др. [11].

Безусловным лидером являются титановые сплавы, особенно Ti-6Al-4V, характеризующийся высокой удельной прочностью и широко используемый в авиакосмической и медицинской области. Напечатанные детали, как правило, имеют более высокую прочность, но меньшую пластичность по сравнению с изделиями, полученными традиционными методами. Последующая термообработка может привести к полярному изменению этих характеристик.

Алюминиевые детали АМ в основном производятся из сплавов AlSi10Mg с высоким содержанием кремния, способствующим снижению температуры плавления и обеспечивающим высокую стойкость к образованию горячих трещин и низкую усадку при затвердевании, без охрупчивания и образования пористости. В целом механические свойства таких изделий не уступают литейным сплавам за счет мелкозернистой структуры без заметной анизотропии [8]. Однако требуются усилия по обеспечению стойкости к усталостным разрушениям АП-деталей из AlSi10Mg, которые весьма восприимчивы к локальным дефектам.

Детали АП из аустенитной нержавеющей стали обычно отличаются более высокой прочностью, твердостью и характеризуются анизотропией, а также более низкой пластичностью по сравнению с традиционно получаемыми аналогами. Это объясняется более мелкозернистой структурой (вследствие быстрого затвердевания) и особенностями внутреннего строения (дендритная и ячеистая структура), более высокой плотностью дислокаций и остаточными напряжениями (до 60–90% от предела текучести). Есть данные об увеличении предела прочности на 25% (с 200 до 250 МПа) [8] после механической обработки для снижения шероховатости поверхности.

Среди сплавов на основе Ni чаще используются жаропрочные сплавы марок Инконель 625 и 718 с повышенной прочностью при растяжении, стойкостью к окислению, коррозии и ползучести, рассматриваемые в качестве перспективных кандидатов для применения в реактивных двигателях и компонентах газовых турбин. Технологии получения этих сплавов методами АП обычно требуют компромисса между прочностью и пластичностью, демонстрируя значительные уровни

анизотропии. Сообщалось, что наличие дефектов сварки оказывает значительный эффект на усталостную долговечность деталей АП из сплава IN718, сокращая срок их службы. Термическая обработка улучшает эти характеристики до значений традиционных литых или кованных аналогов (при более высоком сопротивлении ползучести).

Другие сплавы на основе Ni, например Haynes 230 (PBF-SLM), также демонстрируют лучшие механические свойства (предел текучести и предел прочности) по сравнению с литыми и кованными материалами. Однако на пластичность отрицательно влияет наблюдаемая сегрегация элементов в микроструктуре.

В таблице представлены сравнительные механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в аддитивных технологиях металлических сплавов [12]. Детали АП на металлической основе по механическим свойствам не уступают традиционным литым или кованным изделиям.

Аддитивные технологии получения керамики

В АП керамических материалов опробованы почти все известные технологии. Однако в отличие от полимеров и металлов, уже получивших широкое распространение, АП-керамика пока используется ограниченно. Это связано с хрупкостью большинства керами-

ческих материалов. Чтобы избежать чрезмерных повреждений, применяют технологии формообразования частично спеченной или неспеченной керамики, которая затем может быть подвергнута механической обработке и последующему спеканию для достижения необходимой плотности и прочности [13].

В платформенных порошковых технологиях в качестве сырья используют керамические порошки, смесь керамических частиц со связующим веществом, композиционные частицы или частицы с полимерным покрытием, гели, а также добавки с низкой температурой плавления (MgO , $CaMgSiO_4$) либо образующие фазу жидкого стекла.

Процессы селективного лазерного плавления порошков были одними из первых в изготовлении керамики. Так, методом SLM получены литейные формы из кварцевого песка [14, 15] и стоматологические изделия из порошков стабилизированного иттрием диоксида циркония [16].

Большое количество публикаций, посвященных исследованию процессов SLM стабилизированного иттрием диоксида циркония, объясняется его сравнительно высокой фазовой стабильностью после затвердевания и достаточной вязкостью. Отмечается высокая чувствительность свойств получаемой керамики к атмосфере и параметрам процесса.

Кроме того, реализованы операции спекания с образованием керамической фазы при химическом взаимодействии между двумя порошками либо между порошком и атмосферным воздухом. Так, AlN получен путем селективного лазерного спекания алюминиевого порошка в присутствии азота [17]. Лазерная обработка SiC при участии кислорода

Материал	Процесс	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Ti6Al4V	Горячее деформирование	951	883	14
	LMD*	1160	1160	6
	EBM**	1020	950	14
	SLM	1100	1000	8
	LENS***	1077	973	11
Inconel 718	Горячее деформирование	1407	1172	21
	LENS	1393	1117	15,8
	EBM	1238	1154	7
Inconel 625	LENS	938	548	38
17-4SS	SLM	1050	540	25
Сплав Co–Cr	EBM	960	560	20
Сплав Co–Cr–Mo	SLM	1350–1450	910–1010	9–13
316SS	Горячее деформирование	579	290	50
	LENS	655	278	66,5
	LMD	579	296	41

Таблица. Механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в настоящее время в аддитивных технологиях металлических сплавов [13]:

*LMD – объемная лазерная наплавка;

**EBM – электронно-лучевое сплавление;

***LENS – объемная лазерная наплавка на оборудовании с торговой маркой

LENS™ – Laser Engineered Net Shaping

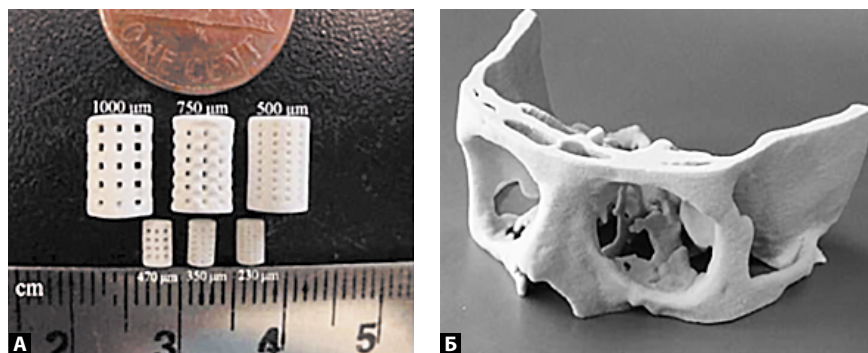


Рис. 12. Сложнопрофильные изделия из керамики, полученные SLA: а) три-кальций фосфатные каркасы для бондажа костной ткани; б) лицевой сегмент из кальций фосфатного порошка [21, 22]

привела к созданию композита SiC/SiO₂ [18].

Сообщалось, что использование в качестве источника тепла электронного луча, эффективное при обработке проводящих материалов (например, металлов), при изготовлении керамики приводило к высоким термическим напряжениям, растрескиванию и искажению структуры [19, 20].

Свойства керамики можно улучшить путем последующей обработки, например, спеканием в печи, инфильтрацией полимером или легкоплавким металлом, отжигом, горячим или холодным изостатическим прессованием. Однако контроль пористости и деформации в процессе обработки остается сложной задачей и больших преимуществ по сравнению с традиционными технологиями селективного спекания, например медицинских (в частности, стоматологических) изделий, не обеспечивает.

С учетом сложности селективных лучевых процессов изготовления керамики дальнейшие исследования были сосредоточены на более простых методах с применением связующего вещества. *Binder jetting* (BJ) наиболее широко используется среди методов АП для производства керамики и заключается в послойном нанесении порошков и

распылении жидкого связующего в соответствии с цифровой трехмерной моделью. Связующее частично отверждается или высыхает перед нанесением следующего слоя. В отличие от технологии плавления в порошковом слое, где применяется нагрев, который может привести к остаточным напряжениям, фазовым изменениям или окислению, при струйной обработке в качестве связующего можно использовать практически любой материал. Технология легко масштабируется и обеспечивает более высокую производительность по сравнению с SLM, исключает необходимость поддержек, а стоимость машин значительно ниже. Недостатком является возможное загрязнение материала примесными элементами и необходимость этапов последующей обработки, что создает риск искажения из-за несимметричного уплотнения или неконтролируемой усадки. Для устранения нежелательных элементов в некоторых случаях эффективен двухэтапный процесс, сочетающий в себе вакуумный пиролиз и удаление связующих воздухом.

Данная технология опробована для большого количества керамики, такой как Al₂O₃, SiC, SiSiC, Si₃N₄, MoSi₂, диоксид циркония, дисиликат лития (Li₂Si₂O₅), гидроксид

апатит, фосфат кальция и др. Преимуществом порошковых технологий в биомедицинских приложениях является возможность эффективного регулирования пористости конструкций. Для повышения плотности и механических свойств после формирования изделий методом BJ также используют различные методы постобработки керамических деталей, такие как жидкофазное спекание, инфильтрация и изостатическое прессование (рис. 12).

Еще одно перспективное направление – технология стереолитографии (SLA), характеризующаяся «высоким разрешением» процесса (минимальное значение, встречающееся в литературе, – 100–125 мкм) и позволяющая получать сложную геометрию изделий, например керамические ячеистые структуры, лопатки турбины и др.

Несмотря на необходимость в специализированном фотополимерном сырье, накладывающую значительные ограничения на круг используемых материалов, процесс SLA был успешно опробован для получения керамики на основе ZrO₂, Li₂Si₂O₅, Al₂O₃, SiC, SiOC, SiO₂ и TiC с помощью основных форм исходного материала: керамических суспензий и полимерных предшественников производимой керамики. Показана возможность армирования керамики, изготавливаемой из фотополимеров, микроволокном и короткими волокнами [23, 24].

Для обеспечения качества деталей SLA решающее значение имеет контроль реологических параметров и характеристик процесса фотоотверждения. Более перспективен подход, заключающийся в применении полимеров, разлагающихся с образованием керамики. Он был использован для изготовления композитов

SiC/SiOCN и SiC/SiO_xC_y для лопаток турбины двигателя. Кроме того, поскольку температуры пиролиза в таких процессах с полимерами относительно низкие (<1300 °C), для спекания требуется меньше энергии. Тем не менее в полученных изделиях также присутствуют дефекты, такие как трещины и внутренняя пористость.

Среди перспективных направлений развития аддитивного производства керамики в [25] отмечаются технологии binder jetting и SLA, разработка новых систем связующих и суспензий для мелких деталей в электронике, пористых медицинских изделий для остеointеграции, пьезокерамики, новые возможности формирования интегрированных структур.

Можно констатировать, что рынок аддитивных технологий быстро растет, а изделия используются во многих отраслях: авиакосмической, энергетике, медицине, в автомобилестроении и транспорте, для изготовления оснастки, потребительских товаров и др. АТ рекомендуются для кастомизированного и мелкосерийного производства деталей сложной формы, которые демонстрируют более высокие свойства, нежели традиционные аналоги.

Несмотря на то, что аддитивные технологии подразумевают сложные и многофакторные процессы, имеющие ряд ограничений и немало нерешенных моментов, они предоставляют уникальные возможности для дизайна конструкций и требуют полного переосмысления инженерного цикла АП, включая методологию проектирования, оптимизации и моделирования процессов, а также решения ряда практических вопросов по формированию структуры и свойств материалов и способов борьбы с дефектами. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ильющенко А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия: монография / А.Ф. Ильющенко // Национальная академия наук Беларуси; Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа. — Минск, 2019.
2. Dawes J. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain / J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton // Johnson Matthey Technol. Rev. 2015. Vol. 59. No3. P. 243–256.
3. M. Heynick. Additive manufacturing of metals: a review // Proc. Of MS&T11, Additive Manufacturing of Metals. — Columbus, Oh. 2011. P. 1413–1425.
4. А.Ф. Ильющенко, А.И. Лецко, Т.Л. Талако // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. трудов. — Минск, 2017. Вып. 40. С. 48–53.
5. Introduction to additive manufacturing technology. A guide for designers and engineers // EPMA V2-REVISED. N12. 2012. P. 44.
6. Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures / P. Das [et al.] // Procedia Manufacturing. 2015. N1. P. 343–354.
7. Gaynor A.T. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design / A.T. Gaynor, J.K. Guest // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016. N54. P. 1157–1172.
8. Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties / T. DebRoy [et al.] // Progress in Materials Science Prog. 2018. N92. P. 112–224.
9. Рудской А.И. Аддитивные технологии. Материалы и технологические процессы: монография / А.И. Рудской [и др.]. — СПб., 2021.
10. Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing / A. Mostafaei [et al.] // Current Opinion in Solid State and Materials Science. N26. 2022.
11. Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review / B. Barroqueiro [et al.] // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2019. N6.
12. Singh S. Material issues in additive manufacturing: A review / S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh // Journal of Manufacturing Processes. — 2017. Vol. 25. P. 185–200.
13. Diener S. Literature review: Methods for achieving high powder bed densities in ceramic powder bed based additive manufacturing / S. Diener, A. Zocca, J. Günster // Open Ceramics. 2021. N8. P.100191b.
14. Direct laser sintering of a silica sand / Y. Tang [et al.] // Materials and Design. 2003. N24. P. 623–629.
15. An investigation of rapid prototyping of sand casting molds by selective laser sintering / G. Casalino [et al.] // Journal of Laser Applications. 2002. N14. P. 100–106.
16. Ceramic components manufacturing by selective laser sintering / P. Bertrand [et al.] // Applied Surface Science. 2007. N254. P. 989–992.
17. Sercombe T.B. Rapid manufacturing of aluminum components / T.B. Sercombe, G.B. Schaffer // Science 301 (2003) 1225–1227.
18. M. Geiger (Ed.). Laser Assisted Net Shape Engineering 2: Proceedings of the 30th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems — LANE'97, Meisenbach, Bamberg, 1997. Erlangen, September 23–26.
19. Materials for additive manufacturing. CIRP Annals / D. Bourell [et al.] // Manufacturing Technology. 2017.
20. Electron beam sintering of ceramics for additive manufacturing / A.S. Klimov [et al.] // Vacuum. 2019. N169. P. 108933.
21. Development of a new calcium phosphate powder-binder system for the 3D printing of patient specific implants / A. Khalyfa [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2007. N18. P. 909–916.
22. Microwave Sintered 3D Printed Tricalcium Phosphate Scaffolds for Bone Tissue Engineering / S. Tarafder [et al.] // Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine. 2013. N7, 8. P. 631–641.
23. D.J. Thomas. 3-D printing of polymer-derived CMCs for next-generation turbine blade manufacture // American Ceramic Society Bulletin. 2017. N96. P. 28–30.
24. Short fiber reinforced 3D printed ceramic composite with shear induced alignment / D.E. Yunus [et al.] // Ceramics International. 2017. N43(15). P. 11766–11772.
25. Diener S. Literature review: Methods for achieving high powder bed densities in ceramic powder bed based additive manufacturing / S. Diener, A. Zocca, J. Günster // Open Ceramics. 2021. N8. P. 100191b.



Путешествие в наномир: увидеть невидимое...



Василина Лапицкая,
старший научный сотрудник
лаборатории нанопроцессов
и технологий Института
тепло- и массообмена
имени А.В. Лыкова
НАН Беларуси, кандидат
технических наук

Применение высокоточных зондовых методов (в частности, атомно-силовой микроскопии) для описания структуры и свойств синтезированных новых материалов позволяет увидеть то, чего не разглядеть человеческим глазом. Уровень исследований находится в диапазоне от микро до нанометров. Для визуализации при этом используют зонд атомно-силового микроскопа (АСМ) – тончайшую консоль с острием (рис. 1 а, б), имеющим радиус закругления в несколько нанометров. Толщина консоли составляет в среднем около 2 мкм (в 50 раз тоньше человеческого волоса).

Таким образом можно получать 3D-изображения поверхностей различных материалов: от сверхтвердых керамик, алмазоподобных и износостойких покрытий до биологических клеток и полимерных пленок – в субмикро- и наномасштабе с высоким разрешением: по оси ХУ до 0,2 нм, по Z – до 0,03 нм [1]. При этом на острие зонда АСМ со стороны исследуемой поверхности действуют следующие силы: Ван-дер-Ваальса, межатомные, электростатические, адгезии. Исследователи задействуют две методики: в одном случае образец меняет положение относительно неподвижного зонда (рис. 1а), в другом – наоборот (рис. 1б). Горизонтальное перемещение образца либо зонда АСМ в про-

цессе сканирования осуществляется с помощью пьезосканера (рис. 1 а, б) [2]. Атомно-силовой микроскоп детектирует положение зонда в каждой точке измерений. Когда его острие находится у поверхности, происходит изгиб (отклонение) консоли зонда, для измерения которого используют фотодетектор – четырехсегментный полупроводниковый фотодиод. Луч лазера, отраженный от обратной стороны консоли зонда АСМ, попадает на фотодетектор, на котором происходит смещение пятна лазера [2]. По изменению его положения система управления определяет расстояние между зондом и образцом, а затем прикладывает соответствующее напряжение на пьезосканер для поддержания постоянного расстояния или силы взаимодействия между ними [2].

Помимо топографических изображений зонд АСМ позволяет визуализировать поверхностные свойства материалов и получать карты распределения сил адгезии, магнитных сил, проводимости, модуля упругости [1]. Таким образом исследователь открывает для себя новый наномир.

Подобные визуализации можно творчески обработать, добиваясь наилучшего контраста и максимально акцентируя внимание на определенных деталях материала (рис. 3–5). Интерпретируя снимки, перекрашивая их в различные цвета, можно достичь сходства с вещами и объектами, которые встречаются в жизни человека. Так, например, изображения, приведенные на рис. 1, после обработки очень напоминают известные всем объекты или места.

На рис. 2а и 3б представлены работы-победители конкурса научной фотографии и визуализации

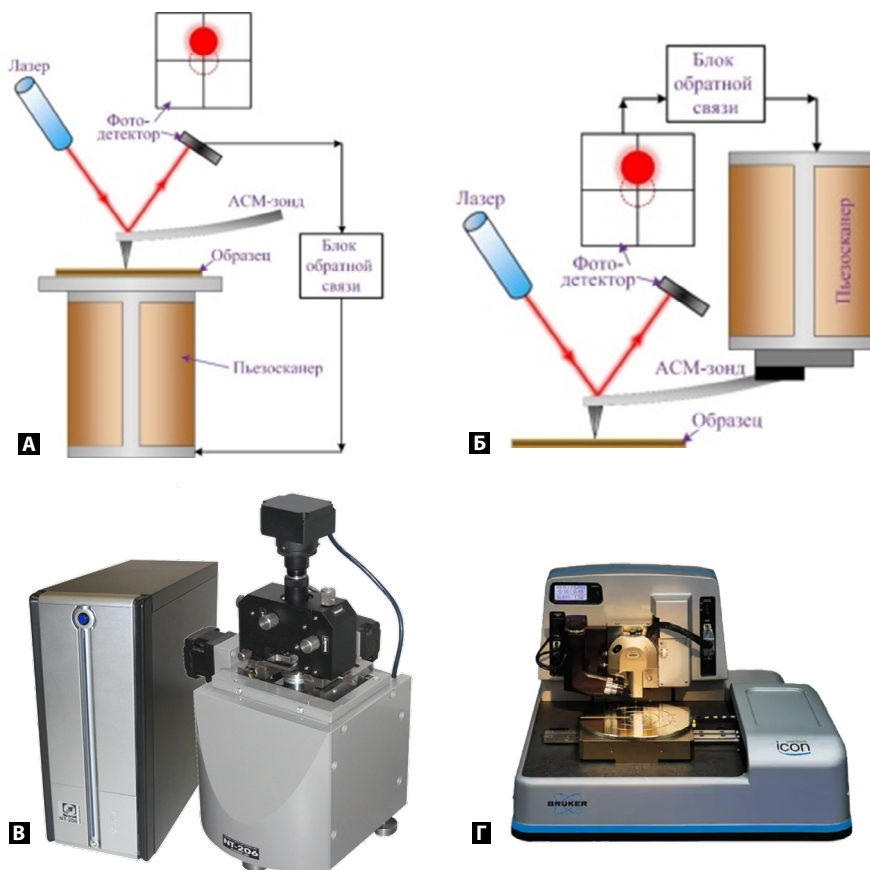


Рис. 1. Схемы блока сканирования атомно-силового микроскопа с регистрацией отклонения зонда АСМ по отклонению отраженного луча лазера (а, б) и внешний вид атомно-силовых микроскопов: в – NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь); г – Dimention FastScan (Bruker, США)

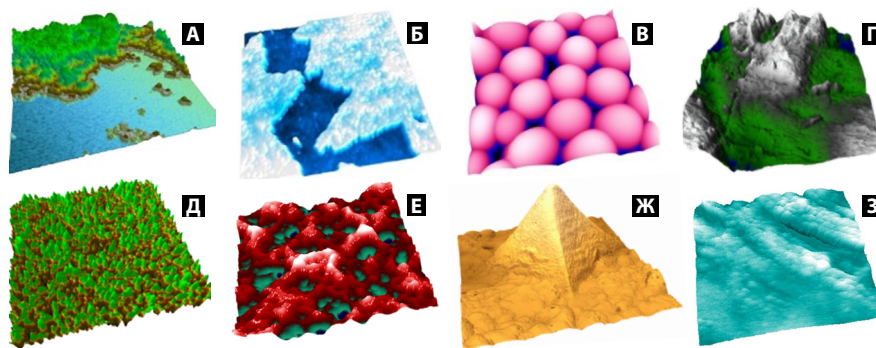


Рис. 2. АСМ-изображения различных структур: а – нанопластины графена с наночастицами магнетита, 10 мкм² (схоже с тропическим островом); б – пленка графена, 5 мкм² (схоже с ледником); в – полимерные сферы, 4 мкм² (схоже с Bubble Gum); г – сталь после кавитации, 8 мкм² (схоже с горами); д – покрытие AlSiN, 10 мкм² (схоже с ростками зелени); е – покрытие MoN, 10 мкм² (схоже с кораллами); ж – перевернутое изображение отпечатка от четырехгранного алмазного индентора Виккерса на покрытии MoCN, 13 мкм² (схоже с пирамидами в Египте); з – одна из граней отпечатка четырехгранного алмазного индентора Виккерса на покрытии MoN, 2 мкм² (схоже с морскими волнами)

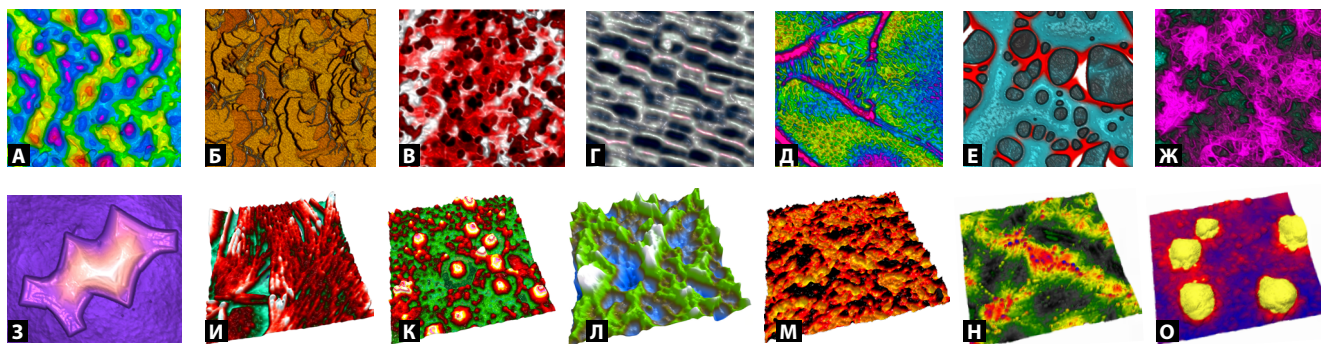


Рис. 3. АСМ-изображения различных структур: а – покрытие ZrN, 1 мкм²; б – поверхность титана, 3 мкм²; в – покрытие ZrN, 2 мкм², режим адгезии; г – жесткий диск, 5 мкм², режим магнитных сил; д – гиалуроновая кислота, 10 мкм²; е – пленка полиметилметакрилата, 20 мкм²; ж – нанотрубки, 10 мкм²; з – тромбоцит, 50 мкм²; и – стекло, 10 мкм²; к – лимфоциты в окружении тромбоцитов, 50 мкм²; л – покрытие MoN, 10 мкм²; м – покрытие MoN, 30 мкм²; н – аморфное покрытие Al-Si-N, 3 мкм²; о – нанокристаллическое покрытие Al-Si-N, 3 мкм²

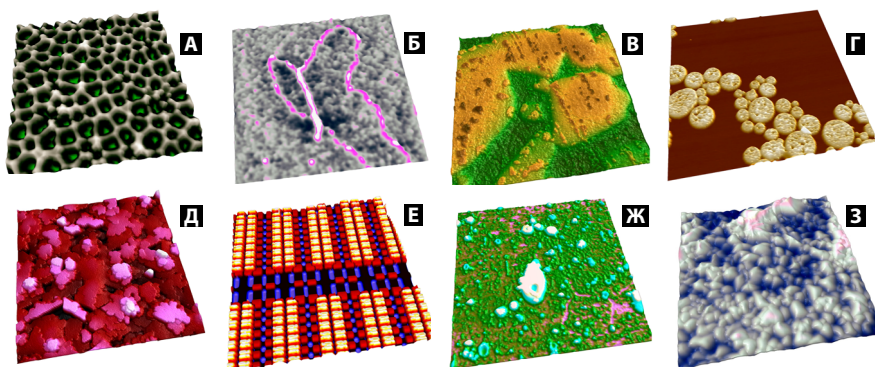


Рис. 4. АСМ-изображения различных структур: а – пористый оксид алюминия, 5 мкм²; б – молекула ДНК, 500 нм²; в – карбидокремниевая керамика, 10 мкм²; г – поливинилкарбазол, 10 мкм²; д – покрытие GaN, 10 мкм²; е – элемент микросхемы, 40 мкм²; ж – покрытие NiP, 60 мкм²; з – покрытие VN, 5 мкм²

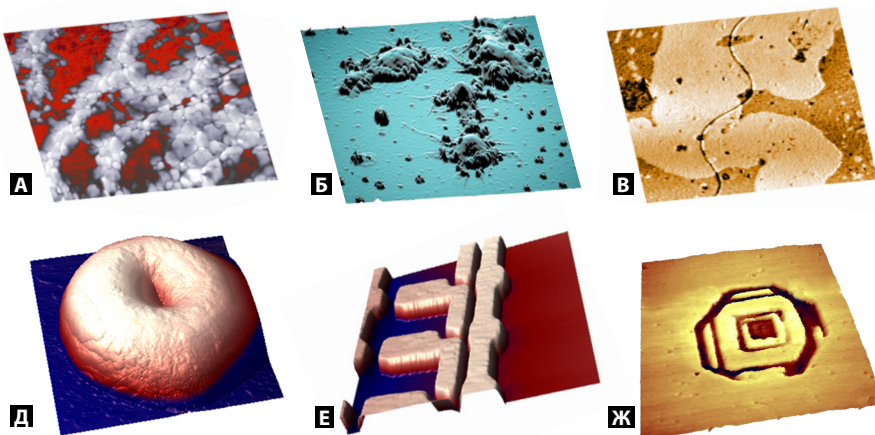


Рис. 5. АСМ-изображения различных структур: а – слой трибографитизации на алмазоподобных покрытиях, 10 мкм², режим фазы; б – клетки лимфобластомы, 20 мкм²; в – молекула ДНК, 3,5 мкм²; г – эритроцит, 8 мкм²; д – элемент микросхемы, 20 мкм²; е – механическая нанолитография, 15 мкм²

«Visualization of Science» 2019 г., который организовала редакция журнала «Наука и инновации» (№1 (191) 2019 г.) [3].

Они выполнены на атомно-силовых микроскопах НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) и Dimention FastScan (Bruker, США) (рис. 1 в, г). Обработка сделана в программе SurfaceExplorer и NanoScope Analysis 1,8 этих же предприятий соответственно. Следует отметить, что схема сканирования, при которой образец перемещается вокруг неподвижного зонда (рис. 1а), реализована на отечественном АСМ НТ-206, а движение зонда относительно неподвижного образца – на американском (рис. 1б).

На рис. 3–5 приведены некоторые изображения различных материалов, полученные на атомно-силовом микроскопе. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецова Т.А. Нанодиагностика и атомно-силовая микроскопия / Т.А. Кузнецова, В.А. Лапицкая, С.А. Чижик // Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. Творческая жизнь Института. 70 лет. – Гомель, 2022.
2. Техника наноконтроля: лабораторный практикум: в 2 ч. / сост.: С.А. Чижик, Т.А. Кузнецова. – Минск, 2011. – Ч. 1.
3. Увидеть невидимое // Наука и инновации. 2019. №1. С. 81–84.

Эталонная база Республики Беларусь в области наноизмерений

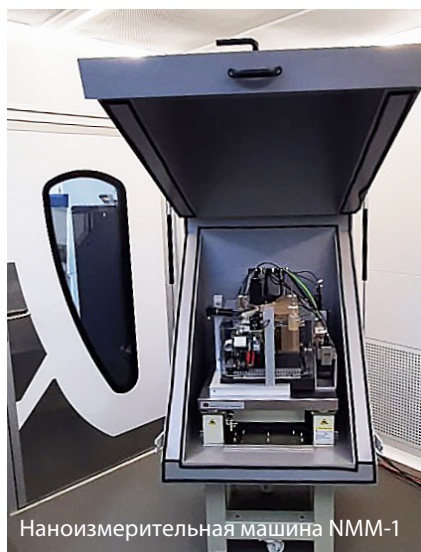


Владимир Макарович,
начальник
производственно-
исследовательского отдела
измерений геометрических
величин БелГИМ

Современный мир немыслим без совершенствования смарт-технологий и искусственного интеллекта, что обуславливает динамичный рост микро- и наноэлектроники, создания новых материалов, оптических покрытий и т.д. Внедрение инноваций, в свою очередь, невозможно без прогресса в области измерений, что предопределяет появление новых приборов, эталонов и методов.

В соответствии с Концепцией формирования и развития наноиндустрии в Республике Беларусь, утвержденной постановлением Совета Министров от 18.02.2013 г. №113, данное высокотехнологичное направление определено как первостепенная задача, решение которой должно способствовать интенсивному экономическому росту нашей страны, обеспечивать качественно новый технологический уровень отраслей промышленности, улучшать экологию и условия жизни людей.

Согласно плану мероприятий по реализации положений данной Концепции, Госстандарт подготовил предложения по организации деятельности специализированной лаборатории эталонов в нанометровом диапазоне от 1 нм до 25 мм. Исполнителем задания 2.19. «Создать и оснастить лабораторию эталонов в нанометровом диапазоне измерений», включенного в подпрограмму «Эталонные и научные приборы» на 2016–2020 гг., был определен БелГИМ. В результате успешного ее выполнения в 2022 г. создан и



Наноизмерительная машина NMM-1

введен в эксплуатацию Национальный эталон единицы длины – метра в нанометровом диапазоне. Он представляет собой комплекс средств измерений и вспомогательного оборудования, расположенных в чистом помещении, где поддерживаются стабильные климатические условия (20 ± 1) °C и чистота классов 6 и 8 ИСО с помощью кондиционирования и очистки воздуха.

В состав эталона входят следующие средства измерений:

- наноизмерительная машина с диапазоном 25x25x5 мм и

погрешностью от 1 до 10 нм, которая позволяет работать с различными объектами наноиндустрии. В настоящее время аналогов ей в странах ЕАЭС нет, а имеющиеся устройства не располагают такими характеристиками;

- спектральный эллипсометр с диапазоном от 0,1 нм до 40 мкм и погрешностью ± 1 нм для измерения тонких и сверхтонких пленок.

Во время создания эталона были обновлены методики калибровки МРП МК «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь, меры ширины шага и высоты ступени». Техническим комитетом по стандартизации НТК BY №36 «Нанотехнологии» разработаны и приняты следующие стандарты: ГОСТ ISO/TS 11888-2019 «Нанотехнологии. Определение характеристик многостенных углеродных нанотрубок. Характеристики мезоскопической формы»; ГОСТ ISO/TS 15590-2020 «Нанотехнологии. Распределение по размерам и концентрация неорганических наночастиц в водной среде с помощью масс-спектрометрии одиночных частиц с индукционно-связанной плазмой»; ГОСТ ISO/TS 80004-2019 «Нанотехнологии. Часть 12. Квантовые явления. Термины и определения».

Появление эталона позволило решить проблему метрологического обеспечения в сфере нанотехнологий, повысить качество и достоверность измерений в нанометровом диапазоне, обеспечить экономию валютных средств предприятий, повысить конкурентоспособность продукции, а также, с учетом внешней конъюнктуры, защитить национальные интересы страны в области наноизмерений. ■



Спектральный эллипсометр Uvisel Plus, HORIBA



КЛЮЧ К НАНОПРОДВИЖЕНИЮ: от исследований до готовых решений



Применение наноразмерных частиц в материалах дает немало преимуществ: повышает их прочность и долговечность, привносит новые ценные свойства, способствует экономии исходного сырья и расходов на производство, делая его более эффективным. Однако путь нанотехнологий в разные сферы промышленности не так уж прост, ведь внедрение нового предполагает изменение устоявшихся практик и готовность к пересмотру привычных подходов. Об особенностях разработки и продвижения наноструктурированных материалов на рынок – наш разговор с академиком Сергеем ЖДАНКОМ, основателем предприятия «Передовые исследования и технологии».

Для работы с материалами на наноразмерном уровне нужны серьезный научный фундамент и особые компетенции. Означает ли это, что они в равной степени необходимы и потребителю этой наукоемкой продукции, или их следует «растить»? Готов ли реальный сектор экономики к ее внедрению, есть ли у него такая потребность, заинтересованность?

– Наноразмерные частицы как потенциальный компонент для производства новых или улучшения свойств традиционных материалов сами по себе не представляют интереса для промышленности, если они не интегрированы в производственные процессы. Да, они востребованы вузами, научными учреждениями для исследовательских целей, но в очень незначительных количествах. Поэтому основная идея созданного мной 12 лет назад предприятия состояла не только в организации массового производства наноструктурированных материалов, но и в разработке технологий и методов их применения в ведущих отраслях народного хозяйства – строительстве, машиностроении, энергетике, полимерной и т.д. Выпускаемый в промышленном масштабе базовый продукт у нас один – углеродные нанотрубки. В запатентованной нами технологии в качестве исходного сырья для их получения используется газ пропан-бутан. В основе производственного цикла лежит специальный каталитический процесс, осуществляемый в реакторе оригинальной конструкции, где обеспечивается определенный температурный и гидродинамический режим – цикл полностью замкнутый. Синтезированные наноразмерные частицы обладают рядом уникальных физических и химических свойств, но для их применения в реальном производстве необходима интеграция в технологические процессы в каждом конкретном случае, чтобы избежать их конфликта с традиционными

материалами и обеспечить стабильность и устойчивость всего цикла. В частности, при изготовлении автомобильных шин используется один тип пластификатора на основе углеродных нанотрубок, в асфальте, битумах – другой, бетоне – третий. Все это требует отдельных системных исследований, которые осуществляются на нашем предприятии по каждому направлению применения производимых нами материалов. Они касаются оптимизации распределения частиц по размерам, их диспергирования, рецептуры составов, подбора стабилизаторов. В этом состоит наша основная, решаемая в каждом конкретном случае задача по применению углеродных наноструктурированных материалов в производстве. Мы стремимся к тому, чтобы поставлять на рынок не сами наноразмерные частицы, а различные добавки на их основе, то, что на Западе называется *ready solution* – готовые решения для промышленности.

В каких отраслях, на ваш взгляд, применение наноматериалов могло бы совершить революцию, принести наибольшую отдачу?

– Говорить о некоем прорыве, думаю, рано, в работе с наноразмерными структурами еще очень многое предстоит сделать. Но, исходя из нашего опыта, первым, с чего мы начали, были строительные материалы: бетоны, асфальт, кирпич, компо-

зиты. На момент начала наших исследований бытовало мнение, что прочность модифицированных наноразмерными частицами материалов зависит от механических свойств добавляемых наночастиц, которые, как известно, обладают большой прочностью. А углеродные нанотрубки – основной производимый нами продукт – в 100 раз прочнее стали и в 5 раз легче алюминия. Нам удалось доказать, что эффект от их использования в качестве добавок в композиционные материалы состоит не в простом армировании, а в том, что они инициируют образование более совершенной структуры материала, обладая свойством быть центрами кристаллизации или полимеризации. Например, производство бетона – это процесс кристаллизации гидроокислов кремния и кальция. Соответственно, его прочность резко возрастает и, что важно, примерно в 4 раза ускоряются сроки ее набора. Эти материалы мы испытали практически во всех частях света: в Америке, Европе и Азии – Южной Корее и Китае – и сейчас поставляем их на рынок в виде пластифицирующих добавок. Чтобы достичь высокого качества бетона, требуется примерно 10 г углеродных нанотрубок на тонну цемента. Основной проблемой на пути к массовому применению наноструктурированных материалов является разработка технологии их правильного диспергирования при введении в исходный состав технологических смесей. При производстве бетона на тонну цемента идет примерно тонна воды, тонна песка и т.д. Поэтому необходимо мизерное количество углеродных нанотрубок равномерно распределить в 3–4 тоннах исходной бетонной смеси. Мы решили эту проблему. Разработали и запатентовали способ и оборудование, обеспечивающее необходимую степень диспергирования, и начали выпускать добавки – так называемые гиперпластификаторы, влияющие на качество кристаллических структур, образующихся в процессе набора прочности бетона. Замечу, один из таких гиперпластификаторов был испытан также на вспомогательных объектах Белорусской АЭС – мы продемонстрировали, что наши добавки существенно дешевле и лучше, чем зарубежные аналоги, применение которых закладывалось российскими проектировщиками станции. Что касается других отраслей, где мы прокладываем себе дорогу, то это в первую очередь производство электрохимических аккумуляторов, накопителей электрической энергии. В процессе их зарядки-разрядки образуются кристаллические структуры, которые участвуют в электрохимических реакциях, и мы с помощью углеродных нанотрубок контролируем их размеры, кото-



рые влияют на ресурс и эффективность накопителей энергии. В результате КПД свинцово-кислотных аккумуляторов возрастает на 15–20% и, главное, срок их службы увеличивается в 4 раза. Сейчас мы сотрудничаем с несколькими крупными российскими компаниями, которые занимаются производством накопителей энергии для энергетической, аэрокосмической и машиностроительной отрасли. Еще одна сфера применения углеродных нанотрубок, развиваемая нами в последние годы, – резинотехнические изделия: шины, протекторы, прокладки и др. Это перспективное направление, потому что надежность подобных изделий критически важна для авиационной, космической, военной, гражданской техники. Достаточно вспомнить гибель американского космического челнока «Челленджер»: катастрофа была связана с тем, что прокладку, используемую в аппарате, изготовили из резины, не предназначенной для резких перепадов температуры. При запуске же выводившей «Челленджер» на орбиту ракеты температура была рекордно низкой, резина стала хрупкой и потеряла свойства изоляции и герметичности – в результате произошла утечка раскаленных газов и взорвался топливный бак ракеты-носителя, погиб экипаж. Мы смогли показать, что введение в состав резиновой смеси частиц наноструктурированного углерода улучшает структуру соответствующих полимеров, делая ее более совершенной: повышается долговечность изделий, их стойкость к истиранию, химическая стойкость и механическая прочность. В этом ключе мы сейчас работаем с болгарской и российской компаниями, планируем наладить сотрудничество с белорусской «Белшиной». Что касается революции в других отраслях, то в свое время нами был предложен инновационный подход к изготовлению синтетических волокон – ПАН-волокна на основе полиакрилонитрила. При добавлении углеродных нанотрубок в процесс производства волокон их прочность значительно возрастает. Сейчас во всем мире активно идет переход к композитным материалам на основе углеродного волокна и стекловолокна – их используют прежде всего в самолетостроении. Мы разработали собственную технологию ввода углеродных нанотрубок в полимер-



ную основу композитного материала, что позволило существенно улучшить его механические свойства и снизить вес изготавливаемых на его основе изделий. В этой сфере мы активно сотрудничаем с научными организациями Саудовской Аравии.

Есть ли у вас конкуренты в России и других странах? Ведь рынок нанотехнологий демонстрирует постоянный рост, и около 30% его приходится именно на углеродные нанотрубки. В чем преимущество вашей разработки?

– В России до недавнего времени основным производителем углеродных нанотрубок являлась компания ОКСИАЛ. В основе технологии этой компании лежит использование плазмы для нагрева как каталитической поверхности, так и используемого в процессе синтеза углеводородного газа. Мы разрабатывали соответствующую технологию в Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси еще в начале текущего столетия, когда я был директором этого института, и даже изготовили несколько промышленных реакторов на ее основе для экспорта в Сингапур и Саудовскую Аравию. Позже, уже на созданном нами предприятии, мы от этой технологии отказались, потому что плазменные технологии являются энергозатратными, и производимые на их основе углеродные нанотрубки неконкурентоспособны. Если закладывать плазменную технологию в основу производства, то цена продукции вырастает примерно в 10 раз. Поэтому первое, что мы сделали, – сосредоточились на разработке гораздо более экономичного подхода и запатентовали его. Наша уникальная технология обладает рядом преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами. Конечно, сейчас много делается в области наноразмерных материалов в Японии, Корее, Китае, но мы конкурентоспособны благодаря собственной технологии. Более глубокое понимание процессов позволяет нам предложить дешевый способ получения конечного продукта. А это очень важный аргумент при современных массовых применениях углеродных нанотрубок. В КНР, например, выпускаются сотни тонн углеродных нанотрубок в год только для применения в литий-ионных аккумуляторах. Мы в Минске изготавливаем несколько тонн углеродных нанотрубок в год – в масштабах республики это крупное производство. Потребность же мирового рынка составляет сотни, тысячи тонн. Рынок быстро растет. Но наша стратегия – не наращивание объемов, а разработка новых рецептур, новых направлений применения углеродных наноструктурированных

материалов. Мы беремся за задачи, где применение углеродных нанотрубок требует глубокого понимания физики и химии технологических процессов, и благодаря квалификации и опыту работающих у нас ученых и инженеров мы обладаем рядом преимуществ по сравнению с конкурентами. Поэтому основной упор на предприятии делается на научные и инженерные кадры: на разных этапах развития предприятия у нас работали десятки кандидатов и докторов наук. Мы мобильны, быстро откликаемся на потребности рынка и имеем автоматизированное круглосуточное производство углеродных нанотрубок, не требующее большого количества персонала.

С какими сложностями при коммерциализации вы сталкиваетесь?

– Прежде всего, развивая производство, мы понимали, что создали новый продукт, который до этого в Беларуси не существовал, поэтому запатентовали его, чтобы защитить результаты своего интеллектуального труда. Далее сосредоточились на технических условиях, позволяющих применять их в промышленности. Следующий шаг – коммерциализация, необходимость взаимодействия с рынком. Сразу замечу, что для людей науки он особенно сложен. Но благодаря нашему неоспоримому преимуществу – готовности и возможности рисковать, чего, к сожалению, не предусматривает современная организация отечественной науки, мы продвинулись и в этом направлении. Должен заметить, что во время выступления на I съезде ученых Республики Беларусь мной поднимался вопрос том, что если стоит задача сделать что-то принципиально новое, право на ошибку должно быть предусмотрено априори. Об этом свидетельствует и мировой опыт: из 10 инновационных компаний, продвигающих на рынок свои идеи, только одна оказывается жизнеспособной. Конечно, государство не может финансировать программу, где из 10 заданий лишь одно может быть эффективно. Вот здесь и открывается поле работы для частных компаний: продвигая свои новые идеи, они сознательно идут на риск, опираясь на собственные ресурсы. Собственно, по этому пути пошла и наша компания. Академическая наука, как правило, ориентирована на оказание услуг: исследования, оптимизация, модернизация, а чтобы быть успешным на рынке, необходимо производить что-то самому и, как правило, в масштабе целой отрасли. К этому мы и стремимся. Успех зависит не только от качества продукта, материала, но и от заинтересованности потребителей, уровня конкуренции.

Скажу, что в Беларуси, России, Казахстане и других странах, где мне доводилось бывать, в строительной отрасли используются зарубежные химические добавки: швейцарские, немецкие. Как правило, привлечение конкретных пользователей к использованию вашего продукта является сложной задачей. Убедить потребителей перейти на новый материал, который и лучше, и дешевле, непросто, так как строительство и строительная наука достаточно консервативны, отдают предпочтение традиционным материалам. Мы же со своими новыми подходами в какой-то степени совершаем в отрасли переворот, и требуется большая работа по преодолению сложившихся в ней стереотипов. К примеру, для производства бетона одинаковой прочности и потребительских свойств нужен 1% обычной добавки, в то время как нашей достаточно 0,5%. Ее использование при строительстве метро в Саудовской Аравии показало, что при изготовлении железобетонных изделий рентабельность возрастает примерно на 15–20% за счет резкого ускорения сроков набора прочности, уменьшения потребления цемента и воды, которая в пустынных странах дефицитный ресурс. Активно работаем сейчас и на рынке Союзного Государства. Из-за санкций поставщики химических добавок, ранее монопольно контролировавшие этот рынок, свернули свое производство. Для продвижения нашего продукта складываются благоприятные обстоятельства, и мы их стараемся использовать.

Вы продаете готовый продукт, а как насчет передачи технологии?

– На данном этапе для нас важно продавать наши добавки. Возьмем конкретный пример. Болгарская компания Monbat, выпускающая аккумуляторы для всего европейского рынка, провела испытания наших материалов и, получив хороший результат – срок службы батарей увеличился в 4 раза, вышла с предложением организовать производство нанодобавок в этой стране. Мы его приняли и наладили их выпуск непосредственно у них же на заводе, что обеспечило полную интеграцию нашего продукта в общую технологическую цепочку. По такому же принципу – приблизить производство к заказчику – мы стараемся выстраивать отношения и с другими нашими партнерами. Например, построили установки по производству углеродных нанотрубок в Калининграде и в Саудовской Аравии. У нас есть стандартный контракт, в котором оглашаются условия использования наших установок, предо-

ставления нашего материала для использования на предприятии заказчика. Если мы поставляем установку, в договоре запрещено ее копирование, наши права сохраняются. Где-то мы идем на создание совместных предприятий, когда нами предоставляется технология, а заказчик обеспечивает финансовую сторону вопроса, в том числе и строительство установок. В общем, отрабатываются разные модели, в зависимости от рынка. К примеру, в России, где можно гарантированно планировать совместную деятельность на будущее, нам проще создать совместное предприятие. Там есть финансовые ресурсы, у нас – ноу-хау. Перевод национальных патентов в международные – очень дорогостоящее мероприятие. Такие вложения оправданы, если в стране патентования есть сформировавшийся спрос, необходимо защититься от конкурентов. Мы пока не пользуемся этими инструментами.

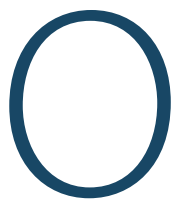
Как в целом вы оцениваете перспективы нанотехнологий?

– Переход промышленности на нанотехнологический уровень – это вопрос выживания человечества. Полагаю, у нашей цивилизации нет другого выхода. Мы не можем идти дальше по экстенсивному пути развития, расширяться, из большого дела малое. Надо двигаться по интенсивному пути, снижать количество используемого сырья на производство потребляемой человечеством продукции. Экономия и получение нового качества материалов – вот основа развития на ближайшие 100 лет. Металло-, материало- и энергоемкость процессов будут падать. Уже сегодня с помощью нанотехнологий создаются объекты, меняющие структуру исходного материала, требуется меньше исходных ресурсов. Например, экономия до 20% бетона не только сэкономит средства, но и улучшит климат и экологическое состояние планеты, значительно сократив выбросы парникового газа при производстве цемента. Пришло время осознать это, переориентировать стратегии развития на новый курс. Опять же, если говорить об улучшении износостойкости изделий в космической технике, автомобилестроении, то при использовании нанотехнологий ее реально повысить в 10 раз. А увеличив в 4 раза ресурс батарей – сократить потребление свинца и других токсичных материалов. То же самое касается композитных материалов, когда будет существенно снижен расход алюминия, титана. Еще один важный вектор, который хотелось бы обозначить – аддитивные технологии. Они развились настолько, что вскоре

позволят исключить из технологической цепочки производства обработку металлических заготовок – необходимые элементы можно будет печатать на 3D-принтере. Пока проблема в том, что деталям, выполненным таким образом, не хватает прочности, от чего страдают эксплуатационные свойства. И наши наноматериалы помогают справиться с этим недостатком. В этой новой для нас отрасли с новыми задачами – интегрировать наши частицы в порошки для 3D-печати – мы работаем совместно с российскими специалистами. Первые результаты уже есть: углеродные нанотрубки существенно влияют на материал в процессе спекания, когда идет кристаллизация: образуются более совершенные структуры, что является основой для улучшения механических свойств. В итоге получается новое качество изделия. Еще одно перспективное направление – водородная энергия, водородные автомобили. Мы стоим на пороге новой эры, которая грядет за электротранспортом. Будущее – за водородом, я в этом уверен. Атомные станции будут производить его из воды. В Германии, например в Гамбурге, уже есть десяток водородных заправок. Наши южнокорейские партнеры заняты внедрением нанодобавок в устройства по конвертации водорода в электричество, что позволяет их делать более надежными. Наноразмерные частицы помогают решать и проблему хранения водорода на борту автомобиля – если удастся сделать более прочный бак, в который можно закачать значительный объем газа под большим давлением. Мы продолжаем работать с организациями НАН Беларуси – Объединенным институтом машиностроения, Институтом тепло- и массообмена и другими, и на безвозмездной основе передаем им свои материалы. Наша задача состоит в максимально широком распространении сферы применения нанодобавок – при разработке новых материалов, лекарств, удобрений, пищевых продуктов и т.д. Хочу проинформировать, что любое белорусское научное учреждение может их получить на безвозмездной основе. Мы открыты для сотрудничества, публикуем результаты своих исследований, и несколько аспирантов БНТУ защитились по нашей тематике, применяя предоставленные нами углеродные нанотрубки. Обсуждается возможность нашего участия в Госпрограмме научных исследований по новым материалам со своим заданием, на выполнение которого мы готовы выделить собственные средства. Я оптимист и считаю, что работы в сфере производства и применения наноструктурированных материалов хватит и нам, и следующим поколениям. ■

Большие маленькие технологии

Современный мир вступил в эпоху формирования VI технологического уклада, динамика которого будет определять глобальные экономические тенденции в течение 50–60 лет. Эксперты прогнозируют, что его ядро составят нано-, био-, генные, молекулярные, информационные технологии, космическая техника, тонкая химия. Заметим, что ведущее место в этом списке отводится нанотехнологиям, которые, вопреки своему названию и благодаря очевидным и доказанным преимуществам микромасштабирования, уже произвели революцию во многих отраслях экономики и, как ожидается, выведут на принципиально новые рубежи информатику, молекулярную биологию, генную инженерию, квантовые технологии, медицину и пр. Есть все основания полагать, что человечество вступает в эру наноиндустрии – такие отрасли, как наноинженерия, наноинформатика, создание нанокomпьютеров, нанобиотехнологии, наномедицина, наноагро- и пищепром, становятся реальностью. На это указывает количество поданных в Американское патентное ведомство патентных заявок за последние 20 лет – около 175 тыс. при среднегодовом темпе роста 9,8%. Кроме того, эксперты считают, что мировой рынок нанотехнологий вырастет к 2028 г. до 183,7 млрд долл.



Огромное влияние на этот процесс оказывает наука. Только за последнее время за работы в области нанотехнологий было присуждено 3 Нобелевских премии: по физике (2007 г., 2010 г.) и по химии (2023 г.).

В первых двух случаях – за открытие эффекта гигантского магнетосопротивления, позволяющего производить запись данных на жестких дисках с атомарной плотностью информации, и опыты с двумерным графеном, а в третьем – за открытие и синтезирование так называемых квантовых точек – полупроводниковых наночастиц.

К этому стоит добавить инвестиционную привлекательность нанотехнологий, которые считаются одним из самых перспективных направлений для капиталовложений. Определились и первые лидеры отрасли, компании, чьи интересы простираются от схемотехники до дисплеев, здравоохранения и др. Крупнейший игрок – американская компания IBM, сыгравшая ключевую роль в нанотехнологиях с того момента, когда ее исследователи предложили рынку сканирующий туннельный микроскоп – инструмент, позволяющий визуализировать атомные структуры. Недавно она продемонстрировала миру чип, изготовленный по 2-нанометровому техпроцессу, способный улучшить многие технологии – от автономных транспортных средств до Интернета вещей. Среди фаворитов – американские фирмы Applied Materials, поставщик оборудования, услуг и программного обеспечения для производства полупроводниковых микросхем и плоскочисловых дисплеев с высоким разрешением, солнечных батарей, и Thermo Fisher Scientific, использующая нанотехнологии для выпуска широкого спектра научного оборудования и инструментов, реагентов и расходных материалов, что вывело ее на ведущие позиции на растущем рынке биофотоники – сегменте, объем которого может превысить 100 млрд долл. к 2027 г. Тайваньская компания по производству полупроводников TSMC, разработавшая технологию 22 нм магниторезистивной оперативной памяти, готовится в 2026 г. начать изготовление чипов по техпроцессу 1,6 нм. Это значительно увеличит плотность и вычислительную мощность процессоров. Нидерландская компания ASML Holding специализируется на литографическом оборудовании для микроэлектронной промышленности, необходимом в том числе для выпуска сверхбольших интегральных схем, флеш-памяти.

Быстрый рост в сфере нанотехнологий демонстрируют китайские производители, среди них Tsinghua Unigroup и China National Chemical

Corporation, чему в немалой степени способствует поддержка со стороны государства и частных инвестиционных фондов. Европейские лидеры в этой области – Германия, Франция и Великобритания – представлены такими компаниями, как BASF, Total и GlaxoSmithKline.

Нанотехнологии и компьютерная индустрия

Производство более миниатюрных и высокопроизводительных полупроводниковых устройств вошло в нанобласть еще в 2000 г. с появлением технологии 90 нм CMOS-топологии – свидетельство того, что наноэлектроника была одной из первых сфер, в которой начали использовать подход «системы атомов» для промышленного применения. Сегодня 14 нм металл-оксидные полупроводниковые полевые транзисторы меньше, чем вирусы, и являются основой блока коммутирующих элементов для всей современной наноэлектроники, обеспечивающей высокопроизводительные и мобильные вычисления. Хотя совсем недавно сложно было даже вообразить, что ноутбуки, мобильные телефоны и другие гаджеты станут такими производительными и легкими, как сегодня, это касается в том числе и интеллектуальных датчиков, наночипов, наноустройств хранения памяти, оптоэлектроники и пр.

Нанотехнологии позволяют создавать инновационные продукты за счет значительных изменений физико-химических, механических, магнитных, электрических и оптических свойств материалов. Развитие и совершенствование Интернета вещей (IoNT) открывает огромный потенциал для изделий телекоммуникационного, промышленного и медицинского назначения. Новый гиперфизический мир датчиков, программного обеспечения и других связанных технологий ускоряет распространение широкоформатной связи через интернет-устройства. Стоит отметить, что масштаб их использования варьируется от простого домашнего потребления до сложного промышленного.

Еще одно применение нанотехнологий в компьютерной и информационной индустрии – искусственный интеллект, машинное обучение и платформы больших данных, давшие толчок развитию Индустрии 4.0 и промышленного сектора. Благодаря им ускорилась автоматизация и точность в промышленности, что уже привело к снижению затрат и количества ошибок. Интегрированные области робототехники, Интернета вещей, искусственного интеллекта

и нанотехнологий часто называют Интернетом робототехники и нановещей, которые формируют новый сегмент – наноробототехнику, позволяющую существенно повысить эффективность и гибкость производственных процессов, скорость и точность в сравнении с традиционной робототехникой.

Трехмерная печать – еще один вектор развития наноконピューтерной отрасли, обладающий преимуществами автономной, интегрированной, интеллектуальной сети для обмена информацией. Она вносит свои коррективы в промышленную инфраструктуру, сводит к минимуму операции постобработки, сокращает количество работающих, уменьшает отходы и потребление ресурсов. Более того, 3D-печать и подобные ей технологии открывают возможность для доступного производства штучных изделий, заточенных под конкретного потребителя. А это значит, что поточные процессы, скорее всего, уйдут в прошлое.

Нано- и биотехнологии

Нанотехнологии граничат с биотехнологией и иногда их трудно разграничить, поэтому научные и инженерные усилия многих стран направлены на то, чтобы ускорить развитие новых прорывных решений в области здравоохранения, материаловедения и других областях. Уже сегодня создаются нанодисперсные формы пищевых веществ, наноинкапсуляты и наномицелляты, пищевые добавки с улучшенными функциональными характеристиками. Производятся новые виды упаковочных материалов, увеличивающие срок годности продуктов питания, обладающие повышенными газо-, фотобарьерными и антимикробными свойствами. Стимулируют эти разработки как рост населения во всем

мире, так и обеспокоенность человечества относительно безопасности и полезности продовольствия.

Ученые добиваются устойчивого повышения урожайности сельскохозяйственных культур без чрезмерного использования пестицидов и удобрений. Датчики и диагностические устройства становятся незаменимыми помощниками для мониторинга качества пищевых продуктов, выявления контрафакта, выводя таким образом противодействие недобросовестной конкуренции на новый уровень. Велика роль исследований, направленных на интеграцию ферментации и нанотехнологий, позволивших разрабатывать биосовместимые, безопасные и нетоксичные вещества и наноструктуры с широким спектром применения в пищевой, перерабатывающей и винодельческой отраслях.

Оказали свое положительное влияние нанотехнологии на управление токсичностью. Так, обычные методы мониторинга пищевых продуктов постепенно заменяются теми, что применяют современные наноматериалы, такие как нанопроволоки, нанокompозиты, нанотрубки, наностержни, нанолисты и др., которые выполняют функцию иммобилизации и маркировки компонентов. Детектирование веществ проводится на молекулярном, диагностическом и иммунологическом уровнях, а также электрохимическом и оптическом. Материалы, начиная от тяжелых металлов и заканчивая микроорганизмами, пестицидами, аллергенами и антибиотиками, могут легко контролироваться еще на стадии переработки.

Активно применяются ДНК-технологии, позволяющие выявлять гены, ассоциированные с хозяйственно ценными признаками, устойчивые к стрессам, инфекционным болезням, а также генам-носителям рецессивных мутаций – генетическим аномалиям. В целом объединение достижений нанотехнологии и молекулярной биологии называют нанобиотехнологией, поскольку речь идет о создании устройств на основе биологических макромолекул с целью изучения или управления биологическими системами. В ней широко используется способность биомолекул к самосборке в наноструктуры. Так, например, липиды могут спонтанно объединяться и формировать жидкие кристаллы. При этом ДНК применяются не только для создания наноструктур, но и в качестве важного компонента наномеханизмов. По мнению ученых, нанобиотехнологии существенно упростят и ускорят решение традиционных проблем генетики и селекции сельскохозяйственных растений – их



Источник: <https://nano.tu-dresden.de/lecture/15>

устойчивости к насекомым-вредителям и сорной растительности.

Нанотехнологии преобразовали процесс биокomпостирования, задействовав в переработке отходов микроорганизмы, что повысило скорость утилизации. Кроме того, ученые работают над созданием биосовместимых нанокомпозиций с улучшенными свойствами, обладающих более низкой токсичностью, антимикробной активностью, термостойкостью и ускоренным биоразложением. Эти разработки отвечают интересам человека и служат охране окружающей среды, поскольку органические отходы перерабатываются в питательные вещества, которые можно использовать в сельском хозяйстве. Развитие, распространение и интеграция нанотехнологий с пищевой промышленностью позволили создать большое количество устойчивых, безопасных и здоровых пищевых продуктов как для человека, так и для животных за счет применения нанокапсуляции. Созданные технологии повышают защитные характеристики и чувствительность биоактивных ингредиентов, предотвращая при этом их нежелательное взаимодействие с другими компонентами, улучшая профили биологической активности и растворимости нанопродуктов, принося пользу для здоровья человека. Однако многие из них находятся на ранней стадии разработки и требуют проведения дальнейших исследований, в том числе на предмет оценки токсичности и безопасности наноматериалов.

Нанотехнологии и АПК

В сельском хозяйстве нанотехнологии ускорили процесс внедрения технологии точного земледелия, что сказалось на условиях усвоения питательных веществ растениями, позволило заблаговременно обнаруживать их болезни. Удобрения после введения в них наноглины и цеолитов становятся более эффективными с точки зрения их влияния на плодородие почвы. Современные концепции умных семян для повышения их урожайности также основаны на использовании нанополимерных смесей. Новые покрывающие соединения защищают семена от различных опасностей окружающей среды, почвенных грибков, вредителей, низких температур почвы, ускоряют прорастание. Гербициды, пестициды, фунгициды и инсектициды совершенствуются благодаря нанотехнологиям. Многие исследования показали, что наноматериалы, такие как оксид меди, оксид цинка, гидроксид и оксид магния, также эффективны против вредных насекомых. Велика вероят-



Нанопестициды могут стать альтернативой обычным инсектицидам

Источник: www.azonano.com

ность их применения для модернизации птицеводства и животноводства – к примеру, в части обработки и дезинфекции. Развивается направление насыщения пищевого сырья биоактивными компонентами – витаминами в виде наночастиц.

Нанобиотехнологии широко применяются для борьбы с пищевыми патогенами в птицеводстве, такими как *Salmonella* и *Campylobacter*, сохраняя при этом доступность, безопасность и увеличивая срок годности производимых продуктов из мяса птицы.

Ионообменные наносубстраты играют важную роль на стыке нанотехнологий и биотехнологий, обеспечивая высокую производительность и селективность в различных приложениях. Они нашли применение в биосепарации и очистке таких биомолекул, как ферменты, белки, нуклеиновые кислоты; в качестве чувствительных элементов в биосенсорах для детектирования ионов, биомаркеров и других аналитов, иммобилизации ферментов и катализаторов, удаления тяжелых металлов, радионуклидов и других загрязнителей из водных сред.

Наносеребро, наномедь широко используются в фильтрах и других деталях оборудования молочной промышленности для ингибирования процессов брожения и скисания молока, дезинфекции сельскохозяйственных помещений, инструментов, при упаковке и хранении молочнокислой продукции.

Нанотехнологии и упаковочная промышленность

Упаковочная индустрия также пополняет свои достижения за счет наноматериалов. Разрабатываемые для пищевых продуктов нанокомпозиции

могут включать средства против слеживания, нанодобавки, системы доставки нутрицевтиков и многое другое. Наномасштабные компоненты, примененные при производстве материала для упаковки, повышают ее механическую стабильность и улучшают термические и барьерные свойства. Интеграция наносенсоров и наноиндикаторов в упаковку пищевых продуктов позволяет контролировать сохранение свежести или загрязнение продукта микроорганизмами, вызывающими его порчу, патогенными микроорганизмами, аллергенами или токсинами в процессе транспортировки и хранения. Важно отметить, что нанотехнологии проникают и в другие отрасли, такие как текстильная, кожевенная и косметическая промышленность, и сулит им большие выгоды.

Нанотехнологии и строительство

С внедрением наноматериалов в этот сектор во многом связывают и его эффективность. К примеру, введение диоксида кремния в цемент влияет на такие его характеристики, как сжимаемость, прочность текстуры и пористость, благодаря чему он поглощает меньше воды по сравнению с традиционными цементирующими веществами. Такой подход помогает уменьшить количество цемента в бетоне, делая его более экономичным и экологически чистым, известным как «зеленый бетон». Помимо этого, революционные нанотехнологии применяются в таких материалах, как сталь, стекло, бумага, дерево и др. Наночастицы аэрогеля, имеющие очень низкую теплопроводность, включают в изоляционные материалы, чтобы снизить потери тепла и улучшить энергоэффективность зданий. Наночастицы металлов или оксидов вводятся в краски, покрытия, изоляционные материалы, повышая их устойчивость к коррозии. Некоторые наноматериалы обладают гидрофобными или гидрофильными свойствами, которые могут создавать поверхности, отталкивающие воду или способные легко смывать загрязнения. Это может быть полезным для создания самоочищающихся окон, фасадов или кровельных материалов. На рынке уже появились изоляционные и интеллектуальные оконные технологии – вакуумные изоляционные панели, материалы с фазовым переходом, обеспечивающие высокий теплоизоляционный эффект, экономию энергии и улучшающие качество воздуха в домах.

Нанотрубки, в том числе углеродные и глиноподобные, используются для модификации резино-

вых смесей, применяемых в шинной индустрии, что позволяет повысить их эксплуатационные характеристики – прочность, износостойкость и сцепление с дорожным покрытием, термостойкость и сопротивление старению шин.

Некоторые из характеристик нанопродуктов используются для усиления структурного состава материалов, в том числе огнестойкости, вяжущих качеств, звукопоглощения, повышения отражательной способности поверхностей.

Ученые работают над созданием микроинкапсулированных заживляющих полимеров, обладающих «целебными» свойствами, способствующими устранению трещин в зданиях. Такой материал, как сталь, исследуется на предмет изменения его конструкционных характеристик: коррозионной стойкости, свариваемости, простоте использования при проектировании и строительных работах. Точно так же углеродные нанотрубки, наностержни и нановолокна все чаще заменяют материалы из стали. Эти наноструктуры вместе с образованиями наноглины повышают механические свойства материалов и таким образом прокладывают путь к новой отрасли гражданского строительства с точки зрения наноинженерии. Кроме того, наноструктуры диоксида титана, цинка и других металлов используются для производства фотокаталитических продуктов со встроенными антипатогенными, самоочищающимися, водо- и микрооботалкивающими технологиями. Аналогичным образом технологии квантовых точек начали применяться для производства фотоэлектрических элементов, что способствует рациональному накоплению солнечной энергии.

Нанотехнологии и транспорт

Современное автомобилестроение является одной из самых новаторских отраслей промышленности, а нанотехнологии и наноматериалы – инструменты, которые могут существенно изменить подходы к производству автотранспорта. Буквально каждый узел или деталь в конструкции автомобиля может быть в значительной степени усовершенствован при их помощи. Уже разработаны силикатные нанокompозиты на основе нейлона-6, термопластичных олефинов, каучуковые и биоволокнистые нанокompозиты, биопенопласты, углерод-полимерные нанокompозиты с использованием нанотрубок, нанокрасители, отталкивающие грязь с поверхности облицовки, самоочищающиеся и противобледенительные составы, а также многофункциональные наноуглепластики с плотностью 400 кг/м³,



Концепт-кар BMW i Vision Dee (выставка CES 2023) использует технологию E-Ink для изменения цветов и добавления узоров с помощью различных электрических зарядов

Источник: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/driving-future-nanotech-auto-electronics>

позволяющие изменять первоначальный цвет окраски по желанию потребителя. Автомобили, в которых используются изготовленные с применением нанотехнологий детали, демонстрируют более длительный срок службы, а в перспективе будут обладать свойствами «саморегенерации» – возможностью самоустранять дефекты, получаемые в процессе эксплуатации. Хотя первоначальные инвестиции в наноавтоматизированную индустрию очень высоки, тем не менее и ожидаемые результаты могут стать более впечатляющими. В основном это касается производства автомобильных деталей и расходников – двигателей, красок, материалов покрытий, подвесок, тормозов, смазки и выхлопных систем. Использование нановинок повлияет на вес автомобилей, их износостойкость, потенциал скольжения, долговечность покрытия. Все это в конечном счете сократит затраты, снизит себестоимость и расширит ассортиментный ряд автомобилей будущего. Наноразмерные датчики и системы связи расширят возможности автономного вождения, повышая его безопасность и эффективность. Точно так же разработка суперконденсаторов все чаще основывается на нанотехнологиях. Резиновые наполнители, каркасы из конструкционных композитных материалов на базе высокопрочных волокон – углеродных нанотрубок, наноэлектронных компонентов, нанотекстиля и нанопокровов для интерьера и экстерьера автомобиля, наносенсоров – лишь некоторые из нанотехнологических новинок. Благодаря им предприятия отрасли быстро развиваются. Среди лидеров – финская компания Nanocomp, ведущий производитель усиленных нановолокнами пластиковых композитов, обладающих высокой прочностью и легкостью, для создания кузовных панелей и деталей подвесок.

Американская фирма QuantumSphere занимается разработкой наноматериалов и наноэлектродов для аккумуляторов, а Nanosonic специализируется на выпуске покрытий с улучшенными свойствами антикоррозии и защиты от износа. Чикагская компания Nanosteel – ведущий разработчик умных материалов для автопрома. Созданные ею наностали обладают высокой прочностью и устойчивостью к износу, что позволяет выпускать более легкие и безопасные автомобильные конструкции. Американская компания NanoMech – создатель прорывных наноинноваций для улучшения трения и износостойкости, а также наномасел и наножидкостей. Ожидается, что нанотехнологии будут играть ключевую роль в формировании будущего автомобильной отрасли, способствуя созданию более экологических и энергоэффективных транспортных средств благодаря достижениям в области хранения энергии и аккумуляторных технологий. Еще более интересно будущее автомобильной электроники, которое за счет нанотехнологий может создать более устойчивую, связанную и визуально привлекательную транспортную экосистему.

Нанотехнологии и возобновляемые источники энергии

Считается, что возобновляемые источники энергии решат многие экологические проблемы современности, и нанотехнологии все активнее будут проникать в производство солнечной, водородной, био- и геотермальной энергии и энергии приливных волн. Существует немало исследований и приложений, которые включают наноинженерию плоских солнечных пластин, пластин прямого поглощения, параболических желобов, волнистых пластин и тепловых трубок. В большинстве этих устройств для сбора солнечной энергии используются наножидкости, играющие решающую роль в повышении их эффективности. К примеру, наночастицы в солнечных коллекторах прямого поглощения позволяют повысить паропроизводительность по сравнению с кипением базовой жидкости. Но говорить об этом пока рано.

По мнению исследователей, нанотехнологии могут увеличить доступную мощность аккумулятора и сократить время зарядки и вес. Эти преимущества, например, могут достигаться покрытием поверхности электрода наночастицами. Применение наноматериалов может увеличить срок службы батареи («зарядки-разрядки»), препятствуя ее разрядке. Необычайная электропроводность

наночастиц, таких как углеродные нанотрубки, может применяться при изготовлении электрических кабелей и линий электропередачи.

Ученые научились внедрять кремниевые наночастицы в графен, выращивая кремниевые нанопроволоки на подложке из нержавеющей стали. Батареи, использующие электроды из таких материалов, могут в 10 раз повысить плотность энергии обычных литий-ионных накопителей энергии. В долгосрочной перспективе ожидается существенный вклад в устойчивое энергоснабжение и глобальную политику защиты окружающей среды.

Нанотехнологии и деревообрабатывающая промышленность

Нанотехнологии затронули производство биоразлагаемых материалов, бумажной, целлюлозной продукции, мебели, консервантов для древесины, древесных композитов и материалов на основе лигноцеллюлозы. Одним из путей их применения в деревообработке являются наноматериалы, полученные из древесины. Целлюлоза в наноформе широко используется в таких отраслях, как электроника, сенсорные технологии, пищевая, медицинская и косметическая промышленность. Более того, ее функциональные характеристики – долговечность, поглощение УФ-излучения, огнестойкость и снижение впитываемости биоразлагаемых продуктов – могут улучшаться за счет наноматериалов, таких как наноксид цинка или наноксид титана. Аналогичным образом применение наноинкапсулированных консервантов повышает качество пропитки древесины с увеличением проникновения применяемых химикатов и снижением эффекта выщелачивания. Различные формы наноцеллюлозы предлагаются в качестве пищевых ингредиентов для включения как в продукты массового потребления, так и в специализированную диетическую, профилактическую и лечебную пищевую продукцию. Добавки на основе наноцеллюлозы предлагаются в качестве натурального эмульгатора и стабилизатора в заправки для салатов, молочные продукты, мороженое и хлебобулочные изделия, для замещения высококалорийных ингредиентов. Целлюлозные наноматериалы обладают нанофибриллярными структурами, которые можно применять в строительстве, мебельной, фармацевтической и других отраслях. Появляются исследования, в которых прогнозируются многообещающие результаты их использования при производ-

стве нановолокна, нанонаполнителей, наноэмульсий, нанокомпозитов. Однако существует несколько факторов, сдерживающих внедрение в практику контактирующих с организмом человека изделий из наноцеллюлозы: недостаточная изученность ее биологического действия в сочетании с рисками, вызываемыми возможными остаточными количествами химикатов и биохимических реагентов, бактериальных токсинов, ферментных препаратов и микроорганизмов-продуцентов в ее составе.

Нанотехнологии и безопасность

Бесспорно, нанотехнологии прямо или косвенно проникли практически во все отрасли экономики. Но пока эксперты далеки от объективных оценок потенциала и рисков, в том числе влияния нанотехнологий на конфиденциальность и безопасность. Проводить такие исследования достаточно сложно, ибо они касаются широкого спектра новых областей: наноизготовления, наносборки, информационных технологий, включая наноэлектронные системы и искусственный интеллект, нанобиотехнологии, нанофармацевтики и нанотерапии. Поэтому так важен надежный и ответственный подход к нанотехнологиям, требующий изучения этических аспектов и учета потенциальных неблагоприятных последствий для человеческого здоровья и окружающей среды. Он необходим для выработки нормативно-правового базиса, на котором будет формироваться траектория наилучшего развития нанотехнологий во избежание их злонамеренного применения, особенно в сфере национальной и международной безопасности. Хочется верить, что ученые ответственно подойдут к изучению возможностей и рисков, связанных с нанонаукой. ■

Жанна КОМАРОВА

Подготовлено по материалам сайтов
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9865684/>,
[https://connections-qj.org/ru/article/
nanotehnologii-i-globalnaya-bezopasnost](https://connections-qj.org/ru/article/nanotehnologii-i-globalnaya-bezopasnost)

Медицина субмикронного уровня

Уникальные свойства и особенности поведения наноматериалов находятся в поле зрения исследователей в области биологии, медицины и физики наночастиц. Революционное взаимодействие этих дисциплин привело к созданию современной наномедицины, включающей множество новейших приложений, таких как лечение, диагностика и профилактика заболеваний, регенеративные технологии, персонализированная таргетная терапия и др. Это направление быстро развивается и имеет огромный потенциал. Так, объем мирового рынка медицинского оборудования с приставкой «нано» в 2020 г. оценивался в 2,89 млрд долл., а к 2029 г., по прогнозам экспертов, достигнет 7,26 млрд долл. при среднегодовом темпе роста 10,78%.

Диагностика в миниатюре

Большие перспективы открывают нанотехнологии для ранней и быстрой диагностики заболеваний, установления предрасположенности к патологиям на клеточном и молекулярном уровнях. По-настоящему инновационными разработками являются биосенсоры, представляющие собой микрофлюидные устройства для выделения и анализа определенных клеток, белков и генетического материала; технология нанопорового секвенирования для обнаружения последовательности молекул ДНК или РНК, что позволяет быстро и точно устанавливать генетические «поломки»; новые методы улучшения визуализации с помощью наночастиц, прикрепленных к конкретным биомаркерам, для таких манипуляций, как магнитно-резонансная, компьютерная и позитронно-эмиссионная томографии; использование парамагнитных наночастиц, нанокристаллов, квантовых точек, наноболочек и наносом в устройствах, способных модифицироваться в организме человека и на ранней стадии фиксировать нарушения в его работе.

Ожидается, что нанотехнологии сыграют значительную роль в развитии персонализированной диагностики. На их основе вкупе с так называемыми лабораториями на чипе предложены новые решения для индивидуализированного лечения путем анализа генетической информации на клеточном уровне, секвенирования генов и отбора проб биологических жидкостей. Вместе эти две технологии привели к разработке лабораторий на наночастицах –

небольших устройств, обнаруживающих изменения в органах и позволяющих своевременно реагировать на них, что дает возможность осуществлять мониторинг состояния здоровья в режиме реального времени и назначать соответствующее лечение. Диагностика онкологических заболеваний и воздействие на раковые клетки – одно из важных применений нано- и технологий «лаборатория на чипе». Кроме того, с будущими поколениями наноразмерных диагностических устройств все чаще связывают такую функцию, как обнаружение вирусов.

Фармация будущего

Пожалуй, наиболее широкий спектр наноприложений отмечен в фармации (рис. 1). С их помощью производятся улучшенные терапевтические препараты с повышенной эффективностью и меньшей токсичностью за счет увеличения их растворимости, стабильности и биодоступности, а также прицельного воздействия.

Перспективно использование наночастиц в качестве поглотителей токсичных лекарств. Создаются разновидности наногубок, впитывающих излишние дозы препаратов в крови, чтобы уменьшить побочные эффекты их передозировки. Исследователями предложены абсорбенты противовирусных средств, которые действуют как наноразмерные молекулы и превосходно зарекомендовали себя при лечении рака.



Рис. 1. Применение нанотехнологий в фармацевтических науках

По мнению ученых, нанотехнологии могут полностью изменить медицину, особенно в области доставки лекарств. Способность наночастиц транспортировать вещество в нужное место позволяет точно и контролируемо делать это на конкретных пораженных участках тела – опухолях, воспаленных и инфицированных тканях и, соответственно, контролировать количество необходимых лекарств и сводить к минимуму их побочные эффекты.

Все более уверенно заявляет о себе и такая новая область, как ДНК-нанотехнологии. На их основе разработаны ДНК-пистолеты и ДНК-вакцины, а также медицинские инструменты, позволяющие собирать наноструктуры и молекулы. Результаты последних исследований показывают, что современная оптимизация программирования и подходы *in silico* применяются для создания наноструктур ДНК с точным размером, химией поверхности и функциональными свойствами для направленного лечения конкретных заболеваний. Эффективные биомолекулы лекарств, такие как доксорубицин и олигонуклеотиды CrG, были успешно объединены с наноструктурами на основе ДНК для повышения эффективности клеточного потребления. Есть потенциал и для создания лекарств на основе РНК.

Инновационные подходы к лечению различных недугов включают взаимосвязь нанотехнологий с достижениями в области генетики. Для замены дефектных или отсутствующих генов используются системы доставки на основе наночастиц для транс-

портировки терапевтических ДНК к клеткам-мишеням. Наночастицы защищают молекулы от деградации и усиливают их способность проникать через клеточную мембрану, делая лечение более безопасным. Разрабатываются также технологии редактирования генов с помощью наноразмерных инструментов для точной модификации последовательностей ДНК и коррекции генетических мутаций. Кроме того, созданы датчики на основе наночастиц для мониторинга экспрессии генов и других молекулярных событий в режиме реального времени, способные предоставить ценную информацию для персонализированной медицины. Современные терапевтические концепции, включая генную терапию и терапию на основе молекулярной ДНК, уже применяются в здравоохранении, а появление нанотехнологий способствовало дальнейшему прогрессу в этой области.

Известны структурные комбинации, связывающие ДНК с различными видами органических и неорганических частиц, которые облегчают к ней доступ через клеточные поверхности. Помимо этого, такие наносборки употребляются для внутривенного введения лекарств. Эти модифицированные технологии представляют собой своеобразные ворота для развития наногенетической терапии.

Излечение широкого спектра вирусных, бактериальных и грибковых заболеваний также подвластно нанотехнологиям. Они способны изменять или улучшать физические свойства материалов, которые не обладают ими в обычном состоянии. Например, серебро имеет длительную практику применения, однако преобразование на основе наноразмеров значительно усиливает его эффективность. Одно из исследований, проведенных в Канаде, показало, что наночастицы этого металла более активны при лечении ожогов или ран, поскольку легко проникают в кожу в небольших количествах.

Регенеративная медицина

Нанотехнологии все чаще используются для регенерации кости, разработки каркасов, имитирующих ее структуру, а также создания высокоточных и индивидуальных имплантатов. Проводятся исследования в области формирования и структурирования костей, предприняты попытки найти заменители костного трансплантата в виде наноструктурированных материалов, которые будут усваиваться тканями тела и органов. Если эти работы увенчаются успехом, они откроют окно возможностей для лечения поврежденных костей и мышц.

Особого внимания заслуживают изыскания, посвященные процессам биоминерализации, направленным на уменьшение размера частиц костного материала с тем, чтобы внедрить его в коллагеновые волокна. Эта проникающая в поврежденные участки композиция со специфическими механическими свойствами произведет революцию в области остеологии и инженерии костной ткани. В результате будут созданы искусственные суставы и наноразмерные коллагеновые покрытия для суставов, которые стабилизируют процесс формирования кости остеобластами.

Не меньший эффект от наноструктур ожидается и в сфере лечения, поддержания, улучшения и репарации поврежденных тканей и органов. Если раньше манипуляции на клеточном уровне были практически невозможны, то с появлением клеточной терапии и методов тканевой инженерии можно взаимодействовать с клетками и их компонентами так, чтобы связать клеточные реакции и внеклеточный материал. Благодаря мощной способности наносборки к регенерации значительно улучшены клеточная адгезия, миграция, дифференцировка и другие механические процессы, инициирующие восстановление тканей.

Хорошие заделы демонстрирует производство наноразмерных материалов, таких как наночастицы золота и серебра, дендримеры, наностержни, углеродные шарики, нанооболочки, нанокубы и др. Каждый из них обладает своими уникальными свойствами, которые можно использовать напрямую. Активно ведутся работы по изучению диагностических, терапевтических, противовирусных, противогрибковых и, что наиболее важно, противораковых возможностей этих наноагентов.

Хирургия нового поколения

В этой области имеются по-настоящему инновационные разработки. Одна из них – нанороботы, которых с помощью передовых методов визуализации можно направлять в определенные места внутри тела для доставки лекарств, удаления опухолей или восстановления поврежденных тканей, в том числе и через сосудистую систему. Причем эти манипуляторы смогут разрезать даже один дендрит и нейрон, не причиняя вреда другим нейронам, связанным в сложную сеть. Эксперименты, проведенные на животных, показали, как действие наноножниц управлялось такими нанороботами. Ожидается, что с их помощью будут проводиться беспроводные внутриклеточные и внутриядерные хирургические

операции против злокачественных новообразований, а также доставляться в ткани тела так называемые респироциты – искусственные красные кровяные тельца, содержащие в 200 раз больше кислорода по сравнению с естественными эритроцитами, что сулит серьезные успехи в диагностике и лечении различных гемозаболеваний.

Совершенно новые горизонты открываются с нанотехнологиями в сфере доступа и контроля электрической активности клеток и тканей. Разработаны микроскопические медицинские наногенераторы, преобразующие механические движения тела в электрическую энергию. Их можно имплантировать внутрь организма и использовать для питания различных медицинских приборов, включая кардио- и нейростимуляторы, а также системы доставки лекарств. Устройства состоят из тонких слоев пьезоэлектриков, которые, подвергаясь механическому воздействию, например изгибу или давлению, либо реагируя на изменение температуры или жидкости в организме, способны аккумулировать энергию. Их преимущества – устранение проблемы замены батарей, которая может быть трудоемкой и дорогостоящей, а также надежность эксплуатации и экологическая безопасность. Вместе с тем предстоит усовершенствовать наногенераторы, сделав их более миниатюрными для безболезненной имплантации и достаточно прочными, чтобы они могли выдерживать суровые условия внутри тела, включая высокие температуры и коррозию, вызываемую биологическими жидкостями.

Поскольку нанотехнологии все стремительнее проникают в медицину, есть шанс, что они привнесут революционные решения в медицинское оборудование. Прогнозируется, что вскоре микро- и наноматериалы будут интегрированы с полезными характеристиками роботов, включающих в себя наноразмерные манипуляторы, сортировочные роторы, наборы для очистки реагентов и супердиагностические поверхности, которые будут моделироваться как диагностические и терапевтические. Предполагается, что эти устройства и соединения будут запрограммированы на выполнение определенных операций с подключением к более широкой сети взаимосвязанных наномашин, которые потенциально позволят врачам выполнять точные медицинские процедуры на субклеточном уровне.

Вводная анестезия является важным этапом при различных хирургических вмешательствах. Для ее совершенствования разрабатываются нанороботизированные смеси, которые образуют коллоидную суспензию с миллионами наноразмерных активных

обезболивающих наночастиц. Они воздействуют на чувствительные участки пациентов и проникают глубоко внутрь, вплоть до уровня рыхлых тканей. Этот проход наноматериалов осуществляется с помощью комбинационных принципов химических и температурных градиентов и позиционной навигации, которые контролируются локальными наноконтроллерами. Анестезирующее действие достигается за счет равномерного распределения анестетика в проецируемом органе.

Наностоматология

Наноразмерные структурированные материалы и наноробототехника предоставили уникальные возможности стоматологам, включающие усовершенствованную анестезию, ренатурализацию зубов, излечение гиперчувствительности и постоянное поддержание гигиены полости рта с помощью механических дентифроботов (рис. 2). Более простые разновидности последних включаются в жидкости для полоскания рта и пасты с целью очистки поверхности зубов и удаления зубного камня. Они обладают способностью выделять и уничтожать специфические патогенные бактерии и сохранять полезную микрофлору в оптимальном балансе.

Хотя цель полной регенерации тканей пародонта может быть не вполне достижима, последние разработки в области наноматериалов дали многообещающее представление об их коммерческом применении.



Рис. 2. Основные направления применения наностоматологии

нии. Усилия ученых сосредоточены на сенсibilизации нервных импульсов в сердцевине зуба через наноконтроллеры. Эти механистические открытия способны предложить стоматологам стратегический вариант лечения посредством воздействия нанороботов *in vivo* с использованием акустических сигналов. В их числе стимуляция естественного процесса биоминерализации или применение наноматериалов для развития искусственных зубов с чувствительностью, программируемой нанотехникой.

С учетом возрастающего интереса к эстетическому состоянию зубов многие разработки связаны с проблемами их репозиции. В этом случае можно использовать ортодонтических нанороботов для манипулирования тканями таким образом, чтобы добиться плавного безболезненного выпрямления, вращения и изменения положения зуба. Нанотехнологии выполняют такие действия, как удаление амальгам или восстановление зубов наряду с пломбами, коронками и другими подобными модификациями.

Наноклон в онкологию

У разработчиков появилась хорошая возможность разрабатывать наноагенты, флуоресцентные материалы, наборы для молекулярной диагностики и специальные таргетные препараты, которые помогают лучше диагностировать и лечить такое сложное заболевание, как рак. Наноструктуры выступают в качестве носителя сотен специфических противораковых молекул, способных проецироваться непосредственно на опухоли и заменить традиционные подходы к лечению рака таргетной терапией, которую можно использовать отдельно или в сочетании с уже доступными методами. Наночастицы для доставки лекарств конкретно к раковым клеткам организма проектируются так, чтобы избирательно связываться с пораженными участками, минимизируя при этом повреждение здоровых тканей. При этом, во-первых, повышается эффективность фармсредств за счет их концентрации непосредственно в очагах опухоли, во-вторых, преодолеваются такие ограничения традиционной химиотерапии, как плохая биодоступность или резистентность к лекарствам. Инкапсулируя препараты в наночастицы, можно улучшить их стабильность и растворимость и, соответственно, получить хорошие терапевтические результаты.

В настоящее время изучаются различные типы транспортировки нанопрепаратов, включая липосомы, полимерные наночастицы, дендримеры и углеродные нанотрубки, и возможности их комбинирования.



Рис. 3. Применение нанотехнологий в области онкологии

рования с агентами визуализации, что позволяет в режиме реального времени наблюдать за распределением лекарств, их нацеливанием на опухоль и поглощением, а также отслеживать эффективность лечения. Такая технология может совершить революцию в терапии рака, повысив результативность и безопасность, минимизировав системные побочные эффекты и ускорив переход к персонализированной медицине. Однако для оптимизации этих процессов и их клинического применения все еще необходимы дальнейшие исследования.

Практикуются и другие варианты лечения онкологических заболеваний в виде улучшенной визуализации тканей и микроокружения опухоли, а также корректировки путем высвобождения лекарств, связанных с наночастицами. Разрабатываются различные нанопрепараты, имеющие эффект усиленного проникновения и удержания или активного нацеливания на наноагрегаты, такие как наносферы альбумина, мицеллы и наночастицы золота. Некоторые варианты использования нанотехнологий в области онкологии представлены на рис. 3.

Как известно, во всем мире чрезвычайно остро стоит вопрос диагностики рака, неизлечимость которого в основном связана с поздним выявлением заболевания – на третьей или четвертой стадиях. Частично разрешить эту проблему удалось благодаря нанотехнологиям, обеспечивающим чувствительные и специфичные возможности мультиметрических измерений во внеклеточных условиях, и методам биовизуализации. За счет невероятно малых размеров наночастицы могут проникать через клеточные стенки и гематоэнцефалический барьер, неинвазивно и эффективно обнаруживая раковые клетки и определяя их местоположение и природу заболевания.

Одним из наиболее перспективных направлений нанотехнологий в диагностике рака является разработка таргетных наночастиц, специально пред-

назначенных для прилипания к раковым клеткам, что позволяет врачам легко идентифицировать и находить их. В итоге повышается вероятность раннего выявления заболевания, более точного мониторинга его прогрессирования и оперативной диагностики. Еще одно многообещающее направление – биосенсоры, способные находить определенные биомаркеры в крови или других жидкостях организма пациента и указывать на патологию.

Новая область лечения рака с использованием наноматериалов, спроектированных для визуализации, системы доставки лекарств и агентов таргетной терапии, – многофункциональная тераностическая терапия, в контексте которой применяются различные методы, такие как химио-, иммуно- и лучевая терапия. Многообещающе зарекомендовала себя технология магнитной доставки лекарств, предполагающая применение внешнего магнитного поля для направления наночастиц с препаратом в определенное место в организме. Исследователи могут создавать наночастицы – носители лекарств с уникальными свойствами, разработанные специально для воздействия на больную ткань, которые улучшают концентрацию лекарства в желаемом месте и сводят к минимуму нецелевые эффекты.

В целом наномедицина имеет большие перспективы, в том числе и в борьбе с COVID-19, и способна преобразовать методы диагностики, лечения и предотвращения многих заболеваний в будущем. Но в то же время прогрессивные открытия в этой области сопряжены с проблемой сокращения токсикологических рисков, связанных с высокими дозами и чрезмерным использованием наноматериалов в терапевтических схемах и лекарствах. Будем надеяться, что в ближайшее время она успешно разрешится. ■

Ирина ЕМЕЛЬЯНОВИЧ

Подготовлено по материалам сайта

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10536529>



В подготовленном Конференцией Организации Объединенных Наций по торговле и развитию (ЮНКТАД) Докладе о технологиях и инновациях за 2023 г. особое внимание уделяется тому, как передовые разработки влияют на экономический прогресс без нанесения вреда окружающей среде, а также какие возможности при этом они предоставляют развивающимся странам. Именно они, отмечается в документе, больше всего пострадали из-за последствий пандемии, геополитической напряженности и экономического кризиса, наблюдаемых в последнее время. Чтобы решить социальные проблемы, возникшие вследствие этих серьезных вызовов, таким государствам нужно диверсифицированное и интенсивное производство, которое, соответственно, влечет за собой выбросы в атмосферу огромных объемов углекислого газа. Однако, по заверению авторов доклада, благодаря концепции «зеленых» инноваций — концепции создания и внедрения новых или усовершенствованных товаров и услуг, которые оставляют меньший углеродный след и открывают «зеленые» окна возможностей, — у развивающихся стран теперь есть шанс наверстать упущенное: сократить бедность, внести свой вклад в борьбу с изменением климата и направить мир по более устойчивому пути.

Открывая «зеленые» окна

Авангард технологий

В топ «зеленых» инноваций входят новые передовые технологии, реализующие преимущества цифровизации и связности. В докладе рассматриваются 17 из них – от искусственного интеллекта до экологически чистого водорода и биотоплива – с выделением потенциальных экономических выгод и оценкой возможностей стран их использовать, внедрять и адаптировать. Эти новации продемонстрировали колоссальный рост за последние два десятилетия: в 2020 г. их совокупная рыночная стоимость составила 1,5 трлн долл., а к 2030 г. может достичь 9,5 трлн долл. Около половины новых решений приходится на Интернет вещей, который охватывает широкий спектр устройств в различных секторах.

«Зеленые» технологии поставляются в основном странами Западной Европы, Соединенными Штатами и Китаем. На долю последних двух приходится 30% глобальных публикаций и почти 70% патентов (диаграмма 1).

Все эти технологии находятся в стадии развития, но некоторые из них применяются достаточно долго, о чем свидетельствует количество патентов и публикаций. Судя по тому, в каком году была впервые подана патентная заявка и в какой период впоследствии делались ссылки на первоначальные патенты, наиболее зрелым продуктом является искусственный интеллект. Патенты на него цитируются с 2005 г., наибольшая активность заявок наблюдалась в 2014 г., и многие из основных запатентованных идей и изобретений по-прежнему актуальны. Менее изученным представляется Интернет вещей: средний год подачи патентных заявок – 2017-й, а средняя дата цитирования – 2016-й. Это говорит о том, что новые решения в этой сфере появляются практически ежегодно, постоянно совершенствуясь.

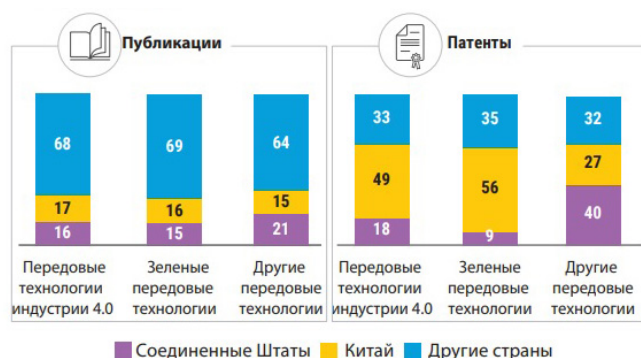


Диаграмма 1. Доля стран в публикациях и патентах в разбивке по передовым технологиям (в %)

Источник: расчеты ЮНКТАД на основе данных Scopus и PatSeer

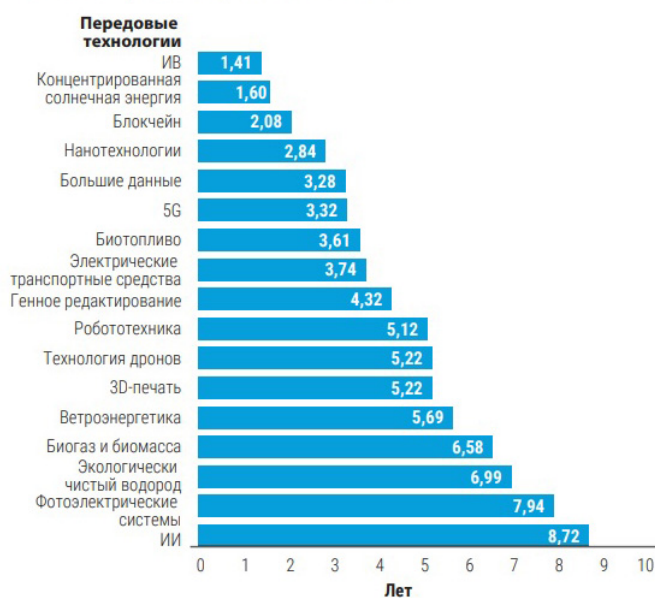


Диаграмма 2. Патентная зрелость передовых технологий

Примечание: для каждой технологии число на гистограмме показывает срок действия патента, который представляет собой разницу между средневзвешенным годом подачи заявки на патент и средневзвешенным годом 20 наиболее цитируемых патентов в период 2000–2021 гг.

Источник: ЮНКТАД

Закладка фундамента

В исследовании отмечается, что рынок передовых технологий растет, увеличивая технологический разрыв между развитыми и развивающимися странами. Как показывает практика, в последних использование инновационных решений пока еще затруднено.

Согласно Индексу готовности к их внедрению, разработанному ЮНКТАД и включающему 5 показателей: инфраструктура информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), квалификация кадров, научные исследования и опытно-конструкторские разработки (НИОКР), промышленный потенциал и финансирование, в 2023 г. из 166 стран доминируют США, Швеция, Сингапур, Швейцария и Нидерланды, имеющие высокий уровень дохода. Вторая четверть списка включает государства с формирующейся рыночной экономикой, в частности Российскую Федерацию, которая занимает 31-е место, Китай – 35-е, Бразилию – 40-е, Индию – 46-е и Южную Африку – 56-е. Более низкая, чем ожидалось, позиция КНР в рейтинге по сравнению с его производственным и инновационным потенциалом в области передовых технологий обусловлена различиями в охвате Интернетом и скоростью широкополосной связи между городами и сельской местностью. Далее в списке находятся страны Латинской Америки, Карибского бассейна

и Африки к югу от Сахары, которые наименее подготовлены к использованию, внедрению и адаптации новаций и рискуют упустить текущие возможности. Согласно докладу, у группы развивающихся стран в целом более низкие рейтинги по показателям подключения к ИКТ и человеческому капиталу, а если брать отдельно наименее развитые, развивающиеся, не имеющие выхода к морю, а также малые островные государства, то у них значения индекса ниже 100 по всем показателям, с особыми недостатками в инфраструктуре ИКТ и НИОКР.

Открытие и закрытие окон

В то же время, подчеркивают аналитики отчета, в области возобновляемых источников энергии перед развивающимися регионами открываются большие перспективы, которые важно не упустить. Многие зависят от потенциала страны и ее готовности задействовать имеющиеся возможности.

В таблице рассматриваются четыре сценария, иллюстрирующие, какие окна открыты или перспективны, а также страны и технологии, которые ими воспользовались.

Наилучший сценарий – тот, в котором имеющиеся предпосылки для «зеленых инноваций» сочетаются с привязкой к местным условиям, ценностям и приоритетам. Для того чтобы получить экономические выгоды, следует выявить и открыть окна возможностей, связанные в первую очередь с наличием природных ресурсов, таких как благоприятный ветровой режим, солнечная энергетика,

запасы органических отходов, разработать меры политики для создания необходимых технологий, а также провести оценку того, что необходимо для их внедрения.

Причем отсутствие подходящих факторов, отмечают авторы обзора, не означает, что поезд «зеленых» технологий ушел. Многие зависят от ответных мер государства и вовлеченности различных заинтересованных сторон в решение этой проблемы.

Чтобы извлечь выгоду из революции в данной области, развивающимся государствам необходима активная промышленная, инновационная и энергетическая политика, направленная на создание передовых решений, а также стратегические, пролонгированные действия по наращиванию технологического потенциала для стимулирования долгосрочного экономического роста и повышения устойчивости к будущим кризисам. В этой связи ЮНКТАД призывает правительства уделять первоочередное внимание инвестициям в более экологичные и технологически развитые секторы экономики, стимулировать потребительский спрос на «зеленые» товары и увеличивать инвестиции в исследования и разработки.

Путь к более сложному – «зеленому» и цифровому – устойчивому производству

Оптимальным вариантом перехода к «чистым» технологиям, по заявлению аналитиков доклада, является выпуск наукоемких товаров с большей добавленной стоимостью и меньшим углеродным следом. Для выбора более сложных и экологичных направлений государству следует провести инвентаризацию технологического и производственного потенциалов страны и наличия природных ресурсов, предусмотреть вход в глобальные цепочки создания стоимости (ГЦС), при участии в которых у него появляется возможность диверсифицировать экономику, производя высокотехнологичную продукцию.

Открыть «зеленые» окна в странах, позднее подключившихся к участию в ГЦС, помогут следующие меры:

- соответствие нормам международного природоохранного законодательства и торговых соглашений, включая экологические положения;
- учет новых моделей спросовых предпочтений и поведения потребителей;

Ответы / готовность	Мощные	Слабые
Высокая	Сценарий 1 Окна открыты: солнечные фотоэлектрические системы, биомасса, коллекторы солнечной энергии – Китай; биоэтанол – Бразилия; водород – Чили (потенциально)	Сценарий 2 Окна открываются: солнечная фотоэлектрическая энергия – Индия; биогаз – Бангладеш; коллекторы солнечной энергии – Марокко; ветер – Китай
Слабая	Сценарий 3 Окна в ближайшей перспективе: биомасса – Таиланд и Вьетнам; водород – Намибия	Сценарий 4 Окна в отдалении: ветер – Кения; биоэнергетика – Мексика и Пакистан

Таблица. Четыре сценария «зеленых» окон возможностей в области возобновляемых источников энергии

- *разработка новых технологий, соответствующих требованиям бережного отношения к окружающей среде.*

Повышение экологичности ГЦС может происходить по двум основным направлениям: путем выпуска товаров, используемых в «чистом» производстве, таких как фотоэлектрические панели и ветряные турбины, или же за счет модернизации традиционных отраслей обрабатывающей промышленности, таких как пищевая, швейная и текстильная, кожаная и мебельная промышленность, достигнутой в результате внедрения технологий Индустрии 4.0. Однако в большинстве развивающихся стран они распространяются достаточно медленно. Чтобы способствовать двойному переходу к «зеленым» и цифровым новациям, таким государствам необходимо наращивать цифровые компетенции, развивая инфраструктуру и инновационный потенциал и преодолевая финансовые барьеры.

Применительно к цепочкам создания стоимости государство должно проводить целенаправленную политику, поддерживая малые и средние предприятия, создавая учебные или технологические демонстрационные центры последних достижений, внедряя ключевые социальные и экологические ценности. Причем социальную модернизацию авторы доклада трактуют как усиление прав и возможностей работников и улучшение условий их труда, а экологическую – как уменьшение углеродного следа предприятия с учетом использования им природных ресурсов, объемов выбросов парниковых газов и его влияния на биоразнообразие.

Приоритеты «зеленой» экономики

Открывать новые горизонты, по мнению авторов исследования, необходимо, взяв на вооружение «зеленую» промышленную политику, в рамках которой выбираются направления модернизации и затем мобилизуются нужные участники и ресурсы.

В докладе определяется набор приоритетов для стран, позднее вступивших на путь экологизации. Им рекомендовано направить все силы на оценку возможностей государства в новых перспективных областях, выработку мер регулирования, поддержку распространения знаний и предоставление необходимых госуслуг. Общая политика должна иметь целенаправленный характер, формировать единые условия игры и обеспечивать реализацию программ совместного создания «зеленых» рынков.

В более зрелых отраслях, например ветро- и солнечной энергетике, странам-новичкам не стоит заниматься производством сложных узлов – рациональнее включиться в последующие звенья цепочки создания стоимости, связанные с разработкой сметной документации, проектированием, закупками и строительством низкоуглеродных объектов.

По мнению авторов исследования, государству необходимо оценивать, где и как следует укреплять и трансформировать производство и инновации в этой сфере. Хотя отправные точки для старта «зеленых» технологий у каждой страны свои, существуют некоторые общие алгоритмы действий:

- *согласованность экологической и промышленной политики – принятие мер, направленных на борьбу с изменением климата, активизацию выработки и потребления возобновляемой энергии, электрификацию села и повышение энергетической безопасности. Причем нормы регулирования, которые ранее разрабатывались отдельно для каждой отрасли, должны быть совмещены для энергетической, экологической и промышленной сфер;*
- *инвестирование в высокотехнологичные и экологичные секторы экономики – расширение возможностей финансирования «зеленых» разработок и их внедрения с помощью различных фондов, технической помощи, а также консультационных услуг, развитие потенциала и создание институтов для стратегического определения новых перспективных инноваций и приоритетных отраслей. Их следует поддерживать с помощью инструментов вертикальной политики, таких как кластеры, экспериментальные и демонстрационные проекты и др.;*
- *формирование потребительского спроса – организация инфраструктуры и системы стимулирования, способствующих переориентации потребительского поведения, благоприятно влияющего на сбор и переработку отходов с переходом на экономику замкнутого цикла. В качестве примера можно рассматривать «зеленые» закупки, способные вызвать цепную реакцию в других отраслях;*
- *финансирование исследований и разработок – предоставление государственных субсидий для развития НИОКР, совершенствования и дополнения технологий;*
- *информирование населения о значении «зеленых» технологий – повсеместная осведомленность о потенциале инновационных решений,*

начиная с системы базового образования, повышения квалификации работников на предприятиях и заканчивая кампаниями по ознакомлению общественности и потребителей с преимуществами «чистых» технологий и их способности сокращать углеродный след;

- развитие цифровой инфраструктуры и знаний – создание мощной и разветвленной системы ИКТ, высокоскоростное и качественное подключение к Интернету, устранение разрывов связи между малыми и крупными предприятиями, а также между городскими и сельскими регионами. Важно адаптировать и модифицировать технологии в соответствии с условиями, в которых они будут использоваться, а также поддерживать компании в распространении цифровых знаний в таких областях, как исследования рынка, разработка продуктов, поиск поставщиков, производство, продажи и послепродажное обслуживание;
- кадровое обеспечение для внедрения новаций – необходимость подготовки квалифицированных работников для базового использования технологий, их адаптации и, наконец, для создания новых.

Международное взаимодействие для более устойчивого производства

Воспользоваться «зелеными» возможностями без поддержки международного сообщества наименее технологически развитые государства не могут. Им потребуются творческая адаптация инноваций и соответствующая инфраструктура, реализуемая посредством прямого вмешательства государства, например в виде создания новых экологически чистых секторов или введения таких правил, как регулирование загрязнения воздуха или воды. Подстегивают «зеленые» инновации в развивающихся странах также глобальные инициативы и повестки дня, мировые правила и механизмы, особенно те, которые связаны с изменением климата. Но для перехода на экологичные технологии требуются скрупулезно проработанные стратегии, способные преодолеть многочисленные противоречия и усилить партнерство в интересах общественного блага.

Для успешного выхода на рынок, по мнению аналитиков исследования, следует предусмотреть правила международной торговли для «зеленых» това-

ров. Они должны предоставлять возможность развивающимся странам защищать зарождающиеся отрасли с помощью тарифов, субсидий и государственных закупок, чтобы не только удовлетворять внутренний спрос, но и поставлять продукцию на экспорт. Среди необходимых мер называется также выполнение требований по локализации бизнеса, включающих в себя удовлетворение конкретных потребностей целевого рынка с учетом таких факторов, как местные правила, культурные предпочтения и языковые различия. Чтобы поддержать эти усилия, Всемирной торговой организации рекомендовано пересмотреть правила торговли и привести их в соответствие с нормами Парижского соглашения по климату. Страны с крупными внутренними рынками, например, могут субсидировать зарождающиеся отрасли производства комплектующих для отечественной солнечной и ветровой энергетики и начать таким образом выпуск импортозамещающей продукции, упрощая процедуры внешней торговли и обеспечивая стабильный и конкурентоспособный валютный курс.

Международное сообщество, по заявлению аналитиков отчета, должно выработать новые торговые механизмы для поддержки более чистого и продуктивного производства в развивающихся странах. Ими могут стать помощь в «зеленом» развитии со стороны передовых государств, а также открытие своих рынков для запоздавших стран. К тому же следует реформировать международную систему прав интеллектуальной собственности, чтобы позволить развивающимся странам имитировать производство новых товаров государств-лидеров. Принцип, согласно которому устойчивое развитие приоритетнее коммерческих целей, был продемонстрирован во время кризиса COVID-19. В 2022 г. ВТО разрешила ряду членов организации до 2027 г. выпускать и поставлять вакцины без согласия владельца патента в объеме, необходимом для борьбы с пандемией. Точно так же в Соглашении о ТРИПС следует предусмотреть гибкость в отношении экологических технологий, чтобы сделать торговый режим более совместимым с соглашениями об изменении климата.

Для глобального партнерства, вероятно, потребуются новые институциональные структуры, к примеру международная программа гарантированных закупок экспортных экотоваров, таких как изделия, детали и узлы, используемые в производстве энергии из возобновляемых источников. В качестве успешных новаторских моделей глобального сотрудничества авторы доклада называют Межправитель-

ственную группу экспертов по изменению климата, Парижское соглашение 2015 г. и договоренности о Целях в области устойчивого развития. Есть также примеры коллективных исследований, результаты которых принадлежат всем странам-участницам, особенно в области естественных наук, включая Европейскую организацию ядерных исследований ЦЕРН, Международный термоядерный экспериментальный реактор ИТЭР и проект «Квадратно-километровая решетка» СКА. Аналогичное международное сотрудничество следует также формировать в области «зеленых» инноваций, считают аналитики.

Они отмечают, что большинство усилий в области науки, техники и инноваций связано с национальными приоритетами. Мировое сообщество может выправить этот крен, переместив исследования с национального на многонациональный уровень, сделав их открытыми и доступными экспертным сообществам. Как известно, многие технологии могут иметь как положительные, так и отрицательные последствия в зависимости от региональных условий и того, как они используются, поэтому каждая страна должна принять во внимание преимущества и опасности новых внедрений и в соответствии с ними строить планы на будущее. К тому же необходима общая многосторонняя система для оценки спорных разработок, таких как ИИ и редактирование генома, чтобы учесть возможности и риски, которые они несут для разных категорий стран. В этом плане следует предусмотреть возможность систематической поддержки развивающимся странам в использовании подобного рода инноваций.

Таким образом, делают выводы составители обзора, технологии для преодоления глобального климатического кризиса должны все чаще создаваться на транснациональном или даже глобальном уровне. Однако пока сотрудничество в данной сфере весьма ограничено. Малые и уязвимые рынки имеют незначительные внутренние возможности для привлечения местных или международных инвестиций в производство «зеленых» технологий. К тому же им не хватает финансовых и управленческих ресурсов для создания стимулов, поощряющих передовой опыт в области экологических новшеств. Чтобы решить эту проблему, авторы публикации предлагают организовать многосторонний конкурсный фонд «Инновации ради нашего общего будущего». Финансируемый международными организациями, он будет стимулировать творческое мышление и поощрять новации, способные ответить на многие вызовы современности. Следующим шагом станет разработка глобального конкурса «зеленых» технологий.

В целом, по мнению исследователей, мир находится в начале технологической революции, оказывающей огромное влияние на мировую экономику и основанной на «чистых» инновациях. Их непременно должны использовать развивающиеся страны, чтобы открыть принципиально новые возможности для социально-экономических процессов и повышения качества жизни. ■

Подготовила Ирина РИМАШЕВСКАЯ
по материалам сайта

[https://unctad.org/system/files/
official-document/tir2023overview_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/tir2023overview_ru.pdf)





В рамках совместного проекта журнала «Наука и инновации» и Института математики НАН Беларуси предлагаем посмотреть глазами ученых-математиков на важнейший аспект экономики – предпочтения потребителей на рынке товаров и услуг – и разобраться, как спрогнозировать уровень продаж с помощью науки.

БЕЗ ФОРМУЛ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ В ТЕОРИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ



Валентин Гороховик,
главный научный сотрудник
отдела нелинейного и
стохастического анализа
Института математики НАН
Беларуси, член-корреспондент

Теория потребления – один из важнейших разделов экономической теории. Основными ее объектами являются индивидуальный потребитель (им может быть также условное лицо, представляющее агрегированные интересы коллектива) и множество потребительских благ, элементы которого могут реализоваться в конкретной ситуации как товары (наборы товаров), услуги, инвестиции, развлечения и другие реальные блага, способные удовлетворить потребности потребителя. Цель последнего – выбрать из доступных ему потребительских благ такое, которое наиболее полно по сравнению с другими доступными благами удовлетворяет его потребности.

Основная цель статьи – обсудить основные математические понятия, которые являются базовыми при построении математических моделей теории

потребления. Автор надеется, что среди читателей данной статьи будут не только профессиональные математики, поэтому материал будет излагаться по возможности доступно. Естественно, что, поскольку речь будет идти о математических моделях, совсем избежать математики нельзя. Поэтому автор все же предполагает, что читатель владеет такими основными математическими понятиями, как множество, функция, непрерывность и др.

1. Основной инструмент математического моделирования в теории потребления – бинарные отношения. Исходным в теории потребления является предположение, что потребитель осуществляет выбор наиболее рационального (оптимального) потребительского блага, руководствуясь результатами парных сравнений потребительских благ, при этом для каждой пары потребительских благ A и B потребитель может иметь три взаимоисключающих суждения:

- 1 благо A «лучше» блага B ;
- 2 благо A «хуже» блага B
(благо B «лучше» блага A);
- 3 ни одно из благ A и B не «лучше»
и не «хуже» другого.

Результаты парных сравнений разбивают множество всех упорядоченных пар потребительских благ (декартов квадрат множества потребительских благ) на три непересекающиеся подмножества:

- 1 пар (A, B) , в которых благо A «лучше» B ;
- 2 пар (A, B) , в которых A «хуже» B ;
- 3 пар (A, B) , в которых ни благо A , ни благо B не является «лучше» или «хуже» другого.

Заметим, что первое из этих подмножеств (как и второе, но не третье) *асимметрично*: если пара (A, B) принадлежит первому подмножеству, то пара (B, A) ему не принадлежит.

Задав только первое или второе подмножество, мы полностью определяем два оставшихся. Действительно, первое и второе подмножества являются взаимно обратными по отношению друг к другу (упорядоченная пара (A, B) принадлежит второму подмножеству тогда и только тогда, когда пара (A, B) принадлежит первому, и наоборот), а третье подмножество является дополнением к объединению первого и второго. Таким образом, для того чтобы полностью задать результаты парных сравнений потребителя, достаточно указать в множестве упорядоченных пар потребительских благ первое (или второе) из определенных выше подмножеств, или, говоря формальным математическим языком, достаточно задать на множестве потребительских благ асимметричное бинарное отношение, которое содер-

жательно отражает суждение потребителя «блага A «лучше» («хуже») блага B ».

В теории потребления асимметричное бинарное отношение, задающее результаты парных сравнений потребительских благ, принято называть *отношением предпочтения* потребителя (некоторые авторы используют термин «строгое отношение предпочтения»), не влияя на процесс выбора им рационального блага, то в математической модели реальный потребитель фактически отождествляется с соответствующим ему отношением предпочтения, то есть с некоторым асимметричным бинарным отношением.

Во многих конкретных ситуациях для любых потребительских благ A , B и C из того, что благо A «лучше» блага B , а благо B «лучше» блага C , следует, что благо A «лучше» блага C . В этих случаях отношение предпочтения потребителя – не только асимметрично, но и *транзитивно*.

Каждое отношение предпочтения, как асимметричное бинарное отношение, однозначно определяет на множестве потребительских благ такое бинарное отношение, которое является дополнением объединения для него и обратного ему отношения и, следовательно, состоит из таких пар потребительских благ, относительно которых потребитель, руководствуясь своим отношением предпочтения, не имеет суждения, какое из них в паре является лучшим. Отражая содержательную суть, данное бинарное отношение называется в теории потребления *отношением безразличия потребителя*.

Из асимметричности отношения предпочтения следует, что порожаемое им отношение безразличия – *рефлексивное* и *симметричное* бинарное отношение. Рефлексивность означает, что ему принадлежат все пары, составленные из одинаковых (тождественных) благ. Симметричность – что наряду с упорядоченной парой благ (A, B) оно содержит обратную пару (B, A) . Каких-либо других свойств в общем случае отношение безразличия не имеет. В чистой математике рефлексивные и симметричные бинарные отношения принято называть отношениями *толерантности*. Наибольшее распространение получили транзитивные отношения толерантности – *отношения эквивалентности*. Очевидно, что они, как рефлексивные, симметричные и, кроме того, транзитивные бинарные отношения, образуют лишь специальный подкласс в классе отношений толерантности. Тем не менее в математической литературе отношения эквивалентности рассматриваются как основной представитель симметричных

бинарных отношений вообще. Такая точка зрения проникла и в математическую экономику, в том числе в теорию потребления. Этим можно объяснить то, что авторы многих исследований, посвященных теории потребления, априори предполагают, что отношение безразличия, порождаемое отношением предпочтения потребителя, является не только рефлексивным и симметричным, но и транзитивным, то есть отношением эквивалентности. Однако в общем случае отношение безразличия может не быть транзитивным и, следовательно, не быть отношением эквивалентности. Таким образом, предположение о транзитивности отношения безразличия, которое делает большинство авторов при построении теории потребления, является дополнительным требованием, сужающим класс рассматриваемых отношений предпочтения потребителя.

Отношения эквивалентности характеризует *тождественность* элементов, тогда как отношения толерантности – лишь их *сходство*. При этом каждое отношение толерантности порождает принадлежащее ему отношение эквивалентности. В соответствии с ним, два элемента эквивалентны тогда и только тогда, когда множества толерантных им элементов совпадают. Поскольку в принятом в теории потребления контексте асимметричные бинарные отношения интерпретируются как отношения предпочтения потребителя, то порождаемые ими отношения толерантности названы *отношениями безразличия*, а отношения эквивалентности, порождаемые, в свою очередь, отношениями безразличия, – *отношениями равноценности*. Если отношение безразличия транзитивно, то оно совпадает с порождаемым им отношением равноценности. Считается, что два равноценные потребительские блага обладают одинаковой способностью удовлетворить потребности потребителя.

Из всех асимметричных бинарных отношений (класса отношений предпочтения) выделяются три подкласса:

- **отношения *частичного предпочтения*** – произвольные асимметричные и транзитивные бинарные отношения;
- **отношения *слабого предпочтения*** – такие частичные предпочтения, которые порождают транзитивные отношения безразличия;
- **отношения *совершенного предпочтения*** – частичные предпочтения, отношение безразличия которых совпадает с отношением равенства.

Очевидно, что отношения совершенного предпочтения образуют собственный подкласс в классе

отношений слабого предпочтения, а отношения слабого предпочтения – собственный подкласс класса отношений частичного предпочтения.

Данная классификация отношений предпочтения отражает различные способности потребителя сравнивать потребительские блага. Так, отношения совершенного предпочтения характерны для «идеального» потребителя, способного из любой пары различных потребительских благ выбрать лучшее. В этом случае только одинаковые потребительские блага равноценны для него, различные же ранжируются им по способности удовлетворить его потребности.

Потребитель с отношением слабого предпочтения способен для любой пары потребительских благ определить, какое из двух лучше, или заключить, что оба они равноценны для него. Однако он пользуется более мягкими (слабыми) требованиями, в соответствии с которыми равноценными могут быть и различные потребительские блага, а не только одинаковые. Потребитель с отношением слабого предпочтения разбивает множество всех благ на непересекающиеся классы равноценных пар, а затем ранжирует их по способности удовлетворить его потребности.

Наконец, если отношение предпочтения потребителя является лишь отношением частичного предпочтения, то отношение безразличия не совпадает с отношением равноценности, и, следовательно, существуют такие пары различных потребительских благ, которые он не может сравнить по способностям удовлетворить его потребности. Вследствие этого он не ранжирует классы равноценных потребительских благ, а лишь частично упорядочивает.

В существующей экономической литературе (например, [1]) наиболее часто рассматриваются модели, в которых предполагается, что потребитель обладает слабым отношением предпочтения, и, следовательно, соответствующее ему отношение безразличия является отношением эквивалентности. Вместе с тем со стороны экономистов настойчиво высказывается мнение о необходимости более глубокого исследования моделей с отношением частичного предпочтения и, более того, с нетранзитивным отношением предпочтения [2].

Объединение отношения частичного предпочтения и соответствующего ему отношения равноценности является рефлексивным и транзитивным бинарным отношением. Действительно, рефлексивность данного объединения следует из рефлексивности отношения равноценности, а в транзитивности легко убедиться, если воспользоваться следующим наблюдением.

Пусть потребительское благо A «лучше» потребительского блага B , а благо C равноценно благу A . Тогда естественно, что благо C также «лучше» блага B . Аналогично, если в паре A и B вместо блага B рассмотреть равноценное ему благо D , то благо A будет «лучше» блага D . Содержательно объединение отношения частичного предпочтения и соответствующего ему отношения равноценности может быть интерпретировано как отношение «не хуже» на множестве потребительских благ и рассматриваться как нестрогое отношение предпочтения потребителя, порожденное исходным строгим отношением предпочтения.

Рефлексивные и транзитивные бинарные отношения называются отношениями *предпорядка* (или *квазипорядка*), полные отношения предпорядка – отношениями *слабого порядка*, антисимметричные отношения слабого порядка – отношениями *совершенного порядка*. Связь классов отношений предпорядка с отношениями предпочтения следующая: асимметричные части отношений предпорядка являются отношениями частичного предпочтения, слабого порядка – слабого предпочтения, совершенного порядка – отношениями совершенного предпочтения.

Кроме того, отрицание отношения слабого (совершенного) порядка есть отношение слабого (совершенного) предпочтения. И наоборот, отрицание отношения слабого (совершенного) предпочтения есть отношение слабого (совершенного) порядка. В то же время отрицание отношения частичного предпочтения, которое не является отношением слабого предпочтения, может не быть транзитивным и, следовательно, не является, вообще говоря, отношением предпорядка. Некоторые авторы при построении теории потребления рассматривают рефлексивные и транзитивные бинарные отношения как исходные отношения, моделирующие нестрогое отношение предпочтения потребителя.

Как отмечалось выше, идеальной является такая ситуация, когда потребитель представлен отношением совершенного предпочтения – или хотя бы отношением слабого предпочтения. Возникает вопрос: а нельзя ли доопределить (продолжить) заданное отношение частичного предпочтения так, чтобы оно стало отношением слабого предпочтения или даже отношением совершенного предпочтения? Положительный ответ на этот вопрос дает теорема Шпильрайна [3], доказанная еще в 1930 г.

2. Теория полезности. В конце XIX – начале XX в. среди экономистов господствовало мнение, что каждое потребительское благо обладает объективным свойством полезности, которое, подобно темпе-

ратуре или весу тела, может быть измерено и выражено некоторым числом; при этом чем больше численное значение полезности блага, тем оно (благо) предпочтительнее для потребителя. Присвоив каждому потребительскому благу величину его полезности, определим на множестве таких благ вещественнозначную функцию, которая полностью описывает отношение предпочтения потребителя. Такие функции получили название *функций полезности*.

Нетрудно увидеть, что отношение предпочтения потребителя, которое может быть задано функцией полезности, является отношением слабого предпочтения или, более того, совершенного. Возникает вопрос: а всякое ли отношение слабого предпочтения может быть задано функцией полезности? Как оказалось, ответ на него в случае бесконечного множества потребительских благ отрицателен: так называемое лексикографическое отношение предпочтения, определенное на пространстве R^n , которое интерпретируется как пространство упорядоченных наборов из n товаров, является отношением совершенного предпочтения, однако оно не может быть представлено функцией полезности. Это привело к возникновению в теории потребления раздела, получившего название «теория полезности», в котором исследуются условия существования функций полезности для отношений предпочтения.

В современной теории потребления [4] под функцией полезности отношения частичного предпочтения понимается любая определенная на множестве потребительских благ строго монотонная (в смысле данного отношения предпочтения) вещественнозначная функция, принимающая одинаковые значения на равноценных потребительских благах. Для отношений слабого предпочтения данное определение функции полезности совпадает с классическим определением.

Таким образом, с чисто математической точки зрения теория полезности – это раздел теории потребления, в котором исследуются условия существования строго монотонных в смысле отношения предпочтения потребителя вещественнозначных функций, определенных на множестве потребительских благ. В теории потребления такие функции называются *функциями полезности*. В случае отношения слабого предпочтения соответствующая ему функция полезности, если такая существует, полностью характеризует отношение предпочтения.

Основное содержание теории полезности составляют критерии существования функций полезности для отношений предпочтения.

Для формулировки таких критериев в общем случае можно воспользоваться понятием начального отрезка множества потребительских благ, упорядоченного рассматриваемым отношением частичного предпочтения. *Начальный отрезок* – это такое подмножество множества потребительских благ, которое наряду с каждым принадлежащим ему благом содержит все другие, менее предпочтительные или равноценные ему. Говорят, что семейство начальных отрезков является *порядково плотным* в множестве потребительских благ, если выполняется следующее условие: *для любых двух благ, одно из которых предпочтительнее другого, в данном семействе существует начальный отрезок, содержащий менее предпочтительное благо этой пары и не содержащий более предпочтительное*. Множество потребительских благ называется *порядково сепарабельным*, если в нем существует не более чем счетное порядково плотное семейство начальных отрезков.

Для отношений слабого предпочтения свойство порядковой сепарабельности равносильно существованию не более чем счетного подмножества в множестве потребительских благ, удовлетворяющего следующему условию: для любой пары благ A и B , где A предпочтительнее B , в данном подмножестве существует благо C , которое более предпочтительно или равноценно благу B и менее предпочтительно или равноценно благу A (C как бы разделяет A и B).

Как оказалось, свойство порядковой сепарабельности множества потребительских благ эквивалентно существованию функции полезности для заданного на нем отношения частичного предпочтения. Эта эквивалентность – следствие того, что упорядочение порядково сепарабельного множества потребительских благ отношением частичного предпочтения подобно естественному упорядочению некоторого подмножества множества действительных чисел.

В случае, когда на множестве потребительских благ кроме отношения частичного предпочтения задана топология, естественно возникает вопрос о существовании непрерывных (или хотя бы полунепрерывных) функций полезности. Оказывается, что существование *полунепрерывной* сверху или снизу функции полезности эквивалентно существованию не более чем счетного порядково плотного семейства открытых (замкнутых) начальных отрезков в множестве потребительских благ. Для существования *непрерывной* функции полезности требуется более сильное условие согласования топологии и упорядочения, задаваемого на множестве потребительских благ отношением частичного предпочтения. Во-пер-

вых, требуется, чтобы топология была порядково нормальной [5], а во-вторых, чтобы существовало не более чем счетное семейство начальных отрезков, удовлетворяющее усиленному условию порядковой плотности [6]. Классические критерии существования непрерывных функций полезности для отношений слабого предпочтения, установленные Дебрё [7] и Эйленбергом [8], являются следствиями общего критерия.

3. Функция спроса. Выбор каких потребительских благ из подмножества доступных потребителю рационален (оптимален) для него? Этот вопрос – один из основных в теории потребления.

Будем различать множество *потребительских благ* и множество *доступных потребительских благ*. Второе отличается от первого тем, что включает только те блага, выбор которых, учитывая бюджетные ограничения, цены на рынке и другие обстоятельства, потребитель может позволить себе выбрать и приобрести. Таким образом, множество доступных потребительских благ является подмножеством множества всех потребительских благ, при этом выбор блага потребителем ограничивается соответствующим ему множеством доступных потребительских благ.

В том случае, когда среди доступных благ существует наилучшее благо, то есть такое, которое «не хуже» («лучше» или «равноценно») любого другого из доступных, то его выбор естественно считать рациональным для потребителя. Нетрудно видеть, что наилучшее благо всегда существует, если множество доступных благ конечно, а отношение предпочтения потребителя является отношением слабого предпочтения. Однако, если отношение предпочтения потребителя является только отношением частичного предпочтения, то даже в конечном множестве доступных благ наилучшее благо может не существовать. В этом случае рациональным является выбор неумлучшаемого блага – такого, «лучше» которого среди доступных благ не существует.

Неумлучшаемые блага не являются, вообще говоря, наилучшими. Но если в множестве доступных существует наилучшее благо, то оно является также и неумлучшаемым, более того, в этом случае любое неумлучшаемое благо является и наилучшим. Вместе с тем более типичной для потребителя с отношением частичного предпочтения является ситуация, когда наилучших благ в множестве доступных потребительских благ нет, а неумлучшаемые блага существуют, причем в этом случае различные неумлучшаемые блага не являются, вообще говоря, равноценными.

Вследствие этого, сужая рациональный выбор потребителя до множества неулучшаемых доступных потребительских благ, мы не разрешаем для него окончательно проблему выбора, поскольку не указываем, какое конкретное благо из неравноценных неулучшаемых благ следует выбрать.

Данная неопределенность не является следствием «неудачного» определения рационального выбора, а объективно возникает из-за того, что отношение предпочтения потребителя является лишь отношением частичного (а не слабого) предпочтения и, следовательно, не для любой пары благ потребитель может указать, какое из двух является лучшим, или хотя бы то, что они равноценны. Таким образом, неопределенность, объективно существующая у потребителя при парных сравнениях, не исчезает, а переходит в неопределенность рационального выбора. Преодолеть ее можно, например, продолжив (доопределив) отношение предпочтения потребителя до отношения слабого или даже совершенного предпочтения, что возможно в силу теоремы Шпильрайна. Однако поскольку такое продолжение неоднозначно, то фактически неопределенность выбора неулучшаемого доступного блага подменяется в этом случае неопределенностью выбора продолжения частичного предпочтения до отношения слабого или совершенного предпочтения. Другое дело, если выбор такого продолжения основывается на некоторых объективных дополнительных данных, уточняющих отношение предпочтения потребителя.

Из сказанного выше следует, что каждый потребитель представлен в математической модели не только отношением предпочтения, но и множеством доступных ему потребительских благ, которое он формирует исходя из собственного бюджета, существующей системы цен и других объективных условий, ограничивающих его выбор. Задача потребителя – осуществить рациональный, с его точки зрения, выбор доступного ему потребительского блага. Естественно, что такой выбор должен быть неулучшаемым в множестве доступных потребительских благ. *Именно неулучшаемые доступные блага будут пользоваться спросом потребителя, все другие будут отвергнуты им как нерациональные.*

Соответствие, которое каждой паре, состоящей из отношения предпочтения потребителя и множества доступных потребительских благ, сопоставляет множество неулучшаемых доступных благ, называется функцией спроса. Простейшие свойства функции спроса, ее зависимость от отношения предпочтения и множества доступных потребительских

благ легко устанавливаются непосредственно из ее определения. Например, если отношение предпочтения первого потребителя является продолжением отношения предпочтения второго потребителя, то при одном и том же множестве доступных благ множество неулучшаемых благ первого потребителя содержится в множестве неулучшаемых благ второго потребителя. Другими словами, чем шире отношения предпочтения потребителя, тем точнее он определяет свой рациональный выбор.

Значительное место в исследованиях функции спроса занимает вывод условий, которым должны удовлетворять отношение предпочтения потребителя и множество доступных потребительских благ для того, чтобы множество соответствующих им неулучшаемых доступных благ было не пусто. В общем случае такие условия являются следствиями леммы Куратовского – Цорна и других эквивалентных ей аксиом теории множеств, таких как принцип максимальности Хаусдорфа, аксиома выбора и др. [5]. В частном случае, когда потребитель представлен слабым отношением предпочтения, допускающим функцию полезности, множество неулучшаемых благ (в этом случае оно и множество наилучших) совпадает с множеством доступных благ, максимизирующих функцию полезности. Условия существования точек максимума вещественнозначных функций хорошо изучены в математической теории оптимизации [9, 10]. ■

Более детальное и строгое изложение математических основ теории потребления можно найти в книге автора [11].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Джейли Дж.А., Рене Ф.Дж. Микроэкономика: продвинутый уровень. – М., 2011.
2. Fishburn P.C. Nontransitive Preferences in Decision Theory // Journal of Risk and Uncertainty 1991. Vol. 4. No.2. P.113–134.
3. Szpilrajn E. Sur l'extension de l'ordre partial, Fundamenta Mathematicae. 1930. Vol. 16. P. 386 – 389.
4. Кирута А.Я., Рубинов А.М., Яновская Е.Б. Оптимальный выбор распределений в сложных социально-экономических задачах. – Л., 1980.
5. Александров П.С. Введение в теорию множеств и общую топологию. – М., 1977.
6. Bridges D.S., Mehta G.B. Representations of Preferences Orderings. – Berlin, 1995.
7. Debreu G. Representation of preference ordering by a numerical function // In: Thrall R., Coombs C.C., Davis R. (eds.), Decision Processes. – New York, 1954. P. 159–166.
8. Eilenberg S. Ordered topological spaces // American Journal of Mathematics. 1941. Vol. 63. No. 1. P. 39–45.
9. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. – М., 2002.
10. Гороховик В.В. Конечномерные задачи оптимизации. – Минск, 2007.
11. Гороховик В.В. Математические основы теории потребления. – Минск, 2021.

Формализация объектов исследования

и предпосылки для создания информационной
многофакторной модели

Аннотация. В статье проработаны методы отраслевого управления, позволяющие обеспечить достоверное наполнение профильных баз знаний, которые служат источником информации, способной формировать модели, приближенные к человеческой логике, на базе опыта, фактов, правил (эвристики). Предложены основные постулаты по написанию сценария отраслевого прогнозирования для получения научно обоснованной оценки эффективности методик, призванных минимизировать негативное воздействие на экосистемы. Предпринята попытка создать алгоритм для проведения каких-либо определенных действий. Конкретный выбор критериев, метрических характеристик сводится к разработке отраслевых экоиндикаторов, где многофакторность позволяет отразить специфику и характеристику проектных объектов (рельеф изучаемых территорий, водные и наземные объекты, флора, фауна и т.д.).

Ключевые слова: база знаний, проектный объект, информационная модель, метод отраслевого прогнозирования, экоиндикаторы.

Для цитирования: Колесникович В. Формализация объектов исследования и предпосылки для создания информационной многофакторной модели // Наука и инновации. 2024. №6. С. 72–77.
<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-06-72-77>



Виктор Колесникович,
доцент экономико-правового
факультета Университета права
и социально-информационных
технологий, кандидат
географических наук;
ums_minsk@tut.by

УДК 504.03

Основная особенность современного этапа устойчивого развития перспективных объектов в сфере экологического туризма состоит в том, что из-за высокой динамики изменения внешней среды к ней требуется бережное и рациональное отношение. Разработка методов отраслевого прогнозирования развития экотуризма на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) направлена на минимизацию негативного воздействия на экосистемы. Правильная экологическая оценка туристско-рекреационного потенциала очень важна для достижения Республикой Беларусь целей устойчивого развития системы ООПТ [8].

Отраслевая база знаний (ОБЗ) традиционно содержит: институциональные знания, высококачественный опыт, возможность отраслевого прогнозирования и обучения [7]. Поэтому она служит источником информации, способной формировать модели, приближенные к человеческой логике, не только и не столько на основе формальных (математических) закономерностей, сколько на базе опыта, фактов, правил (эвристик).

В результате анализа существующих методов отраслевого управления, позволяющих обеспечить достоверное наполнение отраслевых баз знаний, направленных на соблюдение целей экологической безопасности Республики Беларусь [6], предпринята попытка создать в качестве некоего готового «рецепта» алгоритм для проведения каких-либо нацеленных действий – отраслевую методику. В указанном контексте она отличается конкретизацией приемов и задач, которые предлагается решать в ходе исследования проектных объектов. Например, статистический анализ данных эксперимента становится методом (предобработкой), а конкретный выбор критериев, метрических характеристик сводится к разработке отраслевых экоиндикаторов ООПТ [3, 4, 9, 12]. Они выступают в роли многофакторных комплексных характеристик, предполагающих количественную измеримость и доступность необходимой для их формирования отраслевой информации, содержащейся, как правило, в учете и отчетности.

Многофакторность позволяет отразить отраслевую специфику и характеристику проектных объектов ООПТ (рельеф изучаемых территорий, водные и назем-

ные объекты, флора, фауна и т.д.) [3–5].

Традиционно отраслевой многофакторный анализ состоит из нескольких этапов.

На первом с привлечением отраслевой экспертизы определяются факторы, которые оказывают воздействие на изучаемый показатель, и отбираются наиболее существенные для корреляционного анализа.

На втором используются технологии сбора и предобработки исходной информации.

На третьем изучается характер связи между факторами и результирующим показателем, осуществляется подбор и обоснование отраслевых информативных признаков, которые наиболее точно выражают сущность исследуемой зависимости.

На четвертом проводится оценка основных показателей корреляционной связи.

На пятом этапе происходит статистическая оценка результатов корреляционного анализа и выработка рекомендаций к практическому их использованию в моделировании процессов на объектах ООПТ.

Отбор информативных признаков является важным моментом биоэкологического анализа в связи с тем, что допущенные ошибки могут оказывать значительное негативное влияние на биоэкосистему. Результаты такой аналитики предназначены для разработки плановых заданий при создании информационной модели с соблюдением отраслевых принципов:

- **системности**, предполагающей взаимосвязанность объекта прогнозирования с прогнозным фоном и их элементами;
- **непрерывности**, учитывающей корректировку про-

гнозов по мере поступления новых данных об объекте прогнозирования;

- **согласованности**, требующей координации нормативных и поисковых прогнозов различной природы и временного периода;
 - **вариантности**, основанной на разработке версий отраслевого прогноза, исходя из особенностей рабочей гипотезы, постановки цели и разнообразия прогнозного фона;
 - **верифицируемости**, заключающейся в определении обоснованности, точности и достоверности отраслевых прогнозов;
 - **рентабельности**, предполагающей повышение экологического и экономического эффекта от пользования отраслевыми прогнозными рекомендациями.
- Соблюдение приведенных принципов позволяет обеспечить достаточную достоверность и точность отраслевого прогнозирования (ОП) [3, 4, 7], для которого предлагается получать информацию на основе трех взаимодополняющих вариантов:
- **оценки перспектив развития, будущего состояния прогнозируемого явления с учетом накопленного опыта в рассматриваемой предметной области (биоэкологии) по аналогии с изученными сходными процессами;**
 - **экстраполяции в будущее тенденций, закономерностей развития систем, сведения о которых достаточно хорошо известны;**
 - **моделирования возможных состояний систем и процессов в соответствии с ожидаемыми изменениями ряда заданных условий.**

Приведенным вариантам получения информации об ОП могут соответствовать три способа разработки отраслевых прогнозов:

- *анкетирование, заключающееся в опросе экспертов с целью упорядочения возможных состояний базы знаний, согласования объективных и субъективных оценок прогнозного характера;*
- *построение динамических рядов развития показателей предполагаемого явления на интервале прогноза в прошлом и в будущем;*
- *создание поисковых информативных моделей, базирующихся на данных прошлого периода, и прогноза по имеющимся прямым или косвенным данным о масштабах и направлении изменений [7].*

Далее рационально применить один из основных фактографических (формализованных) методов прогнозирования – статистический. Однако при этом следует учитывать его основной недостаток – неприменимость в нестабильных условиях, когда, к примеру, из-за существенных перемен, связанных с пандемией COVID-19, гипотеза о возможности экстраполяции прошлых тенденций на будущее не выполняется, а требуемый уровень точности отраслевых прогнозных оценок можно получить только с помощью моделей адаптивного прогнозирования [4]. Их развитие осуществляется в двух направлениях: усложнение структурных характеристик и совершенствование адаптивного механизма отраслевых прогнозных моделей [4].

Предлагается одновременно с оптимальной настройкой параметров адаптации осуществлять выбор такой структуры из неко-

торого множества вариантов адаптивного механизма, которая для моделируемого процесса обеспечивает самые точные экс-пост-прогнозные расчеты.

На первом этапе реализации процедуры комплексного ОП следует применить метод прогнозного сценария, составляемого на тему, непосредственно связанную с целевым предназначением отраслевой прогнозируемой системы. Это упорядоченное во времени описание последовательности ее будущих состояний, обусловленных причинно-следственными связями типа «состояние – состояние» и «внешние факторы – состояние».

Таким образом, сценарий может рассматриваться как словесная (вербальная) логико-эвристическая динамическая модель системы. Он в связи с наличием различных вариантов принятия промежуточных решений и воздействий отраслевого прогнозного фона (среды) во многих случаях имеет многовариантный характер, то есть описывает несколько логически обоснованных последовательностей состояний (событий) отраслевой базы знаний.

Единые правила по написанию отраслевых сценариев не приняты, но в общем случае они включают следующие разделы: вводную часть, основное содержание и заключение [4].

Вводная часть содержит обоснование темы, общий анализ рассматриваемой области, описание генеральной цели, имеющихся людских, финансовых и технических ресурсов, совокупности внешних по отношению к отраслевой базе знаний условий (факторов), существенных для решения поставленных задач.

Основная часть отраслевого сценария связана с разработ-

кой различных альтернативных вариантов достижения глобальной (генеральной) цели, стоящей перед ОБЗ, с учетом воздействия прогнозного фона. При этом на содержательном уровне проводится последовательный анализ возможных состояний системы (организации) на период упреждения ОП с указанием различных вариантов выдачи управляющих воздействий при возникновении конфликтных и критических ситуаций.

Чаще всего специалисты-аналитики совместно с учеными-исследователями, реализуя общую схему построения отраслевого сценария, исходят из трех вариантов развития будущего: оптимистического, пессимистического и наиболее ожидаемого.

Достоверность реализации неблагоприятных факторов внешней и внутренней среды выявляется в ходе анализа причин возможного их проявления и путей ликвидации, затем на основе данных оценок определяется состояние, которое можно считать наиболее вероятным.

В заключительной части отраслевого сценария должны содержаться выводы о реальности достижения глобальной цели, а также о тех результатах, которые могут быть получены в процессе воздействия на ОБЗ. При этом перечисляются основные мероприятия, которые необходимо провести.

Последние могут быть составлены на основе стратегической или операционной игры специалистов (экспертов), что наиболее актуально для современных измененных условий социального дистанцирования. Для проведения игры, в свою очередь, пишется предварительный сценарий, в котором распределяются роли, отведенные участни-

кам, исходные данные, правила. Запись ходов игроков и соответствующий их анализ позволяет построить основной сценарий. На его основании выполняется построение дерева целей и задач, стоящих в будущем перед исследуемой системой.

Данное дерево представляет собой древесный граф, созданный по правилам исследовательского логического расчленения генеральной цели на подцели первого уровня, подцелей первого уровня – на подцели второго уровня и т.д. [7]. Такой метод в ряде случаев еще называют таксономией целей. Элементы каждого их уровня рассматриваются по отношению к связанным с ними элементам нижестоящего

уровня как цели, а по отношению к вышестоящему уровню – как задачи, которые должны быть решены для обеспечения достижения целей.

Основные методы, используемые в современной отраслевой прогностике, разбиты на три группы (*таблица*).

Первую составляют методы, предназначенные для оценивания будущих тенденций (трендов) и выявления наиболее существенных возможных (вероятных) значений показателей при использовании анализа отраслевой конкурентоспособности и событий. Это наиболее оптимальный вариант при проведении стратегического отраслевого планирования, где весьма популярны методы фор-

мирования отраслевого сценария, анализа возможных перемен и отраслевой конкурентоспособности [4].

Во вторую группу входят методы моделирования внешней среды, позволяющие построить такую модель действительности, которая дает возможность специалисту по отраслевому планированию получать различные варианты будущего, изменяя входные параметры и функции переменных, но для этого необходимо разработать и внедрить систему отраслевых экои ndикаторов [2].

Оценить последствия влияния возможных трендов и событий на результаты деятельности, провести анализ перекрестного воздействия событий можно с помощью

Методы отраслевого прогнозирования	Уровень динамизма внешней среды		
	1–2	3–4	4–5
	Экстраполяция	Жизненный цикл	Дискретное отклонение
Прогнозирование конъюнктуры, темпов экономического роста, демографической ситуации, научно-технического прогресса, социологическое прогнозирование: ■ экстраполяция ■ множественная регрессия ■ выбор кривой тренда ■ отраслевые сценарии с использованием экологических декораций ■ анализ отраслевой конкурентоспособности ■ асимптотический анализ ■ анализ угроз и возможностей	+ + + + +	+ + + +	+ + +
Моделирование внешней среды: ■ модель «давление – состояние – реакция» (ДРС) ■ эконометрическое (региональной отраслевой инфраструктуры) ■ кибернетическое ■ стохастическое: прогнозирование условий для разных ситуаций	+ + +	+ +	+
Оценка последствий решений: ■ анализ воздействий ■ анализ перекрестного воздействия ■ дедуктивный анализ (оценка точек притяжения нового аттрактивного отраслевого продукта) ■ анализ баланса сил заинтересованных отраслевых групп		+ +	+ +

Таблица. Методы отраслевого прогнозирования

третьей группы методов. Они позволяют достичь социально-экономических показателей при приемлемом (научно обоснованном) влиянии на окружающую среду (биотоп), где размещается отраслевое предприятие [4].

В таблице наряду с методами отраслевой прогнозтики, наиболее часто используемыми в отраслевом управлении, содержатся границы их целесообразного применения. Так, методы экстраполяции и близкие к ним по содержанию методы множественной регрессии и выбора кривых тренда позволяют достаточно точно описать среду (уровень динамизма внешней среды 1–2), в которой аналитические (цель) и диагностические (функция) прогнозы, значимые «в прошлом», и соответствующие закономерности и зависимости сохраняются и в будущем. Однако методы экстраполяции дадут неверное представление о внешней среде при изменении уровня возмущающих воздействий (2-я и 3-я колонка таблицы, где отсутствуют знаки «+»). При этом экологические критерии в биоэкологическом анализе, изучаемые с целью создания предметной отраслевой модели базы знаний, рассматриваются как мера антропогенного воздействия на экосистемы и ландшафты, при которой их основные функционально-структурные характеристики (продуктивность, интенсивность биотического круговорота, видовое разнообразие, устойчивость и др.) в идеале не выходят за пределы естественных измерений.

Предложенные автором методы могут применяться для долгосрочного и точного прогноза основных составляющих экологической политики Республики Беларусь, которые сформу-

лированы в Национальной стратегии устойчивого развития до 2030 г. [4, 8]:

- обеспечения экобезопасности и благоприятной окружающей среды;
- рационального использования природно-ресурсного потенциала;
- сохранения биологического и ландшафтного разнообразия;
- эффективного обращения с отходами.

При прогнозировании наряду с полимодельным описанием биоэкологических аспектов следует задействовать многометодный ситуационный подход, при котором в зависимости от складывающейся на момент формирования прогноза внутренней и внешней обстановки выбирается соответствующая совокупность методов [4].

Для того чтобы создать функциональную модель действительности, необходимо составить логическую последовательность испытаний, изменяя входные параметры и функции переменных, которые вносятся программой посредством автоматизированного анализа отраслевой базы знаний. На промежуточной стадии на основе полученного массива данных и характерных признаков нужно сделать выборку наиболее надежных и информативных сведений. Именно на их базе проводят построение требуемой модели отраслевых экоиндикаторов.

Одна из самых полных по охвату систем разработана Комиссией по устойчивому развитию ООН и содержит четыре основные группы индикаторов, определяющих:

- социальные аспекты устойчивого развития;
- экономические;
- экологические, включающие характеристики

воды, суши, атмосферы, других природных ресурсов, а также отходов;

- институциональные (прогнозирование и планирование политики, научные разработки, международные правовые инструменты, информационное обеспечение, усиление роли основных групп населения) [2, 10].

Система показателей ОЭСР объясняет взаимосвязи между экономикой и защитой окружающей среды, выявляет экономико- и социально-экологические взаимосвязи, представляющие собой модель «давление – состояние – реакция». Она работает следующим образом: человек своей деятельностью оказывает «давление» на окружающую среду и изменяет количество и качество природных ресурсов («состояние»), общество реагирует на это путем изменения государственной политики, общественного сознания и поведения («реакция») [2, 13].

Предложенные ОЭСР индикаторы могут использоваться с учетом конкретных условий отдельных стран, для чего иногда требуются их преобразования и трансформация.

Экопоказатели для ОБЗ в сфере биоэкологии предлагается разбить на две категории с учетом их целевой направленности:

- индикаторы как движущая сила, характеризующие человеческую деятельность, процессы и характеристики, которые влияют на устойчивое развитие при работе с ненарушенными экосистемами;
- индикаторы состояния, отражающие текущие условия в уже пострадавших экосистемах [9].

Очевидно, что такие показатели, имея количественное выра-

жение, могут использоваться для обоснования принимаемого решения и выявления недостатков в природопользовании, а также обеспечения контроля достоверности отраслевых баз знаний [9].

Решающим критерием для принятия модели за основу выступает испытание ее адекватности в реальных экосистемах. Верификация как одно из направлений исследования включает цели их сохранения и восстановления. Инструментами достижения этой цели становятся функциональное отраслевое моделирование и отраслевая информационная многофакторная модель [10, 13].

Отсутствие универсальной схемы связано с проведением исследований в естественных условиях, исходя из необходимости решения какой-либо конкретной проблемы их воздействия на окружающую среду [3, 5, 6, 8]. Для решения подобных задач предполагается использовать систему отраслевых экоиндикаторов, которая становится частью процесса формализации проектных объектов, позволяет построить аналитическую модель для прогнозирования и как итог – создать информационную модель отраслевой базы знаний [4]. ■

Статья поступила в редакцию
14.01.2023 г.

■ **Summary.** The article elaborates the methods of industry management, allowing to ensure reliable filling of industry knowledge bases that serve as a source of information capable of forming models close to human logic, based on experience, facts, rules (heuristics). For this purpose, the study of methods of industry forecasting is proposed to obtain a scientifically based assessment of the effectiveness of methods designed to minimize the negative impact on ecosystems. In this regard, an attempt has been made to create as a kind of ready-made «recipe», an algorithm for carrying out any targeted actions, and the specific choice of criteria, metric characteristics, is reduced to the development of sectoral eco-indicators, where multifactoriality allows reflecting the industry specifics and characteristics of «project objects» (relief of the studied territories, water and land objects, flora, fauna, etc.).

■ **Keywords:** knowledge base, project object, information model, method of industry forecasting, eco indicators.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-06-72-77>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Душин В.К. Теоретические основы информационных процессов и систем / В.К. Душин. – 5-е изд. – М., 2014.
2. Индикаторы устойчивого развития // <http://urboecol.muctr.ru/wp-content/uploads/2009/05/tarasova.pdf>.
3. Колесников В.П. Анализ природно-ресурсного комплекса республиканского ландшафтного заказника «Выгощанское» с целью биоэкологической оценки природно-ресурсного потенциала // Вестник Полесского государственного университета / Сер. естественных наук. 2020. №1. С 62–70.
4. Колесников В.П. Закономерности формирования, состояние, динамика развития туристско-рекреационного потенциала Республики Беларусь / В.П. Колесников // Весці БДПУ. Фізика. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. 2019. Сер. 3, №1(95). С. 45–51.
5. Колесников В.П., Зима М.А. Стратегия сохранения и рационального использования туристско-рекреационного потенциала водных и наземных экосистем // Вестник Полесского государственного университета. Сер. природоведческих наук. 2019. №2. С. 51–60.
6. Предпосылки развития туристско-рекреационных ресурсов Республики Беларусь в условиях информационной трансформации / В.П. Колесников [и др.] // Весці БДПУ. Фізика. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. 2018. Сер. 3, №1. С. 28–35.
7. Колесников В.П. База знаний как основа эффективного управления туристическими потоками на особо охраняемых природных территориях. Сборник статей III Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения 2020». Т. 1. – Минск, 2021.
8. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. // <https://www.economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>.
9. Озина А.М., Сергеева Ю.В. Концептуальные аспекты обоснования индикаторов устойчивого развития территорий // Региональная экономика. 2015. №10. С. 22–31.
10. Стратегическое планирование и хозяйственная политика // <https://sites.google.com/site/ekonomikarb/38-sistema-planirovania-i-prognozirovania-nacionalnoj-ekonomiki-belarusi>.
11. Стратегическое управление // <http://www.up-pro.ru/encyclopedia/strategicheskoe-upravlenie.html>.
12. Тарасова Н.П., Кручина Е.Б. Индексы и индикаторы устойчивого развития // http://www.cawater-info.net/eoindicators/pdf/tarasova_kruchina.pdf.
13. Указ Президента Республики Беларусь «Об экологической сети» от 13.03.2018 г. №108 // <https://president.gov.by/ru/events/kommentarij-k-ukazu-108-ot-13-marta-2018-g-18317>.

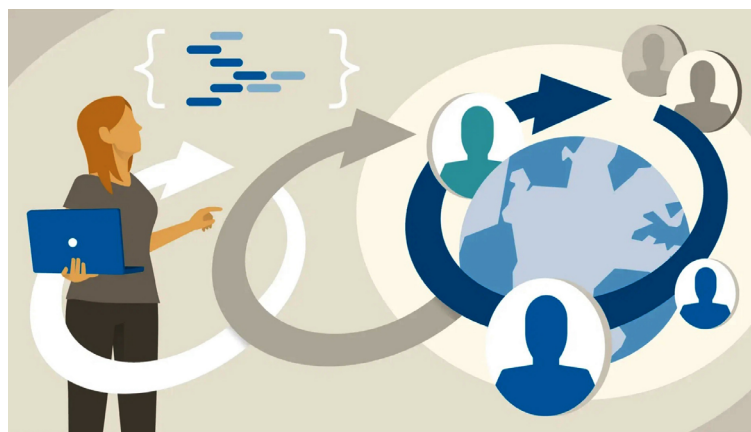
Управление клиентским опытом в концепции маркетинга 4.0

Аннотация. Представлено описание концепции управления клиентским опытом (CEM), проведена ее сравнительная характеристика с технологией CRM, рассмотрены тенденции и перспективы данного рынка, проблемы использования в деятельности зарубежных организаций. Проанализированы данные исследований Adobe в части результатов применения CEM различными компаниями, целевые ориентиры директоров по маркетингу, описаны внутренние барьеры по внедрению CEM. Особое внимание уделено анализу результатов проведенного под руководством автора исследования мнений специалистов отечественных предприятий относительно возможностей упомянутых технологий, перспектив персонализации клиентского опыта, ключевых вызовов и проблем в области белорусского маркетинга. Определены роль технологий и их перспективность в категории субъектов, отнесенных к лидерам, отмечена их ориентация на цифровые маркетинговые решения, признание их ведущей роли в деле завоевания и удержания клиентов.

Ключевые слова: управление клиентским опытом, карты клиентского опыта, CEM-решения, рынок CEM-решений, CX-лидеры (лидеры по обеспечению клиентского опыта).

Для цитирования: Разумова С. Управление клиентским опытом в концепции маркетинга 4.0 // Наука и инновации. 2024. №6. С. 78–83.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-06-78-83>



Светлана Разумова,
доцент кафедры бизнеса
и управления Института
предпринимательской
деятельности, кандидат
экономических наук, доцент;
swrasum@yandex.ru

Период пандемии и в особенности последующие за ним изменения в покупательском поведении привели к большей ориентации компаний на ожидания и восприятия потребителей, обострили проблемы формирования и удержания их лояльности. CRM-системы, предназначенные для сбора и обработки информации о сделках и автоматизации работы с клиентами, в недостаточной мере обеспечивают возможность сопровождения пути клиента во всех точках контакта, ограничены скорее аналитическими и функциями продвижения, в то время как построение эффективной системы взаимодействия требует перестройки всех бизнес-процессов, изменений в системах мотивации персонала, брендинге, маркетинг-аналитике, стратегической переориентации как по направлениям бизнеса, так

и по инвестициям в определенные маркетинговые технологии и мероприятия. Задачи использования СЕМ – увеличение лояльности, снижение оттока клиентов, оптимизация затрат на их привлечение и удержание, рост узнаваемости и уровня репутации бренда.

По исследованию аналитического агентства Gartner, указанные цели входят в топ-5 приоритетов директоров по маркетингу. В 2021 г. 10% из них включили СЕМ в наиболее важные приоритеты, а в 2022 г. – уже 18% СМО поставили его на 1-е место [1]. Согласно проведенному компанией Adobe совместно с Econsultancy глобальному опросу за 2023 г., только 7% организаций отметили, что предоставляемый ими клиентский опыт в диджитл-среде превосходит ожидания потребителей (5% в 2022 г.), тогда как 32% согласились с утверждением, что он соответствует им (20% в 2022 г.), а 42% констатировали, что отстает (63% в 2022 г.). Структура ответов лидеров в части реализации СЕМ (СХ-лидеры) в 2022 г. оказалась другой: среди них 14% превзошли, 37% – соответствовали и 36% не удовлетворяли требованиям, предъявляемым клиентами к их взаимодействию с компанией. Несмотря на краткосрочную ориентацию бизнеса в настоящий момент в силу различных геополитических вызовов, именно опыт, полученный потребителями в процессе коммуникации с брендами, становится определяющим фактором успеха на ближайшие несколько лет, в особенности в сегментах миллениалов и представителей поколения Z. Более половины из них отмечают, что никогда не возобновят покупки у субъектов, злоупотребивших их доверием [2].

В отчете Adobe отмечаются следующие тенденции.

Растущий спрос на качественный полезный контент как основу формирования позитивного потребительского опыта, 89% руководителей высшего звена отмечает эту тенденцию. Роль содержания рекламных и других сообщений компании значительно выросла. Востребованы персонализированные, эмоциональные, резонансные впечатления, что в свою очередь должно быть обеспечено максимальной скоростью и эффективностью работы творческих команд. В то же время 42% СХ-лидеров и только 20% обычных фирм считают, что справляются с задачей создания и размещения контента на очень хорошем или хорошем уровнях. Так же оценивают себя только 28% практиков в производстве и оптимизации контента и те же 28% – в его предоставлении (автоматизации, исполнении, использовании данных для персонализации, отслеживании инсайтов). Среди СХ-лидеров таковых оказалось 34%. Важной предпосылкой развития СЕМ является и возможность работы с данными о клиентах в режиме реального времени.

Согласно отчету, 69% СХ-лидеров обладают таким опытом, 65% владеют информацией в разрезе сегментов и 61% – на уровне каждого клиента, в то время как из категории «отстающие» – 45%, 38% и 37% соответственно.

Персонализация контента. Всего 17% СХ-лидеров и 9% обычных организаций способны предоставить уникальный и релевантный материал для пользователей на основе их намерений или прогноза поведения. Для 18% опрошенных специалистов высшим уровнем персонализации считается таргетинг на основе экстраполяции клиентской базы, а для 24% – обобщение данных более широкого сегмента.

В части основных внутренних барьеров реализации концепции СЕМ 41% СХ-лидеров и 52% компаний, занимающих позицию «отстающий», указали нехватку времени на разработку креативных решений и операционные проблемы, 48% всех компаний отметили проблемы технической совместимости разных решений. Для 11% СХ-лидеров и 2% «отстающих» нет значимых препятствий в развитии систем управления клиентским опытом (рис. 1) [3].

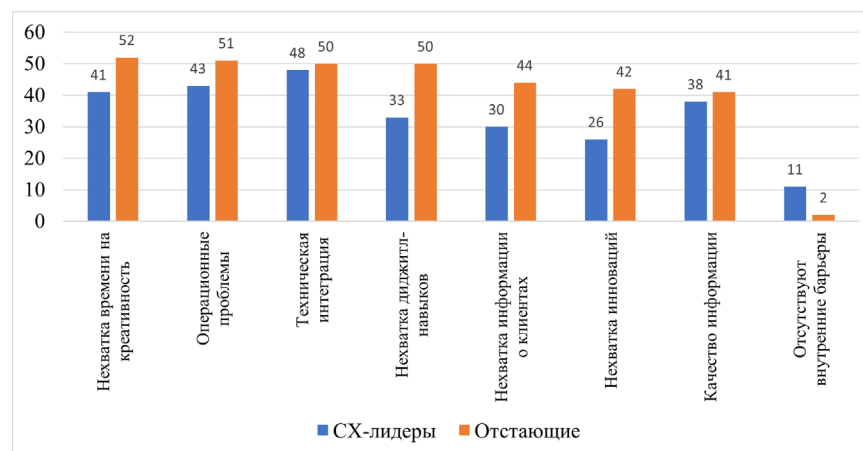


Рис. 1. Внутренние барьеры развития СЕМ по результатам исследования Adobe 2023, доля компаний в % [2]

Характеристики	CRM	СЕМ
Основное предназначение	Как компания видит клиента	Как клиент видит компанию
Решаемые задачи	Клиентская – персональная, демографическая, транзакционная Формирование базы клиентов Управление транзакциями Составление отчетности Настройка эффективных рекламных кампаний Автоматизация продаж Координация работы различных подразделений при обслуживании клиента Управление программами лояльности	Клиентская – опыт взаимодействия с компанией, удовлетворенность, активность в различных точках контакта Сбор и обработка информации о клиенте в точках контакта Создание и автоматизация исследований потребительской удовлетворенности Настройка маркетинговых коммуникаций с учетом требуемой клиентом частоты и готовности участия Мониторинг клиентских показателей в режиме реального времени Синхронизация клиентской информации с внутренними информационными системами Персонализация клиентского опыта Внутренние исследования сотрудников, задействованных в точках контактов и клиентоориентированных бизнес-процессах
Специалисты	Специалисты отдела продаж, колл-центра, по обслуживанию клиентов Руководители организаций, собственники бизнеса, специалисты отделов и служб, задействованные в процессе обслуживания клиента	Специалисты отдела продаж, маркетинга, специалисты колл-центра, специалисты по обслуживанию клиентов, HR-специалисты Руководители организаций, собственники бизнеса, разработчики маркетинг-стратегий, специалисты отдела маркетинга, специалисты других отделов и служб, задействованные в процессе обслуживания клиентов в разных точках контакта

Таблица. Сравнение решений CRM и СЕМ

Технологический аспект. 50% компаний разрозненно используют СЕМ-технологии нескольких поставщиков, 22% – облачные совместно с другими платформами, 16% – собственные, 12% – исключительно облачные СЕМ-решения. Что касается глобального рынка, то, по данным отчета Polaris Market Research, он оценивался в 9,5 млрд долл. в 2021 г. и в 11,43 – в 2022-м. К 2032 г. эксперты ожидают роста до 48,56 млрд долл. при среднегодовом темпе 15,6% [4].

Согласно отчету «Ландшафт маркетинговых технологий 2022», за 2 года самыми объемными по количеству предлагаемых решений стали 2 категории: «контент и клиентский опыт» с темпами роста в 34% (1936 в 2020 г. и 2592 – в 2022-м) и «социальные сети и отношения» – в 17% (1969 и 2305 соответственно) [5]. Что касается будущего СЕМ-технологий, то, по прогнозам компании Gartner [1], на стадии инновационного триггера (зарождения) находятся такие технологии, как DToC (цифровой двойник кли-

ента, предсказывающий сложные шаблоны и модели покупательского поведения), IE (разработка алгоритмов автоматизации цифрового клиентского опыта, включая анализ настроений, распознавание выражения лица и анализ голоса), CDE-решения, обеспечивающие этический сбор данных о потребителях в мобильном маркетинге, таргетинге, дизайне рекламных кампаний, генеративный ИИ, создающий оригинальный контент, эмоциональный ИИ, отвечающий за распознавание эмоций. Поддержка клиентов фактически является одним из ведущих направлений в инвестировании и внедрении систем искусственного интеллекта. Компании все чаще используют его для улучшения персонализированного обслуживания клиентов, которое в большинстве случаев становится конкурентным преимуществом, подключают функции автоматизированных разговоров, классификации обращений (автоматически разбивают телефонные звонки по отдельным категориям) [6]. На базе ИИ созда-

ются виртуальные помощники и интеллектуальные чат-боты. Особенно популярны решения, связанные с разработкой карт путешествия клиентов (CJM), персонализацией, агрегированием и обработкой огромных массивов идентификационной информации. Технологии омниканального, мобильного и маркетинга лидеров мнений воспринимаются скорее как стандартные и уже не инновационные [7].

Рынок СЕМ-решений сейчас представлен несколькими секторами. По аналитическим инструментам: EFM-продукты, речевая, текстовая, веб-аналитика и контент-менеджмент. По точкам контакта: колл-центры, места продаж, платформы социальных сетей, e-mail, мобильные приложения и сайты, веб-сервисы. По разработке: облачные и локальные. По отрасли и сфере применения: торговля, IT, здравоохранение, производство, недвижимость, сервисные компании и др.

Наблюдается увеличение доли операций, выполняемых с помощью моделей цифрового взаимо-

действия с клиентами, основанных на платформах и инструментах для совместной работы. Рост рынка базируется на быстром распространении интеллектуальных технологий, таких как машинное обучение, искусственный интеллект и Интернет вещей, позволяющих снизить стоимость вычислительных ресурсов и ресурсов хранения клиентских данных. Например, автопроизводители применяют ИИ и аналитику, чтобы понять, что люди делают в своих автомобилях, а с помощью датчиков транспортных средств, сигнализирующих о запросах водителя, предлагают услуги по техническому обслуживанию.

Возрастает потребность в улучшении вовлечения клиентов и снижении уровня их оттока, необходимость в лучшем понимании и использовании клиенто-центрических показателей для построения более эффективных стратегий вовлечения во взаимодействие с брендом.

Продолжающаяся цифровая трансформация в различных отраслях побуждает компании заменять существующий набор из множества решений, необходимых для создания, управления и расширения цифрового присутствия, унифицированными алгоритмами. Продажи СЕМ-решений стремительно увеличиваются и благодаря инициативе Всемирного экономического форума по цифровой трансформации. Ожидается, что к 2025 г. взаимодействия, основанные на платформах, составят почти 2/3 цифровой экономики в размере 100 трлн долл., что будет стимулировать продолжающаяся интеграция искусственного интеллекта в СЕМ. В части прогнозов данного рынка отмечается:

- *рост сегмента веб-аналитики благодаря таким пре-*

имуществам, как разработка и организация интернет-сайтов для эффективного и действенного доступа;

- *приоритетное развитие контакт-центров, обоснованное повышением скорости разрешения вызовов, степени удовлетворенности клиентов и производительности в различных каналах. Широкое внедрение передовых технологий, облачных и виртуальных решений, усиливающее значение социальных сетей, оптимизация взаимодействия с клиентами;*
- *распространение облачных вычислений, облачных CRM, способных значительно сократить расходы компаний;*
- *устойчивое совершенствование веб-аналитики и управления контентом, когда крупномасштабный неструктурированный текст автоматически преобразуется в количественные данные с помощью текстового анализа для поиска закономерностей, тенденций и идей. Обусловлено растущей потребностью в аналитике социальных сетей и требованием классифицировать взаи-*

модействия с потребителями или голос клиента в разных точках контакта;

- *дальнейшая консолидация игроков рынка с сохранением лидерства глобальных компаний – Adobe, Oracle, IBM, Avaya, TeraData, SAP SE, SAS Institute, Service Management Group и Tech Mahindra Limited.*

Несмотря на большую схожесть подходов CRM и СЕМ, в них есть ряд различий, описанных в таблице.

Подход СЕМ предполагает переориентацию бизнес-моделей компаний на клиентоцентричные, в которых информация о взаимодействиях видится стратегическим ресурсом и закладывается в качестве клиентских показателей результативности в основу стратегий роста. В клиентоориентированных бизнес-моделях все структурные подразделения компании работают с опорой на выполнение данных показателей и становятся общими звеньями цепочек создания потребительской ценности. Круг задач СЕМ шире и фокусирует внимание руководителей на достижении финансовых показателей посредством наращивания этой ценности.

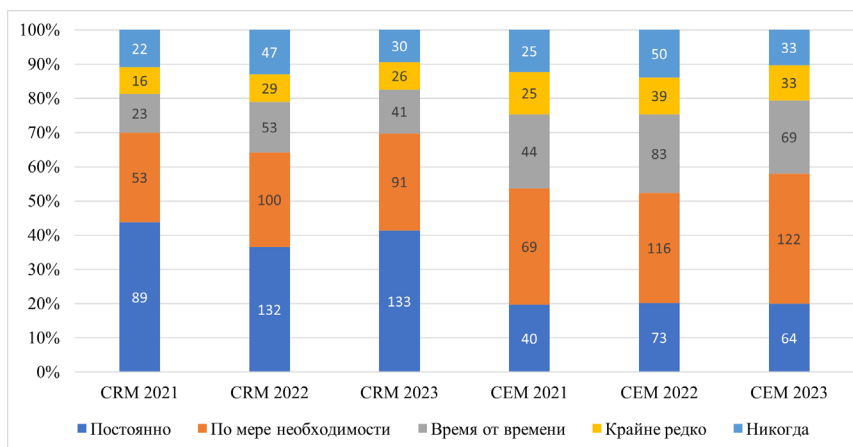


Рис. 2. Количество и доля белорусских компаний, применяющих технологии CRM и СЕМ

С 2021 по 2023 г. коллектив сотрудников факультета маркетинга и логистики Белорусского государственного экономического университета под руководством автора проводил ежегодный опрос более 300 специалистов, представляющих организации разных форм, масштабов и отраслей деятельности. Согласно данным 2023 г., в нашей стране CRM и СЕМ-технологии на постоянной основе используют свыше 40% и 20% компаний соответственно, по мере необходимости – 70% и 58% (медленный рост в сравнении с предыдущими годами), никогда не применяли эти технологии порядка 10% (рис. 2).

Результаты опроса 2023 г. относительно уровня перспективности указанных технологий на

ближайшие 3 года представлены на рис. 3. 79% компаний считают их очень перспективными и перспективными на этот период.

В сегменте лидеров (компания является лидером (одним из лидеров) рынка, ей удается перевыполнять свои планы) 91% представителей оценили перспективность СЕМ более высоко, чем CRM. 49% в этой группе отнесли CRM и 45% – СЕМ-технологии к очень перспективным, тогда как в целом по выборке – 39% и 40% соответственно. Неперспективной CRM-технологии считает 5,3% опрошенных, СЕМ – 2,81% респондентов.

Обеспечение позитивного и в то же время управляемого клиентского опыта становится важной задачей и для отечественных

предприятий. В своих исследованиях мы задали вопрос относительно приоритетности отдельных маркетинговых возможностей (рис. 4). В тройку лидеров в 2021 г. вошли усиление SMM-стратегий и тактик, персонализация клиентского опыта и построение эффективного многоканального маркетинга – все направления в большой мере задействованы в СЕМ, так как ориентированы на эффективную коммуникацию и действенную обратную связь с клиентом, создание его уникального представления о компании, в особенности если говорить о технологиях и подходах персонализации. В приоритете оказался маркетинг данных, персонализация уступила место видео- и вовлекающему маркетингу, менее значимым стал контент-маркетинг, защита персональной информации, поскольку проблемы решены уже на предыдущих этапах и не рассматриваются как максимально важные на перспективу.

Среди значимых вызовов на 1-е место специалисты ставили поиск новых подходов в привлечении и удержании клиентов: 58,4% респондентов в 2021 г., 49,9% – в 2022-м и 48% – в 2023-м. Такое внимание отчасти объяснимо и падением спроса. В период пандемии с ним столкнулось 54,5% белорусских товаропроизводителей, в 2022–2023 гг. – порядка 40%. Согласно данным, представленным на рис. 5, в качестве важного вызова в 2021 г. отмечалась необходимость разработки специальных маркетинговых проектов, тогда как в 2022–2023 гг. на 3-м месте оказалась необходимость перестройки логистических процессов, на 4-м – менее значимая в 2021-м нехватка квалифицированных специалистов, на 5-м – пересмотр партнерских связей. Отечественные субъекты хозяйст

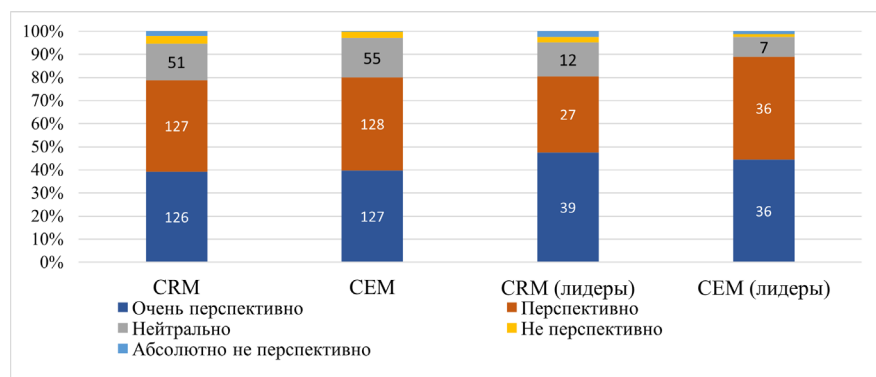


Рис. 3. Уровень перспективности технологий по мнению белорусских компаний

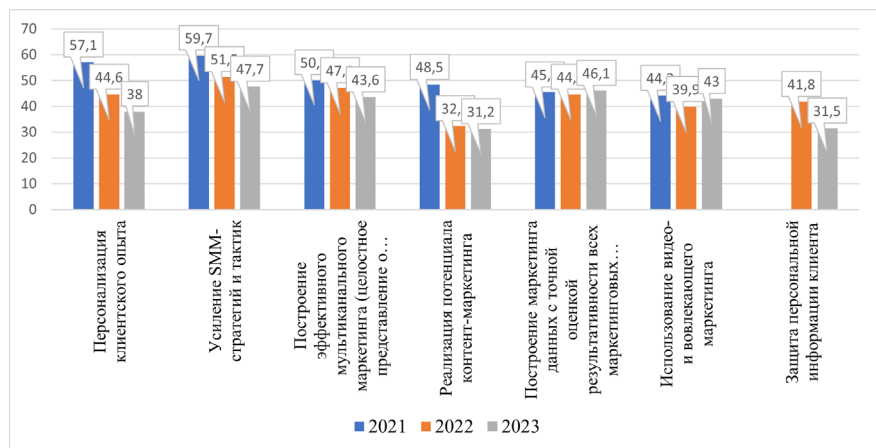


Рис. 4. Приоритетные возможности белорусских компаний, доля ответов, %

ния вынуждены искать и новые подходы и возможности сохранения клиентов, которыми в ряде случаев для лидеров в области финансов, сервиса и телекоммуникаций стали инструменты СЕМ (опыт ОАО «СБЕР Банк», банка «Дабрабыт», «А-100 Девелопмент», А1, МТС, сети медицинских клиник «Кравира», автомобильного холдинг «Атлант-М» и др.). Их опыт свидетельствует о необходимости перестроения бизнес-процессов, управления персоналом, переформатирования систем сбора и анализа клиентской информации.

В части основных проблем реализации подхода следует отметить: сложности автоматизации всех клиентоориентированных процессов, трудности сведения разрозненных данных, неготовность и нежелание потребителей погружаться в цифровую среду во всех взаимодействиях с компанией, недостаточная адаптированность («человечность») цифровых решений.

Таким образом, удержание клиентов и формирование положительного опыта, базирующи-



Рис. 5. Вызовы маркетинга в 2023 г., доля ответов, %

ся на применении специальных технологий и искусственного интеллекта, – критерии успешности зарубежных и белорусских предприятий в условиях ожесточающихся рыночных условий. Лидеры в области внедрения концепции СЕМ демонстрируют более высокие результаты и серьезные стремления, следуя мировым тенденциям, осознают важность персонализации и развития маркетинга в социальных сетях, отмечая особую роль CRM и СЕМ на перспективу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The State of Marketing Budget and Strategy 2022 // <https://www.gartner.com/en/marketing/research/annual-cmo-spend-survey-research>.
2. 2023 Digital trends. Experience Index // https://business.adobe.com/resources/sdk/digital-trends-report.html?faas_unique_submission_id=1876C2FC-3957-633C-A171-CFBE384D231A&poi=3289.
3. 2022 Digital trends // https://business.adobe.com/resources/sdk/digital-trends-report.html?faas_unique_submission_id=3A9CEA4B-91D2-9CB8-367F-F553B127FF7F.
4. Global Customer Experience Management Market. Polaris market research 2023 // <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/customer-experience-management-market>.
5. Marketing Technology Landscape 2022 // <https://chiefmartec.com/2022/05/marketing-technology-landscape-2022-search-9932-solutions-on-martechmap-com>.
6. Орлова М.В., Орлов В.В., Силина С.А. Влияние современных технологий на клиентоориентированность компаний // Маркетинг в России и за рубежом. 2022. №1 (147). С. 37–44.
7. Chaffey D. Latest Gartner Hype Cycles for Digital Marketing: 2009-2022 // <https://www.smartinsights.com/managing-digital-marketing/marketing-innovation/technology-for-innovation-in-marketing/>.
8. Орлова М.В., Ионов С.Д., Ромашова М.В. Некоторые аспекты эмоционализации клиентского опыта // Маркетинг в России и за рубежом. 2021. №1 (141). С. 11.
9. Леонов А.И. Цифровое слежение как способ исследования потребителей // Маркетинг в России и за рубежом. 2021. №2 (142). С. 27–36.
10. Кетова Н.П. Возможности учета запросов потребителей концепции маркетинга 4.0: ключевые тенденции, механизмы взаимодействия, показатели эффективности // Маркетинг в России и за рубежом. 2021. №4 (143). С. 3–10.

■ **Summary.** The article presents a description of the concept of management of CEM client experience, conducts its comparative characteristic with CRM technology. The author analyzes trends and prospects in the development of CEM solutions market, examines issues associated with their application in foreign organizations' activities, and presents data from Adobe research regarding the outcomes of their application by various companies. Marketing directors' objectives include using marketing technologies and distributing marketing budgets, and internal barriers to the development of CEM in organizations are discussed. The author's guidance is reflected in the analysis of the results of the research conducted. The study examined the opinions of experts from Belarusian organizations about the potential of CRM and CEM technologies, the prospects of personalizing customer experience, and the major challenges and problems in the field of Belarusian marketing. The author analyses the role of technologies, their prospects in the category of organizations classified as leaders and notes the greater orientation of leading companies on the use of digital marketing technologies, Recognizing their leading role in addressing the challenges of customer acquisition and retention.

■ **Keywords:** CEM (customer experience management), customer journey mapping, CEM solutions, CEM market, CX leaders.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-06-78-83>

Статья поступила в редакцию
12.11.2023 г.

Anatoly Kryvarot

**Belarusian strategic offensive operation
«Bagration»: day by day 4**

The final part of the of the journal «Science and Innovation» and the Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus joint project «Liberation. Chronicle of events» reveals the details of the «Bagration» operation, which was one of the most significant operations during the Great Patriotic War.

Natalia Minakova

The Features of searching on a nanoscale 11

In an interview with First Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Head of the Nano-Processes and Technologies Laboratory, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, NAS of Belarus, academician Sergei Chizhik analyzed the area of scientific knowledge related to nanotechnologies and nanomaterials, which is still of interest to scientists, manufacturers, businessmen and economists from both fundamental and applied points of view.

Tatyana Kulagova, Nikita Belko, Sergey Kilin

**Carbon nanostructures are promising nanomaterials
for sensors and theranostics 14**

The article shows the advantages of theranostics which is a modern multidisciplinary biomedical approach that combines diagnostics, therapy and monitoring the effect of mainly oncological diseases treatment.

Galina Melnikova, Alexander Solomyansky, Sergei Chizhik

**«Molecular design» technology for creating
coatings for various functional purposes 20**

The authors presented the methods for producing nanostructures on a solid surface by purposefully changing its properties at the molecular level («bottom up»), which are among the most important areas of fundamental and applied research both in the Republic of Belarus and abroad.

Alexey Trukhanov

Nanochemistry and life 25

The author analyses the ways of further development and application of nanomaterials showing fundamentally new properties which not observed at the macroscopic level. There are presented the gains of scientists from the Institute of Physical-Organic Chemistry and the Institute of Chemistry of New Materials, the National Academy of Sciences of Belarus, in this field.

Alexander Ilyushchenko, Tatyana Talako, Andrey Letsko

**Additive manufacturing of metal and ceramic
powder materials 28**

The article describes the advantages, limitations and ways to improve the additive production of metal and ceramic powder materials, the main stages of the complete production cycle construction and the main parameters determining the structure and properties of the products produced.

Vasilina Lapitskaya

Journey to the nanoworld: to see the invisible... 38

It is illustrated how precision probe techniques are used to describe the structure and properties of synthesized new materials and help to see what is not visible to the human eye.

Vladimir Makarevich

**Reference base of the Republic of Belarus
in the field of nanoscale 41**

It is shown how the creation of the National Standard of unit length – meter in the nanometer range, allowed to solve the problem of metrological support in the field of nanotechnology.

Yulia Vasilishina

**The key to nanotechnology:
from research to ready solutions 43**

Interview with academician, founder of «Advanced Research and Technologies» Sergey Zhdanok deals with the peculiarities of development and promotion of nanostructured materials on the market.

Zhanna Komarova

Big Small Technologies 48

The article gives an overview of innovative developments and products in various branches of economy created with the use of nanotechnology, shows their potential and risks associated with the development of nanoscience.

Iryna Yemelyanovich

Submicron level medicine 55

There is an overview of the latest world achievements in the field of nano-medicine.

Iryna Rymashevskaya

Opening «green» windows 60

Based on the UNCTAD report, the concept of creating new or improved products with a minimal carbon footprint is presented, opening «green» windows of opportunity.

Valentin Gorokhovik

**Without formulas on mathematical modeling
in consumption theory 66**

The article is written in the framework of a joint project with the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, which presents the essence of mechanisms and factors that influence the formation of consumer preferences in the market of goods and services.

Viktar Kalesnikovich

**Formalization of research objects and prerequisites
for creating an information multi-factor model 72**

The article develops methods of sectoral management, which allow to provide reliable filling of sectoral databases of knowledge that serve as a source of information, capable of forming models, close to human logic, on the basis of experience, facts, rules (heuristic).

Sviatlana Razumava

**Customer experience management
in the marketing concept 4.0 78**

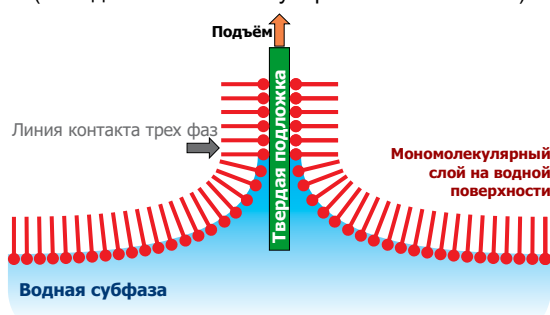
The problems of applying the CEM concept in the activities of foreign and Belarusian organizations have been analyzed, Adobe research data in this market and results of the survey of domestic specialists have been given.

Устройства предназначены для проведения физико-химических исследований при нанесении моно- и мультимолекулярных пленок на поверхность твердых образцов (подложек) по методике Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ), а также ее развитии и модификаций.

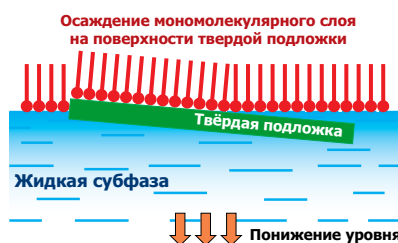
Области применения ЛБ-ванн охватывают такие приложения, как:

- формирование на твердой поверхности моно- и мультимолекулярных композиционных покрытий;
- изменение свойств поверхности (степени гидрофильности, оптических, электрических и др.);
- проведение фундаментальных исследований при получении ультратонких пленок, в том числе из коллоидных микрочастиц, и их использовании в качестве изолирующих, защитных и функциональных покрытий, элементов молекулярной электроники, в биологии для создания аналогов бислойных липидных мембран. и т.д.

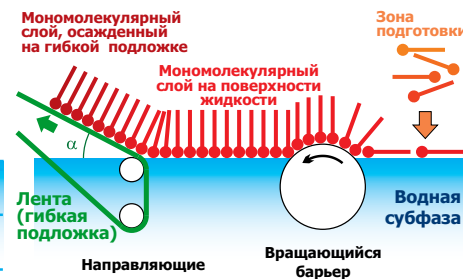
Традиционный метод Ленгмюра–Блоджетт
(осаждение мономолекулярной пленки типа Z)



Горизонтальное осаждение
мономолекулярного слоя



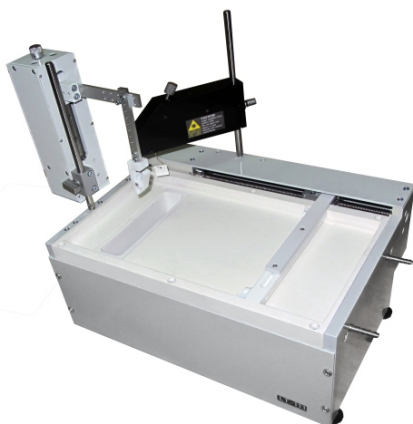
Осаждение мономолекулярного слоя
на ленточном (гибком) носителе



Разработанные и выпускаемые ОДО «Микротестмашины» устройства реализуют как традиционные методики осаждения моно- и полимолекулярных слоев, так и их усовершенствованные варианты, включая оригинальную технологию осаждения на поверхности непрерывного гибкого носителя (ленты). Возможна адаптация конструкции ЛБ-ванн для выполнения специфических задач заказчика.

LT-111

ЛБ-ванна с одним барьером. Для реализации всех базовых методик: измерение изотерм сжатия; осаждение пленок типа Z, Y, X; горизонтальное осаждение. Подложка размером до 120*120*4 мм. Термостатируемая платформа. Емкость ванны около 1 л.



LT-211

ЛБ-ванна с двумя барьерами. Для реализации всех методик: измерение изотерм сжатия; осаждение пленок типа Z, Y, X; горизонтальное осаждение, осаждение на ленточный носитель (дополнительная оснастка). Подложка размером до 120*120*4 мм. Термостатируемая платформа. Емкость ванны 1.2–1.5 л.

LT-310

ЛБ-ванна с одним барьером. Для реализации всех методик: измерение изотерм сжатия; осаждение пленок типа Z, Y, X; горизонтальное осаждение, осаждение на ленточный носитель (с расширенными экспериментальными возможностями). Подложка размером до 170*170*170 мм. Емкость ванны до 11 л.



LT-2211

ЛБ-ванна с двумя барьерами. Для реализации всех базовых методик: измерение изотерм сжатия; осаждение пленок типа Z, Y, X; горизонтальное осаждение. Компактный дизайн. Подложка размером до 80*50*15 мм. Термостатируемая платформа. Емкость сменной ПТФЭ-ванны от 0.05 л.





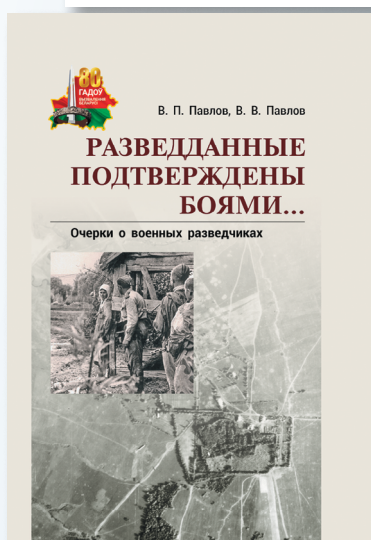
Адкуль праўда і крыўда : беларускія народныя легенды і былічкі : іл. выд. з гукавым дадат. / уклад.: А. М. Боганева, Т. В. Валодзіна; навук. рэд. А. І. Лакотка; іл. Г. М. Жураўлёвай. – Мінск : Беларуская навука, 2024. – 231 с. : іл. – (Фальклорныя скарбы Беларусі).

ISBN 978-985-08-3147-7.

У выданне ўключаны легенды і былічкі як асаблівае форма назапашвання, захавання і перадачы традыцыйных ведаў аб прыродзе, соц്യуме, грамадстве, чалавеку. Акцэнт зроблены на запісах апошніх дзесяцігоддзяў, што выяўляе жыццяздольнасць і глыбіню памяці культуры вуснага тыпу нават у нашу тэхнакратычную эпоху. Частка з іх друкуецца ўпершыню. Пераказ сюжэта на рускую і англійскую мовы пашырае чытацкую аўдыторыю. Тэксты ілюстраваныя адметным відам беларускага народнага мастацтва – выцінанкамі.

Кніга суправаджаецца аўдыя- або відэазапісамі асобных тэкстаў, зробленымі ўкладальнікамі ў розных раёнах Беларусі, якія размешчаны на YouTube-канале.

Адрасавана шырокаму колу чытачоў.



Разведданные подтверждены боями... : очерки о военных разведчиках / В. П. Павлов, В. В. Павлов. – Минск : Беларуская навука, 2024. – 279 с. : ил.

ISBN 978-985-08-3143-9.

Исследуется деятельность разведывательно-диверсионных отрядов и групп (Главного) Разведывательного управления Генштаба Красной Армии на территории Белоруссии, их тесная связь с партизанским движением и населением в ходе осуществления своих боевых задач.

Адресована специалистам-историкам, преподавателям и студентам, всем, кто интересуется историей советской разведки во время Великой Отечественной войны.



Фронтовые кинодокументалисты – создатели кинолетописи освобождения Беларуси : биофильмографический справочник / К. И. Ремишевский. – Минск : Беларуская навука, 2024. – 231 с. : ил.

ISBN 978-985-08-3144-6.

В справочник включены сведения о 70 создателях фронтовой кинолетописи – кинодокументалистах, начальниках фронтовых киногорупп, организаторах кинохроникального процесса, которые внесли существенный вклад в создание масштабной кинолетописи освобождения Беларуси в годы Великой Отечественной войны. Значительная часть сведений публикуется впервые.

Приведенные в справочнике сведения о снятых кинодокументалистами репортажах и очерках призваны выступить методологическим основанием для формирования масштабного Фонда экранных документов «Кинолетопись освобождения Беларуси».

РУП «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «БЕЛОРУССКАЯ НАУКА»

предлагает литературу

- по медицине
- искусствоведению
- литературоведению
- языкознанию
- этнографии
- фольклору
- естественным наукам

принимает заказы на печать

- бланки формата А₅, А₄, А₃
 - грамоты ● дипломы
 - канцелярские книги
 - блокноты ● блоки для записей
 - календари ● буклеты
 - проспекты (с разработкой дизайна)
- тираж от 1 экземпляра*

Получить информацию об изданиях и оформить заказ можно по телефонам:
+375 (17) 396-83-27,
370-64-17, 320-33-74.

*Адрес: ул. Ф. Скорины, 40,
220084, г. Минск,
Республика Беларусь;
e-mail: belnauka@mail.ru;
сайт: www.belnauka.by*