

ХИМИЯ В XXI ВЕКЕ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ РОССИИ

© 2022 г. М. П. Егоров^{a,*}, А. Л. Максимов^{b,**}, А. М. Музафаров^{c,d,***},
Н. Э. Нифантьев^{a,****}, А. Ю. Цивадзе^{e,*****}

^aИнститут органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия

^bИнститут нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия

^cИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

^dИнститут синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

^eИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

*E-mail: mpe@ioc.ac.ru

**E-mail: max@ips.ac.ru

***E-mail: aziz@ispm.ru

****E-mail: nen@ioc.ac.ru

*****E-mail: tsiv@phyche.ac.ru

Поступила в редакцию 15.09.2021 г.

После доработки 30.09.2021 г.

Принята к публикации 06.10.2021 г.

В статье анализируется роль химии в развитии промышленности в мире и в России с учётом необходимости достижения целей, поставленных в Стратегии научно-технологического развития РФ. Подчёркивается значение химии как “сквозной” дисциплины, обеспечивающей реализацию основных приоритетов научно-технологического развития страны и возможности инновационного роста практически всех отраслей её экономики. Указывается, что, хотя и видны существенные успехи в области производства крупнотоннажной химической продукции первых переделов (прежде всего удобрений и полиолефинов), общий объём производства, вклад химической промышленности в ВВП существенно ниже, чем в развитых странах. Несмотря на предпринимаемые усилия, удельный вес средне- и малотоннажной химии, в том числе тонкого органического синтеза, в общем объёме химического производства всё ещё не велик. Возможности создания и использования отечественных технологий ограничены низким уровнем государственного и частного финансирования исследований и разработок в этой сфере, а также отсутствием эффективных организационных форм поддержки инноваций в университетском и академическом секторах науки. Несмотря на значительные инвестиции в создание новых производств, для подавляющего большинства видов химической продукции сохраняется высокий уровень технологической импортозависимости.



ЕГОРОВ Михаил Петрович – академик РАН, академик-секретарь Отделения химии и наук о материалах РАН, директор ИОХ РАН. МАКСИМОВ Антон Львович – член-корреспондент РАН, директор ИНХС РАН. МУЗАФАРОВ Азиз Мансурович – академик РАН, руководитель секции химических наук ОХНМ РАН, заведующий лабораториями ИНЭОС РАН и ИСПМ РАН. НИФАНТЬЕВ Николай Эдуардович – член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией химии гликоконъюгатов ИОХ РАН. ЦИВАДЗЕ Аслан Юсупович – академик РАН, руководитель секции наук о материалах ОХНМ РАН, научный руководитель ИФХЭ РАН.

Дальнейшее развитие химической промышленности России требует перехода к химии XXI века за счёт внедрения принципиально новых, экологически безопасных, энерго- и ресурсосберегающих технологий на базе достижений современной химической науки. В этом случае можно не просто существенно расширить ассортимент продукции с высокой добавленной стоимостью для развития смежных с химической промышленностью отраслей, но и создать устойчивую базу для ответа российской экономики на большие вызовы, стоящие перед страной.

Ключевые слова: химия, химическая технология, экономика, экология.

DOI: 10.31857/S0869587322020025

Трансформация науки и технологий в ключевой фактор развития России, а также обеспечение способности страны эффективно отвечать на большие вызовы выступают в качестве основы успешного развития нашего государства и определяют конкурентоспособность его экономики и эффективность стратегии национальной безопасности. Существенное значение при этом играют те направления научно-технологического развития, которые обеспечивают переход от экстенсивной к интенсивной эксплуатации ресурсов. Эти направления должны быть ориентированы на использование возобновляемых природных ресурсов, создание и внедрение новых производственных технологий. При этом всё более важную роль играют комплекс исследований, направленных на снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду и изменение климата, и создание научной основы для трансформации глобальных и локальных энергетических систем. Это становится особенно актуальным в связи с постепенным снижением использования ископаемых углеродосодержащих ресурсов и повышением роли возобновляемых источников энергии.

Принципиальным для устойчивого развития страны является обеспечение продовольственной безопасности и продовольственной независимости. Для этих направлений, сформулированных в Стратегии научно-технологического развития РФ (СНТР РФ), в качестве приоритетных установлены разработка и внедрение методов трансформации ресурсов, известных и новых веществ и материалов, служащих материальной основой новых технологий и продуктов [1].

Не вызывает сомнений, что химия как наука о веществах и их превращениях [2] стала сегодня междисциплинарной областью знаний. Благодаря этому она формирует не только фундаментальную, но и практическую основу подавляющего большинства междисциплинарных исследований по всем приоритетным направлениям СНТР РФ, призванным обеспечить эффективное экономическое развитие страны [3–6]. Именно химия и химическая промышленность играют ключевую роль в успешной реализации не только Стратегии научно-технологического развития РФ, но и дру-

гих программ в научной сфере, в частности Национальной технологической инициативы (НТИ) – долгосрочной межведомственной программы частно-государственного партнёрства по содействию и развитию новых перспективных рынков на базе высокотехнологичных решений. Действительно, без активных исследований в области химии невозможно создание новых производственных технологий и индустрии современных материалов [7, 8], развитие традиционной и новой энергетики [9–11], сельского хозяйства [12, 13], биотехнологий [14], совершенствование системы национальной безопасности [15], медицины [16], транспортных систем [17].

Необходимо подчеркнуть, что последние пять лет химическая промышленность в России развивается особенно интенсивно, что обусловлено высоким уровнем инвестиций (до 500 млрд руб. в год) в крупнотоннажную химическую продукцию и строительством новых, экспортно-ориентированных производств минеральных удобрений, продукции газохимии и полиолефинов. Эти усилия привели к существенному росту экспорта данных веществ. Так, к 2020 г. выручка от экспорта удобрений по сравнению с 2016 г. увеличилась на 1.8 млрд долл. США. По уровню производства и основным позициям на мировом рынке удобрений Россия занимает теперь 2–4 место, а по комплексным минеральным удобрениям – 1 место в мире [18, 19]. Экспорт крупнотоннажных полимеров (полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и полистирола) в 2020 г. вырос на 74% и достиг 2.6 млн т (2.3 млрд долл.) [20]. Возросли продажи за рубеж таких продуктов, как капролактамы (2 место в мире), каустическая и пищевая сода (РФ входит в десятку крупнейших экспортёров), оксида и гидроксида лития (3 место в мире) и других видов крупнотоннажной химии [21].

Тем не менее, несмотря на существенные позитивные сдвиги, ситуация в химической промышленности остаётся сложной. Так, Россия по экспорту полимеров занимает 20–30 место в мировом рейтинге [22]. Сегодня в экспорте преобладают крупнотоннажная продукция промышленной органической химии и нефтехимии (метанол, крупнотоннажные полимеры и изделия из них, кислоты, капролактамы – их суммарный экспорт



Рис. 1. Величина оборота продукции химической промышленности стран мира
Рассчитано по [25–28].

в 2020 г. составил более 4.6 млрд долл.) и удобрения (около 7 млрд долл.). На продукцию же высоких переделов, такую как лаки и краски, клеи и адгезивы, пестициды, в экспорте приходится немногим более 400 млн долл., а на фармацевтическую продукцию – лишь около 1 млрд долл. [21, 23]. *Очевидно, что такая ситуация требует существенных изменений, связанных не только с дальнейшим стимулированием роста производства продуктов крупнотоннажной химии, но и, прежде всего, опережающего развития технологий получения премиальных продуктов высокой добавленной стоимости за счёт использования российского научно-исследовательского потенциала.*

РОЛЬ ХИМИИ В МИРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

Химическая переработка природных ресурсов вносит существенный вклад в ВВП всего мира, но в большей степени – в экономику развитых стран. Объём только химической промышленности (не считая производства топлива и масел, фармацевтической и металлургической промышленности, в которых химия играет ключевую роль) приближается к 4 трлн долл. и превышает 8% мирового ВВП [24]. В США на неё приходится 6.2% ВВП, в Германии – 6.9, в КНР – 8.9, причём Китай производит химической продукции больше, чем США и ЕС вместе взятые [25–27]. Лидеры, помимо КНР и США, – Германия, Япония и Южная Корея (рис. 1).

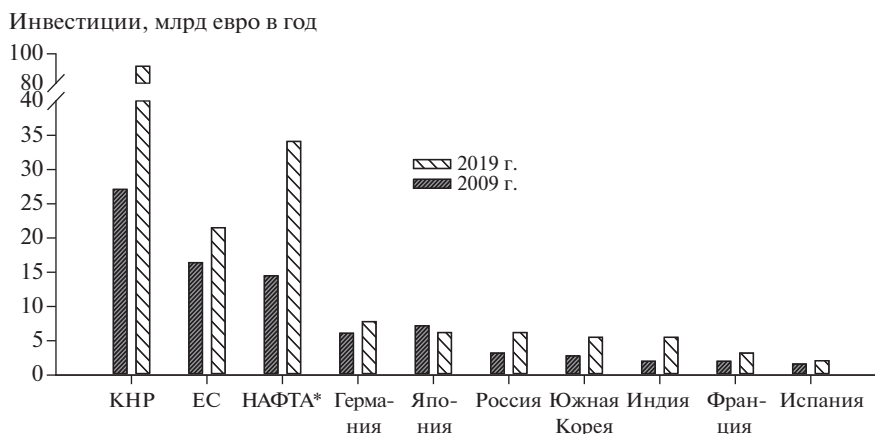
Химическая промышленность – одна из наиболее важных с точки зрения косвенного и индуцирующего эффектов: один доллар, вложенный в химическое производство, добавляет в среднем 4.7 долл. к ВВП в смежных отраслях [26, 27]. Следует отметить, что в самой химической промышленности занято 15 млн человек, а в смежных отраслях – более 120 млн [24, 27]. Такая ситуация

объясняется тем, что химическая продукция – промежуточная и используется для получения конечной продукции практически во всех сферах экономики: от аэрокосмической и электроники до производства топлива, полимерных и конструкционных материалов, лекарств, средств защиты растений и т.д. Так или иначе от химии зависит 96–98% всего промышленного производства. При этом темпы роста в химической промышленности в последние годы существенно превышают средние темпы роста ВВП в мире [28].

Основой для развития промышленной химии служит сочетание высокого уровня инвестиций в освоение новых производств и развитие исследований и разработок (рис. 2, 3). Мировые инвестиции в химическую промышленность в 2019 г. превысили 190 млрд долл. Лидирующие позиции занимают КНР (более 87 млрд долл.) и США (более 30 млрд долл.) [25, 26]. Они же – одни из лидеров по финансированию НИР и ОКР. В мире на эти цели тратится более 50 млрд долл. (за 10 лет произошёл почти двукратный рост), первые позиции занимают КНР (14 млрд долл.; рост за 10 лет более чем в 4 раза), США (более 12 млрд), ЕС (11 млрд) и Япония (около 7 млрд) [26].

В поддержке химических разработок существенную роль играет бизнес: затраты компаний на исследование исчисляются сотнями миллионов и миллиардов долларов и составляют 1–2% от общего объёма продаж химической продукции (табл. 1) [29, 30]. Заслуживает внимания и такой показательный факт: в зарубежных научных исследованиях в области химии и химической технологии занято 1.7 млн человек [26, 27].

Именно фундаментальные и прикладные исследования в области химии служат основой современных химических технологий и обеспечивают развитие компаний – технологических ли-



*НАФТА – Североамериканская зона свободной торговли.

Рис. 2. Величина инвестиций в химическую промышленность в 2009 и 2019 гг. Рассчитано по [25–31].

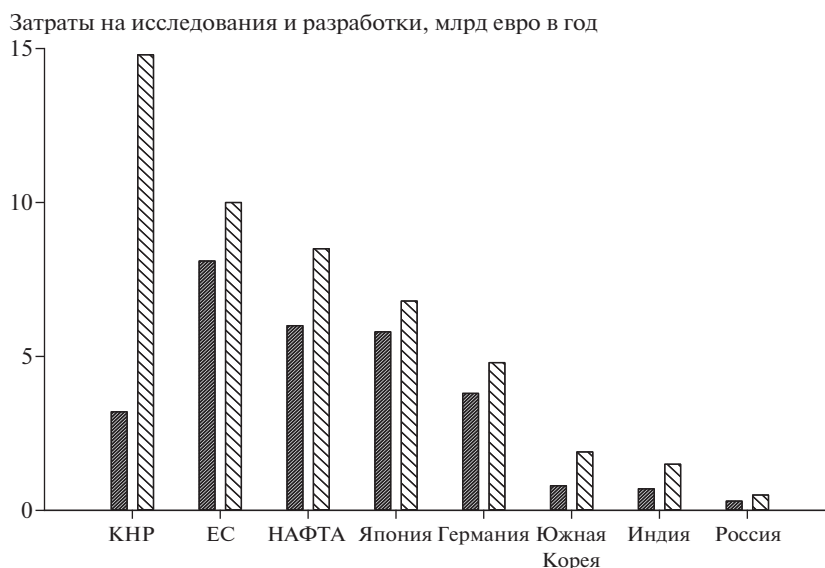


Рис. 3. Величина расходов на исследования и разработки в области химии по странам мира. Рассчитано по [25–31].

дерев. Такие компании, в том числе их дочерние предприятия — производители химической продукции, специализируются на создании и продаже новых технологий и часто видят своей целью получение дохода не от производственной, а от научно-технологической деятельности. Именно они выступают основным заказчиком для университетов и научно-исследовательских организаций и обеспечивают привлечение инвестиций от потенциальных потребителей.

Развитие химической промышленности и исследований в области химии становится определяющим фактором достижения успеха как в тра-

диционных, так и во вновь возникающих отраслях. Следует учитывать, что в развитых странах все ключевые высокотехнологичные отрасли промышленности неразрывно связаны с химией и производством химических веществ. Это энергетика, нефтехимическая промышленность и промышленный органический синтез, производство удобрений, тонкий органический синтез и производство лекарственных препаратов, получение полимерных и композитных материалов, металлургия, производство неорганических материалов, в том числе сверхчистых веществ и материалов для разных целей [24, 27]. Список отрас-

лей, зависимых от химии, можно продолжать, поскольку химические технологии и подходы являются “сквозными”, обеспечивающими производство подавляющего большинства конечной продукции. Именно прогресс в области химии и химической технологии во многом определяет успех в преодолении тех или иных технических и технологических барьеров, возникающих в ходе развития экономики. Он не только обеспечивает рыночные конкурентные преимущества для национальных и транснациональных компаний, но и служит ключевым фактором при решении проблем обороноспособности, стратегической стабильности и национальной безопасности страны, гарантируя возможность устойчивого развития даже в условиях жёстких санкций. И напротив, отсутствие возможностей для реализации таких решений делает государство зависимым от внешних агентов и не позволяет проводить собственную независимую политику.

Развитие химии и создание производственных цепочек от отдельных видов сырья до специальных полупродуктов побуждают смежные отрасли к производству конечной высокотехнологичной продукции; в свою очередь, развитие смежных отраслей ставит новые задачи и стимулирует исследования в химии и создание современных химических технологий. Другими словами, наблюдается явный синергизм между производством широкого круга конечной продукции и прорывными разработками в области химии. Таким образом, химия и науки о материалах становятся необходимым и незаменимым инструментом для решения актуальных задач – будь то сокращение углеродного следа и декарбонизация экономики, переход к новым принципам функционирования компьютерных устройств или аддитивным технологиям.

СИТУАЦИЯ В РОССИЙСКОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Российская химическая промышленность, несмотря на отмеченные успехи, существенно отстаёт от развитых стран как по доле в ВВП, так и по общему объёму производимой продукции и доле продуктов высоких переделов. В РФ при наличии огромных сырьевых ресурсов для производства широкого ассортимента химической продукции её доля в ВВП близка к 3% с учётом производства как органических, так и неорганических веществ – оценочно это 54–62 млрд долл. (без нефтепереработки, металлургии и фармацевтики). По данным Минпромторга России [31], в 2020 г. доля химической продукции в ВВП достигла 4.5 трлн руб., что в 2 раза меньше, чем в Южной Корее, более чем в 3 раза меньше, чем в Японии, уступает аналогичным показателям Испании и Бельгии, но сравнима с промышленно-

Таблица 1. Расходы зарубежных компаний на исследования и разработки, млн евро [29]

Компания	2003 г.	2009 г.	2011 г.
AKZO Nobel	566	327	356
BASF	1173	1398	1605
Bayer	2414	2746	2932
DOW	1992	1492	1646
DSM	268	378	476
Dupont	1333	1378	1956
Solvey	413	555	156
Uniliver	1065	891	1009

стью Голландии, не относящейся к государствам, богатым сырьевыми ресурсами. Следует отметить, что вся РФ производит химической продукции меньше, чем один крупнейший в мире немецкий химический концерн BASF (75.5 млрд долл.) [32]. Как следствие, можно говорить о низком уровне потребления химической продукции на душу населения (в 5–20 раз ниже, чем в развитых странах).

Ещё меньше доля в российском ВВП смежных с химией отраслей, что, без сомнения, связано с неудовлетворительным выполнением соответствующих НИР и ОКР. Финансирование исследований и разработок в области химии в России несравнимо меньше, чем в развитых странах, и оценочно составляет, даже с учётом смежных направлений, около 0.5 млрд долл., а затраты на исследования в области химии существенно ниже [33]. Это диссонирует с относительно высоким уровнем инвестирования в отечественную химическую промышленность, которое, как указывалось выше, связано с развитием новых крупнотоннажных производств в нефтехимии и производством удобрений (см. рис. 2). В России существует серьёзный дисбаланс в субсидировании исследований и разработок: если в развитых странах финансирование НИОКР лишь в 2–3 раза ниже уровня общих капитальных инвестиций и может даже превышать их (как, например, в Японии), то у нас оно более чем на порядок меньше.

Невысокие затраты на исследования и разработки в нашей стране вынуждают направлять подавляющую часть средств, предназначенных для создания новых производств, на закупку и внедрение зарубежных, зачастую хорошо и давно известных на рынке технологий производства крупнотоннажной продукции низких переделов. В конечном итоге финансируются зарубежные разработчики технологий. И это при том, что позиции России в фундаментальной химии до сих

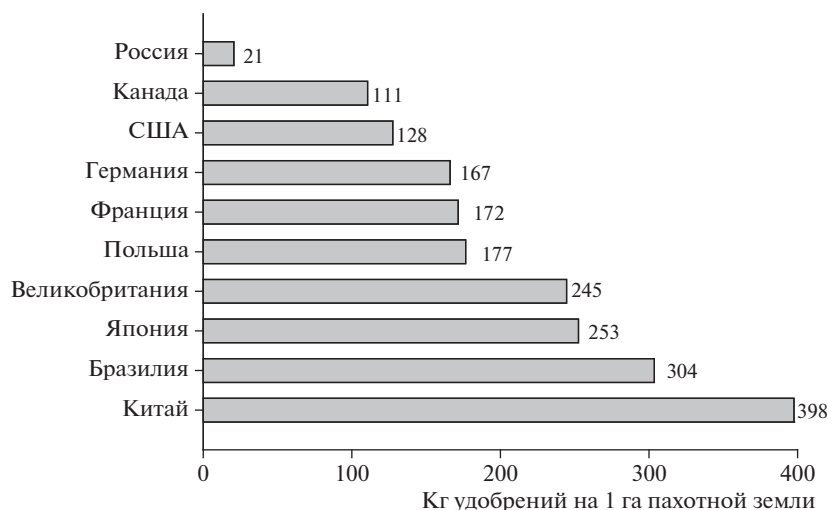


Рис. 4. Расход удобрений в расчёте на гектар
 Рассчитано по данным Всемирного банка за 2018 г. [36].

пор достаточно сильны. По рейтингу публикационной активности во многих областях химии РФ находится между пятым и десятым местом, причём по органической и неорганической химии входит в пятёрку ведущих стран мира [34]. Несмотря на значительные успехи в фундаментальных исследованиях в области химии и наук о материалах, а также в производстве минеральных удобрений и ряда крупнотоннажных полимеров (прежде всего полиолефинов, производимых компанией “Сибур”), химический комплекс страны не обеспечивает необходимую “элементную” базу для получения большого числа критичных для экономики продуктов с высокой добавленной стоимостью.

В области использования крупнотоннажной продукции также наблюдается существенное отставание. Так, интенсивность внесения удобрений у нас заметно ниже научно обоснованной нормы (20 кг на 1 га по сравнению со 130–180 кг в Европе и США) (рис. 4); как следствие, урожайность в сельском хозяйстве ниже мировой. Введение новых мощностей по производству крупнотоннажных полимеров не позволило России войти даже в десятку самых крупных их экспортёров (РФ в несколько раз уступает Таиланду – десятой стране в этом списке) (рис. 5). Экспорт же изделий из полимерной продукции на порядок меньше, чем в странах первой десятки. Одновременно отстаёт от развитых стран и уровень потребления полимерной продукции – 61 кг на душу населения. В США и Германии – 177 и 151 кг соответственно. Причём потребление в России самого массового полимера – полиэтилена – в 2019 г. составляло 3.4 кг на человека, то есть чуть больше, чем в Азии – основном потребителе нефтехими-

ческой продукции, в Европе – около 26 кг, в Северной Америке – 33 кг [35–37].

К сожалению, значимые научные результаты, в том числе междисциплинарные, непрерывно продуцируемые в научно-исследовательских институтах, находящихся под научно-методическим руководством РАН, и в ведущих лабораториях научно-образовательных организаций при эффективной поддержке РФФИ и РНФ, лишь в малой степени трансформируются в новые химические технологии. Среди успешных примеров можно назвать создание производства антитурбулентных присадок для перекачки нефти, а также ингибиторов образования газогидратов при нефтегазодобыче и перекачке, внедрение отечественного процесса получения этилбензола и производство ряда продуктов тонкой и специальной химии. Но эти разработки дошли до практики не благодаря системе работы с прорывными идеями, а скорее вопреки, поскольку системы работы с инновационными решениями, которые учитывали бы специфику химии, в нашей стране сегодня практически нет. Примеры эффективного взаимодействия академических институтов с бизнесом весьма немногочисленны (к ним прежде всего относится сотрудничество с наиболее крупными корпорациями – ПАО “Газпром”, ГК “Росатом” и “Ростех”). Именно поэтому недостаточное внимание уделяется первостепенному развитию “зелёных” химических технологий, призванных минимизировать негативное влияние химических производств на окружающую среду, а используемые технологические решения по большей части закупаются за рубежом, в том числе в странах, которые ещё недавно не могли конкурировать с Россией.

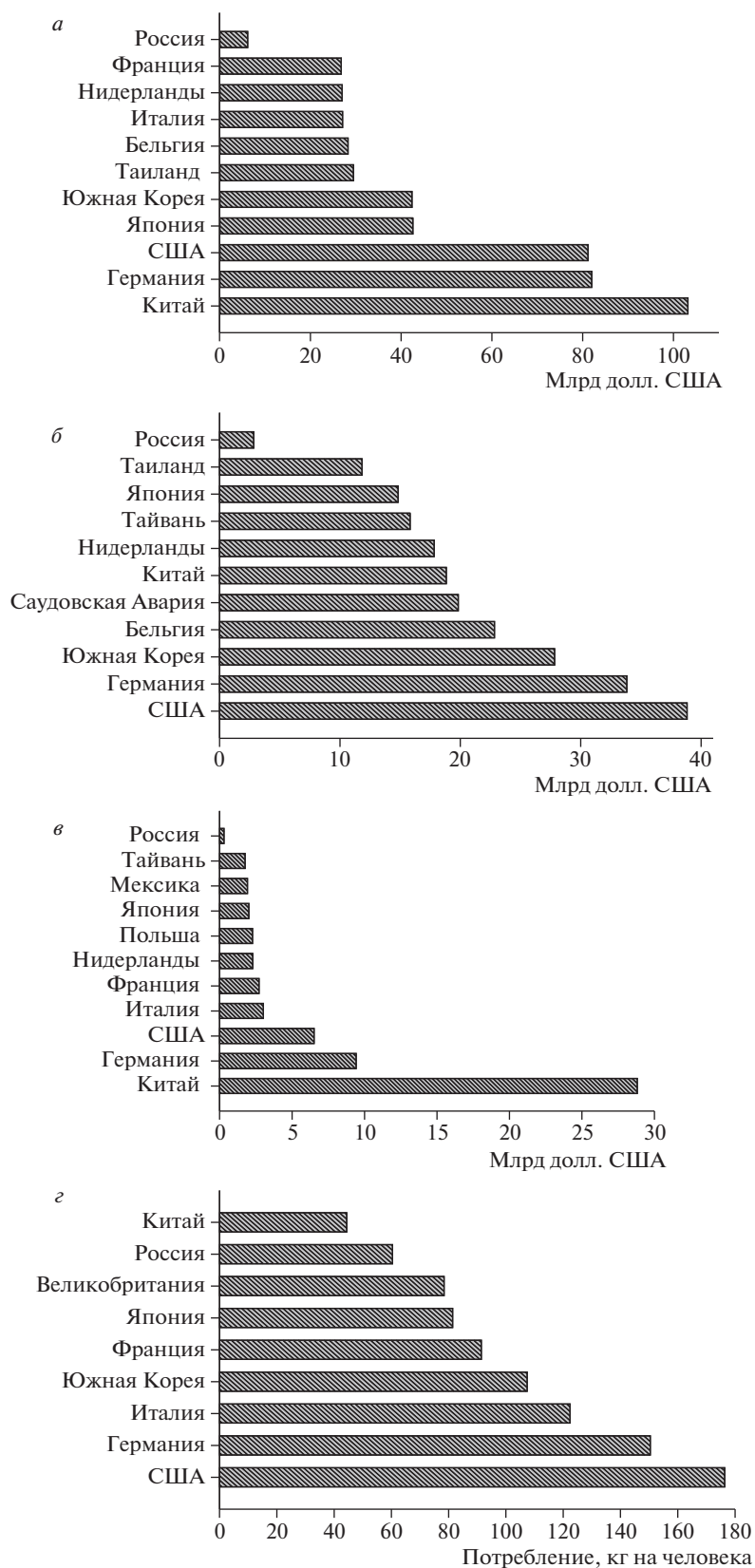


Рис. 5. Полимерная промышленность России и мира. Экспорт полимеров, резин и изделий из них по странам, 2019 г. (а); экспорт крупнотоннажных пластиков по странам, мир – 2018 г., Россия – 2020 г. (б); экспорт готовых изделий из крупнотоннажных пластиков, 2020 г. (в); потребление полимеров на душу населения, 2020 г. (г) [35–37]

Производство новых материалов с заданными свойствами, необходимых для развития практически всех отраслей отечественной промышленности, сдерживается отсутствием разнообразия выпускаемых соединений. Зачастую химические соединения заданного типа либо совсем не производятся в России, либо их ассортимент на 1–2 поколения отстаёт от зарубежного, что в период санкционного давления становится основным технологическим барьером, препятствующим инновационному развитию страны. Химическая промышленность высоких переделов, будь то средства защиты растений, производство высокочистых веществ, лакокрасочных материалов, лекарственных препаратов, композиционных материалов, резинотехнических изделий, текстиля, клеев, в подавляющем большинстве случаев использует химическую продукцию зарубежного производства. Если и возникают собственные производства, то они почти на 100% зависят от импортных технологий, катализаторов, добавок и других компонентов и исходных реагентов [39–41]. За последние десятилетия отмечается отрицательная динамика внедрения инноваций и в отечественную металлургическую промышленность, а также в создание эффективных материалов для инновационных экологически чистых и безопасных производств редких и редкоземельных металлов из бедных источников, водорода и энергетических устройств на основе водорода, полезных продуктов из отходов.

Примером издержек при переходе на новые принципы хозяйствования может служить ситуация с производством силиконов – одной из высокотехнологичных подотраслей советского химпрома. В 1991 г. на пике активности СССР на своих шести предприятиях, разбросанных по территории страны, объединённых в жёсткую сеть с единым центром управления в виде головного института, произвёл около 100 тыс. т силиконовой продукции. Сегодня мы такое количество ввозим из-за рубежа. Китай за это время практически с нуля вышел в мировые лидеры силиконового рынка, сосредоточив на своей территории более 75% мирового производства силиконов. На этом примере ярко видна разница между последовательно программным, с мощной государственной поддержкой подходом Китая и нашим волюнтаристическим подходом с лозунгом от отечественных управленцев, полагающих, что “рынок всё сам отрегулирует”.

Отдельные попытки такого известного института развития, как “Роснано”, осуществить прорыв в силиконовое будущее с печально знаменитым проектом по “солнечному кремнию”, не имевшим опоры на фундаментальную науку, закончился громким фиаско и миллиардными убытками. И это в то время, когда силиконовая наука страны фонтанирует прорывными идеями

и подходами с прицелом на экологически чистые технологии будущего [42].

ПОТЕНЦИАЛ МАЛОТОННАЖНОЙ ХИМИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ

Существенное значение для развития экономики страны имеют малотоннажная химия и продукция тонкого органического синтеза, которые характеризуются высокой добавленной стоимостью. Создание производств средне- и малотоннажной продукции принципиально важно с точки зрения повышения эффективности использования ресурсов, снижения затрат энергии и выбросов парниковых газов в расчёте на один рубль ВВП. Если за единицу принять стоимость исходного сырья, то продукция первого передела, а именно нефтепродукты и сжиженные газы, будет стоить 1.5; продукты следующего передела (базовые полупродукты нефтегазохимии) – 2.9; продукты третьего передела, если это крупнотоннажные полимеры, – 4.4, а если это высокотехнологичные и специальные полимеры, – 6.4; изделия из полимеров – 8–12, изделия из высокотехнологичных полимеров – 20 и более [43, 44]. В РФ можно говорить о прогрессе в этой области при реализации результатов исследований лишь по отдельным направлениям химии, прежде всего неорганической, и работам, связанным с оборонной сферой (“спецхимия” и технологии создания керамических материалов, полимеров и эластомеров, конденсированных энергетических систем, включая твёрдые ракетные топлива нового поколения), которые предполагают в том числе развитие соответствующих химических методов. Однако основная масса продукции в РФ приходится именно на первый и второй передел, в то время как в развитых странах – на продукты последующих переделов [39]. В структуре производства преобладают удобрения, крупнотоннажная нефтехимия и полимеры (в основном полиэтилен, полипропилен и поливинилхлорид), доля же продуктов средне- и малотоннажной химии (в отличие, например, от стран ЕС) – почти в 2 раза ниже (рис. 6).

Приоритетность развития производства средне- и малотоннажной продукции определена в одном из поручений Президента РФ по итогам совещания по вопросам стратегического развития нефтегазохимической отрасли, состоявшегося 1 декабря 2020 г. [43], согласно которому Правительство РФ должно принять меры по развитию до 2030 г. производства малотоннажной и среднетоннажной химической продукции и увеличению объёмов её выпуска к 2025 и 2030 гг. на 30 и 70% соответственно (по сравнению с 2020 г.). Определение такой продукции дано в Плане мероприятий (“дорожная карта”) по развитию про-

изводства малотоннажной химии в Российской Федерации на период до 2030 года [44]. Согласно данному документу, стоимостные параметры для малотоннажной химической продукции находятся в диапазоне 5–10 долл. США за 1 кг (для среднетоннажной химической продукции – 1.5–5 долл.); параметры по объёму производства на единичной мощности – 1–10 и 10–150 тыс. т в год для малотоннажной и среднетоннажной химической продукции соответственно; параметры по объёму потребления продукции в РФ – до 1 тыс. т для малотоннажной, от 1 до 50 тыс. т в год для среднетоннажной продукции. Согласно дорожной карте, приоритетные для развития производств – поверхностно-активные вещества, клеи, герметики (в том числе нефтеполимерные и синтетические смолы), химические вещества для пищевых добавок, катализаторы, инициаторы, ингибиторы (кроме ингибиторов коррозии, катализаторов нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности), химические средства защиты растений, химические реактивы и растворители, вещества для нефтедобычи и транспортировки нефти по трубопроводам, вещества для водоподготовки, пластики и каучуки специального назначения. Потребности в развитии среднетоннажной и крупнотоннажной химии отражены в документах, разрабатываемых Минэнерго РФ. Список указанных там продуктов, технологии получения которых необходимо внедрять в России, довольно широк [44]. По сути, речь идёт о восстановлении химической промышленности страны, испытывающей недостаток даже в стандартных химических продуктах.

Следует отметить, что уже начиная с 2018 г. Минпромторг РФ поддерживает проекты создания средне- и малотоннажных химических производств в рамках реализации Плана мероприятий по импортозамещению в отрасли химической промышленности Российской Федерации (утверждён приказом Минпромторга России от 29 мая 2018 г. № 2025). Всего планируется поддержать 136 инвестиционных проектов с общим объёмом инвестиций 461 млрд руб. [45]. До 2030 г. в рамках реализации Стратегии развития химической и нефтехимической промышленности на период до 2030 года объём вложений составит 1 трлн руб. Так, уже в 2020 г. было поддержано 12 проектов с суммарными инвестициями около 17 млрд руб. [46]. Предполагается, что ещё ряд приоритетных проектов по производству ключевых для смежных отраслей экономики продуктов средне- и малотоннажной химии будет утверждён в ближайшее время.

Даже с учётом заметных инвестиций общие капиталовложения будут явно недостаточны для быстрого развития отечественной химической промышленности. Действительно, указанные проекты не предполагают разработки и использо-

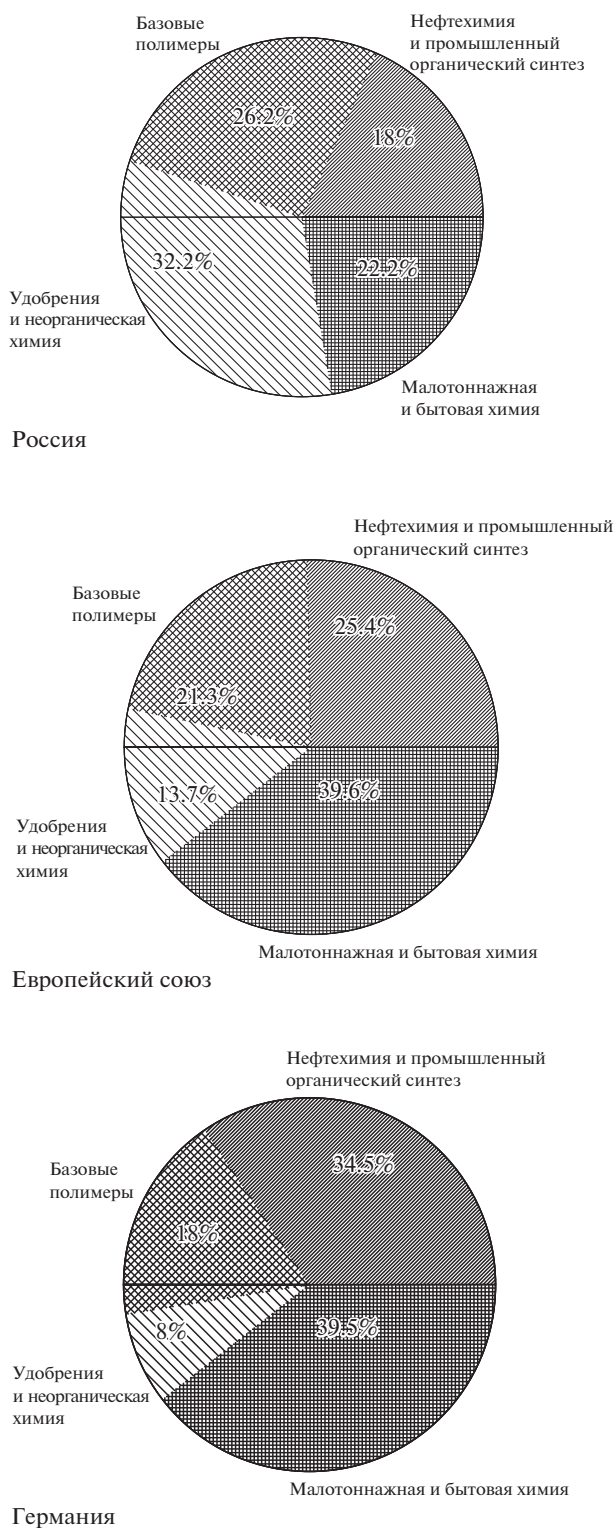


Рис 6. Структура производства химической продукции в России, ЕС и Германии [26, 34]

вания российских инновационных технологий. В рамках реализации программ импортозамещения, развития малотоннажной химии, фармацевтической промышленности поддерживается в ос-

новном не отечественное производство исходных химических полупродуктов, необходимых для получения конечной продукции, а, по сути, лишь “готовые формы”, исходные соединения для синтеза которых зачастую импортируются в РФ. При выборе приоритетных продуктов для поддержки производства и технологий не учитываются комплексный характер химических производств, возможность обеспечения первичными компонентами для получения сразу нескольких товаров из разных отраслей. Следует реализовать подход, при котором государственная поддержка производства продукции смежных отраслей предполагает поддержку всех элементов производственной цепочки от сырьевых компонентов до конечного продукта. Например, при производстве лекарств необходимо финансировать разработку и получение самих субстанций, при производстве лакокрасочных материалов – растворителей, мономеров, полимерных связующих, пигментов, наполнителей и добавок различной природы.

Отметим, что до сих пор отсутствует целенаправленная поддержка производства наиболее прибыльного сегмента химической промышленности – продуктов тонкого органического синтеза (*fine chemicals*). Традиционно в эту группу попадают продукты с объёмом производства до 1000 т в год и стоимостью выше 10 долл./кг, причём, как правило, выпуск таких соединений может осуществляться на унифицированных модульных технологических линиях. К этой же группе можно отнести особо чистые вещества и материалы для электроники [47]. Именно здесь скрыт один из наиболее важных резервов для увеличения эффективности использования российских ресурсов и перехода к производству продукции с высокой добавленной стоимостью, поскольку в области тонкого органического синтеза, как и направленного создания и исследования органических и гибридных молекулярных систем, российская наука занимает лидирующие позиции [48].

Перечень критических технологий Российской Федерации, основных направлений технологической модернизации экономики России, приоритетов СНТР РФ имеет принципиальный пробел, связанный с отсутствием приоритетного упоминания в нём большинства передовых химических технологий, включающих методы стерео-, регио-, атом-экономного и экологически безопасного органического синтеза, а также “зелёных” технологий. И это несмотря на критическую важность различных областей химии для обеспечения успешного технологического развития экономики страны. Ещё раз подчеркнём, что современные технологии по направлениям химии и новых материалов, безусловно, относятся, как сегодня говорят, к сквозным, а химическая промышленность вместе со смежными отраслями обладает максимальным потенциалом, чтобы

стать стимулирующей и “вытягивающей” отраслью. Это недавно нашло отражение в Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, где указано, что достижение лидирующих позиций в области химических наук – принципиально важная задача для достижения целей научно-технологического развития РФ (п. 76, ч. 13) [49].

Нельзя не отметить резкое отставание отечественного промышленного тонкого органического синтеза от современного уровня технологического развития. Причём надо иметь в виду, что без такой базы невозможно получение требуемых сегодня передовых лекарственных средств для здравоохранения и номенклатуры сырья для биотехнологии. Это уже создало импортозависимость в сфере, определяющей лекарственную безопасность страны. Трудно представить чрезвычайность сложившейся ситуации. По оценке президента компании “Активный Компонент” (крупнейший производитель фармацевтических субстанций в РФ) Александра Семёнова, доля фарм субстанций отечественного производства, необходимых для создания стратегически важных лекарственных препаратов, сегодня составляет лишь 6% от их общего объёма в весовом исчислении [50]. Общая же потребность России в субстанциях исчисляется многими тысячами тонн. Их отсутствие в отечественном исполнении создаёт сырьевую зависимость всей системы здравоохранения страны. И это несмотря на то, что в принятом Правительством РФ постановлении о стратегически значимых лекарственных средствах [51] чётко устанавливается их обязательное производство в РФ по полному циклу, включая субстанции. Из 162 синтетических лекарственных препаратов, включённых в указанный перечень, пока только 35 имеют отечественного производителя. Не менее тревожна и статистика по химическим субстанциям для производства 450 синтетических лекарств, внесённых в перечень “Жизненно необходимые и важнейшие лекарственные препараты” (ЖНВЛП), – из них только 80 производятся в РФ.

“ЗЕЛЁНЫЕ” ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ – ПРИОРИТЕТ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИИ

Приведённые данные свидетельствуют об отставании широкого сектора отечественной промышленности, в стоимостном выражении сопоставимого с сырьевыми отраслями. Существенный сдерживающий фактор развития производства синтетических лекарственных субстанций – отсутствие соответствующего репертуара современных химических промышленных технологий. Действительно, востребованные сегодня лекарственные соединения могут быть сложны по

своему строению (рис. 7). Для их производства требуются передовые методы тонкого органического синтеза. Чтобы освоить такие методы, необходимы национальные программы приоритетного развития промышленной химии и эффективное взаимодействие промышленных предприятий со специализированными лабораториями в исследовательских центрах. Это взаимодействие сегодня развито слабо.

Ключевая роль новых химических технологий — в обеспечении экологической безопасности страны, реализации мер по снижению накопленного экологического вреда и квалифицированной утилизации отходов, переходу к циклической экономике. Именно решения в области химических процессов рециклинга органических и неорганических отходов, создания новых легко перерабатываемых продуктов, экологически благоприятной среды будут иметь первостепенное значение для обеспечения конкурентоспособности страны уже в ближайшее время. Принципиальны здесь — поиск и воплощение в жизнь прорывных решений в области экологии в рамках национального проекта “Экология”, направленного на охрану окружающей среды. Его реализация идёт по пяти направлениям: утилизация и переработка отходов, сохранение водоёмов и повышение качества питьевой воды, уменьшение загрязнения воздуха, защита природы и животных, внедрение наиболее эффективных природоохранных технологий. Необходимость развития всего комплекса научно обоснованных мер для снижения антропогенной нагрузки относится к несомненным приоритетам научных и прикладных исследований в этой области.

Химия должна сыграть принципиальную роль в декарбонизации экономики и новом энергопереходе. Именно химические подходы призваны обеспечить его. Пренебрежение работами в этой области создаёт дополнительные риски для безопасности страны и ведёт к реальным экономическим потерям. Для России роль химии должна быть связана ещё и с поиском подходов к максимально эффективному вовлечению углеводородного сырья в этот процесс, что обеспечит сохранение конкурентных преимуществ российской энергетики и химической промышленности. Необходимо усиленное развитие новых направлений фундаментальных и поисковых исследований в области переработки углеродосодержащего сырья, в частности связанных с переработкой диоксида углерода, низкоуглеродным производством водорода, а также химической продукции путём вторичной переработки полимерных отходов, с развитием методов так называемой “зелёной” химии и технологий превращения электрической энергии в химическую продукцию (*power-to-chemicals technologies*).

Следует также отметить ведущую роль химии и наук о материалах в развитии водородной энергетики. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации указывает, что достижение целей в этой области требует разработки отечественных низкоуглеродных технологий производства водорода методами конверсии, пиролиза углеводородов, газификации угля и электролиза. Кроме них нужны технологии крупнотоннажного хранения и транспортировки водорода, как и улавливания, хранения, транспортировки и использования углекислого газа, а также технологии топливных элементов и материалов нового поколения для всех указанных низкоуглеродных технологий [52].

При практической реализации технологий в крупно-, средне- и малотоннажной химии существуют серьёзные проблемы и технологические барьеры, обусловленные необходимостью повышения так называемого уровня готовности технологий (УГТ) [53] крупно- и среднетоннажной химии и их масштабирования; создания центров пилотных испытаний и отработки технологий, в том числе для малотоннажной химии; развития химического инжиниринга и новых направлений фундаментальных и поисковых исследований в указанных областях. В России отсутствуют компании, которые специализировались бы только на создании и реализации химических технологий, служащих основной их экономической деятельностью. Как правило, роль по внедрению берут на себя производственные компании, для которых разработка и внедрение новых технологий не являются профильным бизнесом, они не воспринимают эту деятельность как приоритетную бизнес-задачу. Поэтому для распространения в промышленной сфере современных отечественных химических технологий принципиально важно целенаправленно поддерживать их комплексное развитие и полный инновационный цикл — от фундаментальных исследований к ориентированным научным разработкам, опытному производству и последующему внедрению в промышленность. Механизмом здесь могли бы выступить комплексные научно-технологические программы и проекты, формирование которых предусмотрено СНТР РФ. Можно только приветствовать утверждение в середине 2021 г. первых комплексных научно-технических программ (КНТП). Все они разработаны при активном участии РАН и так или иначе связаны с химией — будь то производство компонентов для сухих молочных смесей, выпуск новых материалов для “Росатома”, программа по экологии Кузбасса или внедрение катализаторов и нефтехимических технологий компанией “Титан”. Но пока механизм формирования и экспертизы КНТП тяжеловесен, а наличие узкого временного горизонта влечёт за со-

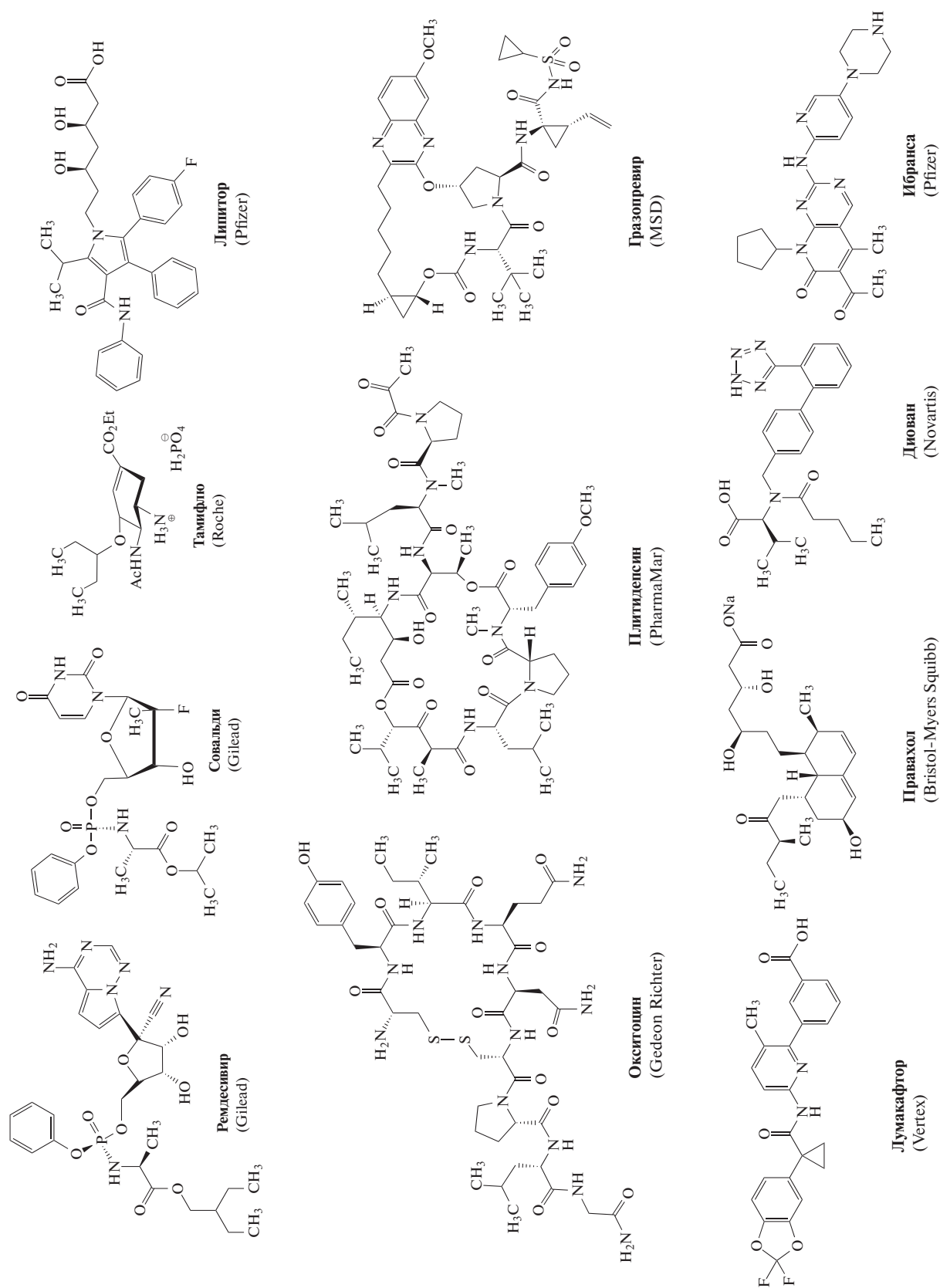


Рис. 7. Примеры структур активных компонентов некоторых современных лекарств, представленных на мировом рынке

бой существенные ограничения по внедрению оригинальных разработок в рамках КНТП.

Новые технологии в крупно- и среднетоннажной химии, как правило, требуют 3–5 лет для достижения высокого уровня готовности, а с промышленной реализацией – до 8–10 лет, что пока находится за пределами временных границ КНТП как инструмента развития инноваций. Следует также учитывать, что создание новых технологий предусматривает несколько промежуточных стадий. Только работы по достижению уровня готовности технологий 6–7, отвечающие созданию и оптимизации технологии на опытно-промышленной установке (*pilot plant*), могут потребовать до 1 млрд руб. инвестиций даже для создания среднетоннажной продукции [54]. Кроме того, КНТП не предполагает реализацию работ в рамках государственно-частного партнёрства на доконкурентной, а тем более на поисковой стадии, где риски недостижения результата довольно высоки; привлечение же государственного финансирования возлагает на компании обязательства по промышленной реализации разрабатываемых технологий и производству продукции. Однако, как свидетельствует мировой опыт, поисковые и прикладные исследования в химии и науках о материалах позволяют перейти на высокие уровни готовности технологий (не говоря уже о выпуске продукции) лишь в 10–15% случаев [54]. Даже при выводе продукта на рынок не менее трети уже реализованных проектов могут оказаться нерентабельными [55]. Закрепление за компаниями-производителями продукции обязательства инвестировать в технологии, которые вряд ли будут реализованы на рынке или внутри компании больше 1–2 раз, резко сужает возможности по внедрению новых российских технологий в производство. Использование технологии только внутри компании, как правило, для малотоннажного производства и производства продукции тонкого органического синтеза обеспечит её окупаемость лишь в исключительных случаях. В результате такие проекты рассматриваются как высокорисковые. Собственно, окупаемость разработок возможна при их реализации на нескольких предприятиях или установках. А для этого требуются технологические компании, получающие доход за счёт продажи технологий, а не производства продукции [55].

* * *

Преодолеть рассмотренные нами проблемы развития химии и внедрение её достижений в химическую промышленность может лишь комплексный подход, который позволит не просто восстановить советский химический комплекс, а обеспечить его развитие за счёт разработки и создания принципиально новых научных основ

промышленных технологических процессов. Последние должны быть высокоэффективными, энерго- и ресурсосберегающими и удовлетворять современным жёстким требованиям “зелёной” химии по минимизации воздействия на окружающую среду. Восстановление химического комплекса страны до уровня, который в полной мере обеспечил бы её потребности и создал условия для достижения целей СНТР РФ, диктует необходимость принятия новых технических решений и, по существу, разработки и полнообъёмной реализации комплексной программы совместного развития химической науки и промышленности, а также соответствующих смежных отраслей. Без выполнения этих задач невозможно обеспечить национальную безопасность, эффективное и устойчивое развитие Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449>
2. *Reinhardt C.* Chemical Sciences in the 20th century: Bridging Boundaries. Wiley-VCH, 2001.
3. *Белецкая И.П., Анаников В.П.* Почему развитая страна не может существовать без органической химии // Журнал органической химии. 2015. № 2. С. 159–161.
4. *Гришин Д.Ф.* Органический и нефтехимический синтез как составная часть национальной технологической инициативы // Журнал органической химии. 2015. № 10. С. 1543–1544.
5. *Пармон В.Н., Адонин Н.Ю.* Малотоннажная химия – перспективное направление развития органической химии в России // Журнал органической химии. 2015. № 5. С. 767–768.
6. *Нифантьев Н.Э.* О национальных научно-технических приоритетах и импортозамещении // Журнал органической химии. 2016. № 5. С. 774–776.
7. *Gordeev E.G., Ananikov V.P.* Widely accessible 3D printing technologies in chemistry, biochemistry and pharmaceuticals: applications, materials and prospects // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 89. № 12. P. 1507–1561.
8. *Gupta V., Nesterenko P., Paul B.* 3D printing in chemical sciences: applications across chemistry. RSC, 2021.
9. *Филиппов С.П., Ярославцев А.Б.* Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. 2021. № 6. С. 627–643.
10. *Schlögl R.* Chemistry for the Energy Transformation. https://www.mpg.de/8231135/energy_conversion_basetext.pdf
11. *America's Energy Future: Technology and Transformation.* Washington, DC: The National Academies Press, 2009.
12. *Agricultural Chemistry: New Strategies and Environmental Perspectives to Feed a Growing Global Population.* Washington, DC: ACS, 2015.

13. *Nanda S.P., Borkataki S., Teye R.R., Reddy M.D.* Chemistry in Agriculture – A Review // *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*. 2020. V. 8. № 3. P. 241–247.
14. *Barnicki S.D., Bommaraju T.V., Kent J.A.* Handbook of industrial chemistry and biotechnology. Springer, 2017.
15. Science & Technology Trends 2020–2040. Exploring the S&T Edge NATO Science & Technology Organization. NATO Science & Technology Organization, 2020. https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf
16. *Thomas G.* Fundamentals of Medicinal Chemistry. Wiley-Blackwell, 2003.
17. *Lehmhus D., Busse M., Kayvantash K., Hermann A.* Structural materials and processes in transportation. Wiley-VCH-Verlag, 2013.
18. Рынок удобрений в России: исследование и прогноз до 2025 г. ROIF Expert, 2020.
19. *Randive K., Raut T., Jawadand S.* An overview of the global fertilizer trends and India's position in 2020 // *Mineral Economics*. 2021. V. 34. № 3. P. 371–384.
20. Российский экспорт полимеров в 2020 г. вырос на 74%. <https://sdelanounas.ru/blogs/139935/>
21. Экспортные достижения химической промышленности России в 2020 г. <https://sdelanounas.ru/blogs/139991/>
22. *Скопинцева Е.* Доля химпрома в ВВП остаётся низкой, несмотря на триллионы инвестиций // *Экономика и жизнь*. 2019. № 40. <https://www.eg-online.ru/article/408616/>
23. Экспорт минеральных удобрений, 2020 год: вывоз смешанных и калийных вырос. <https://seanews.ru/2021/02/16/ru-jeksport-mineralnyh-udobrenij-2020-god-vyvoz-smeshannyh-i-kalijnyh-vyros/>
24. The Global Chemical Industry: Catalyzing Growth and Addressing Our World's Sustainability Challenges. Report for ICCA. Oxford Economics Ltd, 2019.
25. CEFIC, Facts & Figures, 2019. <https://cefic.org>
26. CEFIC, Facts & Figures, 2020. <https://cefic.org>
27. Guide to the Business of Chemistry. 2019 American Chemistry Council (ACC). <https://www.americanchemistry.com/chemistry-in-america/data-industry-statistics/resources/2019-guide-to-the-business-of-chemistry>
28. The chemical industry in Germany. Industry overview. 2021. <https://www.gtai.de/gtai-en/invest/service/publications/the-chemical-industry-in-germany-64526>
29. *Aga R.* The strength of the chemical industry: managing multidisciplinary business and R&D // *Ingenieria Quimica*. 2012. № 505. P. 20–29.
30. *Supriyo D., Ignasi B.I.* Innovation policy of European chemical companies with special focus on large companies // *Revista Internacional de Organizaciones*. 2015. V. 14. P. 123–157.
31. Россия в цифрах. 2020. М.: Росстат, 2020.
32. 2021 ranking of the global leading chemical companies based on revenue. www.statista.com/statistics/272704/top-10-chemical-companies-worldwide-based-on-revenue/
33. Стратегия развития химической и нефтехимической промышленности на период до 2030 года. Утверждена приказом Минпромторга и Минэнерго РФ от 14 января 2016 г. № 33/11. https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Razvitie_him_kompleksa.pdf
34. *Dyachenko E.* Russia in the world publication activity ranking: Natural Sciences. М.: ISSEK, 2018. <https://issek.hse.ru/en/news/221554522.html>
35. *Гавриленко В.А.* Пластпереработка: состояние и перспективы // *Neftegaz.ru*. 2020. № 3. <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/536762-plastpererabotka-sostoyanie-i-perspektivy/>
36. https://wits.worldbank.org/CountryProfile/en/Country/WLD/Year/LTST/TradeFlow/Import/Partner/by-country/Product/39-40_PlastiRub. <https://data.worldbank.org/indicator/>
37. *Workman D.* Plastic Item Exports by Country. <https://www.worldstopexports.com/plastic-item-exports-country/>
38. *Barrowclough D.* Global trade in plastics: insights from the first life-cycle trade database // UNCTAD/SER.RP. 2020. December 12. UNCTAD Research Paper № 53. UNCTAD/SER.RP/2020/12 https://unctad.org/system/files/official-document/ser-rp-2020d12_en.pdf
39. *Брагинский О.Б.* Современное состояние и тенденции развития мировой и отечественной нефтегазохимической промышленности. М.: ИПП РАН, 2014.
40. *Брагинский О.Б.* Новые тенденции развития нефтегазохимической промышленности мира // *Нефтегазохимия*. 2020. № 3–4. С. 5–8.
41. *Гольшиева Е.А., Жданев О.В., Корнев В.В. и др.* Нефтехимическая отрасль России: анализ текущего состояния и перспектив развития // *Журнал прикладной химии*. 2020. № 10. С. 1499–1507.
42. *Бесхлорная химия силиконов – дорога в будущее / Под ред. А.М. Музафарова.* М.: Перо, 2018.
43. Перечень поручений по итогам совещания по стратегическому развитию нефтегазохимической отрасли. Утверждён Президентом РФ 16 января 2021 г. № Пр-44. <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/64901>
44. План мероприятий (“дорожная карта”) по развитию производства малотоннажной химии в Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждён распоряжением Правительства РФ от 15 декабря 2017 г. № 2834-р. <http://static.government.ru/media/files/BXMyJhAE-NhaR9pbRmu4rQxY2ZAz7P7GF.pdf>
45. План мероприятий по импортозамещению в отрасли химической промышленности Российской Федерации. Утверждён приказом Минпромторга России от 29 мая 2018 г. № 2025. <https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!43393>
46. *Ментюкова С.* Производство антисептиков выросло в восемь раз // *Российская газета*. 2021. 1 марта. <https://rg.ru/2021/03/01/proizvodstvo-antiseptikov-vyroslo-v-vosem-raz.html>
47. *Pollak P.* Fine chemicals: the industry and the business. John Wiley & Sons Limited, 2011.

48. *Ananikov V.P., Eremin D.B., Yakukhnov S.A. et al.* Organic and hybrid systems: from science to practice // *Mendeleev Commun.* 2017. V. 27. P. 425–438.
49. Указ Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 г. № 400 “О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации”.
<http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046>
50. Эксперт: лишь 6% субстанций для стратегически важных лекарств производятся в России. ТАСС. 2021. 15 февраля.
<https://tass.ru/ekonomika/10699433>
51. Перечень стратегически значимых лекарственных средств, производство которых должно быть обеспечено на территории Российской Федерации. Утверждён распоряжением Правительства Российской Федерации 6 июля 2010 г. № 1141-р (в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 1 августа 2020 г. № 2015-р).
<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202008040029>
52. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 5 августа 2021 г. № 2162-р.
<http://government.ru/docs/42971/>
53. *Buchner G.A., Stepputat K.J., Zimmermann A.W., Schomäcker R.* Specifying technology readiness levels for the chemical industry // *Industrial and Engineering Chemistry Research.* 2019. V. 58. № 17. P. 6957–6969.
54. *Federsel H.-J.* Chemical process research and development in the 21st Century: Challenges, strategies and solutions from a pharmaceutical industry perspective // *Accounts of Chemical Research.* 2009. V. 42. № 5. P. 671–680.
55. *Cooper R.G., Kleinschmidt E.J.* New-product success in the chemical industry // *Industrial Marketing Management.* 1993. V. 22. № 2. P. 85–99.