ISSN 2409-5516

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

ГРНТИ 44.09.29

ОБЩЕСТВЕННО-ДЕЛОВОЙ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№6 (220) ИЮНЬ 2026



Тема номера

МНОГООБРАЗИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ В ПЕРИОД ТУРБУЛЕНТНОСТИ РЫНКОВ

РОССЕТИ

МАКСИМАЛЬНО ОБ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Подписывайтесь на канал компании «Россети» в МАКС

ЗАРУБЕЖНЕФТЬ

«ЗАРУБЕЖНЕФТЬ» — государственная российская нефтегазовая компания стратегического значения с богатой историей и уникальным опытом внешнеэкономической деятельности.

«ЗАРУБЕЖНЕФТЬ» специализируется на разработке нефтегазовых месторождений в России и за рубежом, обеспечивая эффективную и комплексную добычу углеводородных ресурсов.

УЖЕ БОЛЕЕ 40 ЛЕТ

«Зарубежнефть» успешно осваивает континентальный шельф юга Вьетнама в рамках совместного предприятия «Вьетсовпетро».

В ЧИСЛЕ ДРУГИХ ПРОЕКТОВ:

— разработка месторождений в Ненецком автономном округе (СК «РУСВЬЕТПЕТРО» и «ЗАРУБЕЖНЕФТЬ-добыча Харьяга»);

— применение передовых технологий добычи высоковязких сортов нефти на Кубе;

— повышение нефтеотдачи на зрелых месторождениях Узбекистана;

— реализация проектов в Египте и Индонезии.

Помимо этого, компания работает в сегменте «Нефтепереработка и сбыт» на территории Республики Сербской (Босния и Герцеговина), имеет в структуре собственные проектные институты подземного и наземного обустройства нефтегазовых месторождений, а также сервисные компании.

НАША КОМАНДА

В компании работают более 12 000 сотрудников по всему миру. **Каждый сотрудник «Зарубежнефти» — ОСНОВА компании.**

Наш сайт



Мы в Telegram

ЗАРЯЖАЕМ МИР
ЭНЕРГИЕЙ



ЦЭУ

ЦЕНТР ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛУГ

ТРАНСНЕФТЬ
WWW.TRANSNEFT.RU

более
67 000 км
совокупная длина всех трубопроводов компании



ПАО «ТРАНСНЕФТЬ» —

крупнейшая в мире трубопроводная компания в области транспортировки нефти и нефтепродуктов

123112, г. Москва,
Пресненская набережная, д. 4, стр. 2,
башня «Эволюция»
+7 (495) 950-81-78

КАВКАЗСКИЙ ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ФОРУМ

РОСКОНГРЕСС
Пространство доверия

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Министерство экономического развития Российской Федерации

ПРАВИТЕЛЬСТВО СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

КАВКАЗСКИЙ ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ФОРУМ

КИФ – 2026 В ЦИФРАХ:

4 700 участников

30 стран

>100 мероприятий

460 спикеров

53 информационных партнера

>70 соглашений

FORUMKAVKAZ.ORG

6–9 октября 2026

XV Петербургский международный

ГАЗОВЫЙ ФОРУМ



ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА

Минпромторг России

Министерство энергетики Российской Федерации

Правительство Санкт-Петербурга

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

Газпром

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР

ТМК

ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

Алмаз - Антей

РЕГИОН-ПАРТНЕР

Пермский край

ПАРТНЕРЫ

Газпромбанк

Комита

Газпром нефть

ГМС Группа

ОМК

Салаватский Катализаторный Завод

Газпром газонефтепродукт Холдинг

ОДК

Фракджет-Волга

ОФИЦИАЛЬНЫЙ СТРАХОВОЙ ПАРТНЕР

СОГАЗ

ОРГАНИЗАТОР

EXPOFORUM

18+

GAS-FORUM.RU

САМАЯ АКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПМГФ

Содержание

Слово редакторов

9 **В. Бушуев, А. Горшкова.** Энергетический букет

Нефть

10 **А. Мастепанов.** Эволюция понятия и новые аспекты проблем и вызовов энергетической безопасности

Энергопереход

44 **А. Череповицын, Н. Иллерицкий.** Критические металлы и минералы: критический взгляд на терминологию, стратегии и императивы

68 **Ю. Ляшик, В. Медведев**. Транспортировка водорода в глобальных цепочках поставок: роль жидкого водорода

Химия

118 **А. Михайлов, Д. Голдобин, И. Скрыпников, А. Ишков.** Состояние и перспективы развития газохимического сектора экономики

Электроэнергетика

146 **К. Овчинников, И. Багрова, Т. Бугаева.** Организация технологически нейтрального рынка мощности



















УЧРЕДИТЕЛЬ

Министерство энергетики РФ, 107996, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, д. 42

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «ГУ Институт энергетической стратегии»

НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В. В. Бушуев – д. т. н., проф., г. н. с. ОИВТ РАН
Е. О. Адамов – д. т. н., науч. рук. АО «НИКИЭТ»
Л. А. Адамцевич – к. т. н., доцент, заведующий лабораторией НИУ МГСУ
В. М. Батенин – член-корр. РАН, д. т. н., проф.
П. П. Безруких – д. т. н., проф. НИУ МЭИ
В. И. Богоявленский – член-корр. РАН, д. т. н., проф., г. н. с. ИПНГ РАН
А. И. Громов – к. г. н., главный директор по энергетическому направлению Фонда «ИЭФ»
А. Н. Дмитриевский – акад. РАН, д. г.- м. н., научный руководитель ИПНГ РАН
С. А. Добролюбов – акад. РАН, д. г. н., проф., декан географического факультета МГУ
О. Жданеев, д. т. н, глава ЦКТР ТЭК при Минэнерго России
И. А. Сайпуллаев – к. э. н., декан, НИСИ (Узбекистан)
Д. Сяоюй – к. т. н., ген. дир. Харбинской ассоциации НТС (Китай)
М. Ч. Залиханов – акад. РАН, д. г. н., проф., зав. ЦГиЧС КБГУ
В. М. Капустин – д. т. н., проф., зав. кафедрой РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина
В. А. Крюков – акад. РАН, д. э. н., директор ИЭОПП СО РАН
В. Г. Мартынов – к. г.- м. н., д. э. н., проф., ректор РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина
А. М. Мастепанов – акад. РАЕН, д. э. н., г. н. с. АЦЭПБ ИПНГ РАН
А. С. Миллерман, д. э. н., к. т. н., вице-президент ПБ, зав. каф. «Финансы и страхование» РАНХиГС при Президенте РФ
П. Праджапати – д. т. н., Энергетический университет Пандита Диндайала (Индия)
В. И. Рачков – член-корр. РАН, д. т. н., проф.
П. Ю. Сорокин – первый зам. министра энергетики РФ
Д. А. Соловьев – к.ф.-м. н., науч. сотр. Института океанологии РАН
В. А. Стенников – акад. РАН, д. т. н., проф., директор ИСЭ им. Мелентьева СО РАН
Е. А. Телегина – член-корр. РАН, д. э. н., проф., декан факультета РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина
С. П. Филиппов – акад. РАН, д. т. н., директор ИНЭИ РАН













Contents

Editor's column

9 **V. Bushuev, A. Gorshkova.** Energy Bouquet

Oil

10 **A. Mastepanov.** Evolution of the Concept and New Aspects of Energy Security Problems and Challenges

Energy Transition

44 **A. Cherepovitsyn, N. Illeritskiy.** Critical Metals and Minerals: a Critical Look into Terminology, Strategies, and Imperatives

68 **Yu. Lyashik, V. Medvedev.** Hydrogen Transportation in Global Supply Chains: The Role of Liquid Hydrogen

Chemistry

118 **A. Mikhailov, D. Goldobin, I. Skrypnikov, A. Ishkov.** Current State and Development Prospects of the Gas-Chemical Sector of the Economy

Electricity

146 **K. Ovchinnikov, I. Bagrova, T. Bugaeva.** Organization of a Technology Neutral Capacity Market













Главный редактор
Анна Горшкова

Научный редактор
Виталий Бушуев

Зам. главного редактора
по продвижению
Ольга Родионова

Корректор
Мария Алексеева

Фотограф
Иван Федоренко

Дизайн и верстка
Михаил Дышлюк

Адрес редакции:
125009, г. Москва,
ул. Тверская, д. 23, с. 1.
+7 (910) 463-53-57
anna.gorshik@yandex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77 – 75080 от 07.03.2019

Журнал «Энергетическая политика» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК
При перепечатке ссылка на издание обязательна

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе в электронных СМИ, возможны только с письменного разрешения редакции

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов

Редакция не имеет возможности вступать в переписку, рецензировать и возвращать не заказанные ею рукописи и иллюстрации

Тираж: 1000 экземпляров

Периодичность выхода: 12 раз в год

Цена свободная

Отпечатано в ООО «КОНСТАНТА», 308519, Белгородская область, Белгородский р-н, п. Северный, ул. Березовая, 1/12
E-mail: info@konstanta-print.ru

Подписано в печать: 18.06.2026

16+


«ГАЗПРОМ НЕФТЬ»
ПРЕДСТАВЛЯЕТ
РОДНОЙ
СЕВЕР
АРТ-ПРОЕКТ
НА ПМЭФ-2026
PREMIER
RUTUBE
0+
Реклама



Виталий БУШУЕВ
Научный редактор журнала
«Энергетическая политика», акад. РАЕН и РИЭ, д. т. н.



Анна ГОРШКОВА
Главный редактор журнала
«Энергетическая политика»

Энергетический букет

Война в Ормузском проливе снова пробудила интерес рынка к альтернативным видам топлива, новым источникам энергии и электротранспорту. Позабытый было водород снова заиграл всеми красками своего происхождения: от серого до бирюзового. Стало понятно, что его высокая себестоимость компенсируется возможностью локализации производства в любом регионе при наличии большого объема возобновляемой энергетики.

Несовершенство ВИЭ-генерации теперь активно восполняется установкой систем накопления энергии. При этом сами накопители становятся отдельным участником рынка двойного назначения, играя роль как потребителя, так и производителя энергии. Спрос на системы накопления энергии и аккумуляторы подталкивает к развитию добычи и переработки лития и других цветных и редкоземельных металлов, строительству гигафабрик и обостряет гонку за совершенствованием аккумуляторных систем. Только за последний год сразу несколько автомобильных компаний заявили о запуске в производство новых аккумуляторов для электрокаров с увеличенным запасом хода.

Одновременно большую популярность набирает газо- и углехимия, позволяющая при производстве пластиков отходить от привычного нефтяного сырья. В результате энергетический рынок становится более сложным, многообразным и локальным, без единого доминирующего энергетического центра. Это и нашло отражение в подборке материалов для очередного номера журнала «Энергетическая политика».

УДК 620.9 DOI 10.46920/2409-5516_2026_6221_10 EDN KNECST

Эволюция понятия и новые аспекты проблем и вызовов энергетической безопасности

Evolution of the Concept and New Aspects of Energy Security Problems and Challenges

Алексей МАСТЕПАНОВ
Главный научный сотрудник ИПНГ РАН, профессор РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, д. э. н., академик РАЕН
E-mail: amastepanov@mail.ru

Alexey MASTEPANOV
Chief Researcher of the Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (OGRI RAS), Professor of the National University of Oil and Gas ("Gubkin University"), Doctor of Economic Sciences, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences
E-mail: amastepanov@mail.ru



Буровая платформа в море
Источник: Shutterstock.com

Аннотация. В статье рассмотрена эволюция понятия «энергетическая безопасность» и мер по ее обеспечению в период с 1970-х годов по наши дни. Показано, что по мере того, как меняется мир, меняются и проблемы, связанные с энергетической безопасностью. Особое внимание уделено анализу развития этих вопросов на современном этапе, когда энергетическая безопасность стала одним из базовых понятий современного мира, одной из самых актуальных составляющих глобальной безопасности, рассматриваемой в контексте устойчивого развития экономики и человечества в целом и энергетического перехода. Рассмотрены основные тенденции, которые меняют глобальную энергетическую безопасность, и реагирование на них в концептуальном и практическом плане. Подробно рассмотрены и раскрыты особенности таких новых факторов энергетической безопасности, как обеспечение надежных и устойчивых цепочек поставок критически важных минералов, необходимых для развития экологически чистых энерготехнологий, собственно энергетический переход и надежное обеспечение электроэнергией как внутренний фактор энергетической безопасности, роль которого стремительно растет с развитием ИИ и дата-центров. В заключение статьи дана краткая информация о новейших факторах энергобезопасности, а также о роли глобального сотрудничества в реализации ее задач и задач энергоперехода.
Ключевые слова: энергетическая безопасность, национальная безопасность, энергоресурсы, энергоэффективность, энергопереход, ВИЭ, МЭА, искусственный интеллект, дата-центры, энергетическое сотрудничество

Abstract. The article examines the evolution of the concept of “energy security” and the measures taken to ensure it, from the 1970’s to the present day. It shows that as the world changes, so do the challenges related to energy security. The article focuses on analyzing the development of these issues in the current era, when energy security has become a fundamental concept in the modern world and a crucial aspect of global security, particularly in the context of sustainable economic development, human well-being, and the energy transition. It explores the main trends that are reshaping global energy security and the conceptual and practical responses to them. The article delves into the new factors of energy security, such as ensuring reliable and sustainable supply chains for critical minerals necessary for the development of clean energy technologies, the energy transition itself, and the importance of reliable electricity supply as an internal factor of energy security, which is rapidly gaining significance with the rise of AI and data centers. The article concludes with a brief overview of the latest energy security factors and the role of global cooperation in addressing these challenges and the energy transition.
Keywords: energy security, national energy security, energy resources, energy efficiency, energy transition, renewable energy, International Energy Agency, artificial intelligence, data centers, and energy cooperation

Введение

Одной из основных особенностей современного этапа развития человеческого общества является то, что привычный, сложившийся в течение многих десятилетий миропорядок рушится. Перестают действовать договоры, не работают прежние правила, деградируют международные институты.

В формируемом в настоящее время спецпроекте газеты «Коммерсантъ» «Контуры будущего» справедливо отмечается, что миропорядка, сложившегося после Второй мировой войны, больше нет. Об этом говорят уже не эксперты и отставные политики, которые могут позволить себе некоторое преувеличение, а действующие главы ведущих государств. Мир вступил в эпоху больших конфликтов. Каким будет новый миропорядок, по каким правилам мир станет жить, как и где пролягут границы нового передела — сегодня остается только гадать [1]. Далее приводятся соответствующие высказывания глав некоторых ведущих стран мира [1].

Президент РФ В. В. Путин: «На наших глазах формируется совершенно новое мировое устройство, непохожее на то, что мы знаем из прошлого: например, Вестфальскую или Ялтинскую систему. Поднимаются новые державы. Народы четче и яснее осознают свои интересы, свою самоценность, самобытность и идентичность, все тверже настаивают на достижении целей развития и справедливости». *7 ноября 2024 года на заседании Международного дискуссионного клуба «Валдай».*

Президент США Дональд Трамп: «Откровенно говоря, многие части нашего мира разрушаются на наших глазах, и лидеры даже не понимают, что происходит, а те, кто понимает, ничего с этим не делают». *21 января 2026 года на Всемирном экономическом форуме в Давосе.*

Премьер-министр Великобритании Кир Стармер: «Мир, каким мы его знали, исчез…. Мы готовы к тому, что будет дальше». *6 апреля 2025 года в статье для Sunday Telegraph.*

Канцлер Германии Фридрих Мерц: «Мы все являемся свидетелями эпохального изменения глобального порядка. Международного порядка, основанного на правилах, каким мы его знали, больше не существует. На его месте стремительно формируется новый миропорядок, порядок великих держав». *20 февраля 2026 года на партийном съезде Христианско-демократического союза.*

Председатель КНР Си Цзиньпин: «В современном мире царит хаос, и международный порядок рушится». *14 апреля 2026 года на встрече с премьер-министром Испании Педро Санчесом.*

Эти изменения касаются всех аспектов жизни каждого государства, в том числе его энергетической безопасности.

В период потрясений, геополитической напряженности и растущих торговых барьеров в современном быстро меняющемся

Нефтяные танкеры

Источник: Shutterstock.com





Конфликт на Ближнем Востоке
Источник: Sutterstock.com

мире происходит дальнейшая эволюция понятия и концепции энергетической безопасности. Наш анализ этого понятия, проводимый в течение 30 лет, дает основание утверждать, что энергетическая безопасность стала в последние десятилетия одним из базовых понятий современного мира, одной из самых актуальных составляющих глобальной безопасности, рассматриваемой в контексте устойчивого развития экономики и человечества в целом. Кроме того, анализ событий в мировой экономике и энергетике показывает, что мир вступает в новую эпоху энергетической безопасности, поскольку старые уверенности исчезают, а новые реалии появляются. Соответственно, обеспечение энергобезопасности стало относиться к числу важнейших глобальных процессов современности, стало важнейшей составной частью не только энергетической политики ведущих государств, но и одним из базовых факторов их национальной безопасности в целом.

Предыдущие эволюции понятия «энергетическая безопасность» и мер по ее обеспечению

В самом общем виде проблема энергетической безопасности предопределена неравномерным размещением по территории Земли природных топливно-энергетических ресурсов и территориальным несовпадением основных энергопотребляющих и энергопроизводящих стран и регионов в конкретных социально-экономических условиях развития человечества. Именно отсюда вытекает дефицитность той или иной страны (территории) по топливу и энергии и ее зависимость от стран или регионов, экспортирующих энергоресурсы [2].

Впервые проблема энергетической безопасности (энергетического благополучия) со всей остротой была осознана в про-





Энергетический коллапс в ЮАР Источник: businesstech.co.za

мышленно развитых странах с рыночной экономикой в 1973–1974 годах, когда в результате ближневосточного кризиса начала реализовываться тенденция к резкому сокращению экспорта нефти из этого региона в промышленно развитые страны при одновременном быстром росте цен на нефть. В условиях существенной, а для некоторых стран критической зависимости энерго- и особенно нефтеснабжения от импорта сырья это привело к крупнейшему энергетическому кризису[1].

В 1970-е годы сформировалось классическое определение энергетической безопасности, данное Мировым энергетическим советом (МИРЭС): энергетическая безопасность — это уверенность, что энергия будет иметься в распоряжении в том количестве и того качества, которое требуется при данных экономических условиях [8].

В 80-е годы XX века основной центр исследований в области энергетической безопасности сместился от МИРЭС к Международному энергетическому агентству (МЭА), созданному как раз в ответ на кризис 1970-х. Уже в 1985 году МЭА издает работу по технологической политике в области энергетики [9], в которой энергетическая безопасность определяется как «достаточные объемы поставки энергии по разумным ценам».

Позднее этот тезис был развит Европейской комиссией [10], которая, однако, основной упор в обеспечении энергетической безопасности видела именно в создании стратегических резервов нефти. Но и определение МЭА, и определение Европейской комиссии было достаточно сложно применить на практике. Что такое «достаточная» поставка? Что является «существенными потребностями»? Подобные вопросы возникали постоянно[2].

Проблема энергетической безопасности состоит не в отсутствии энергоресурсов, а в обеспечении доступа к ним. Из этого вытекает обострение мировой конкуренции за права и условия этого доступа

Одновременно среди западных специалистов происходит активная дискуссия и по вопросу «разумных» цен. Критерий «разумная цена» или «разумная стоимость» требует подробных разъяснений. Примечательно, что в документе «Наши совместные цели», одобренном министрами стран —

[1] Эти вопросы подробно рассмотрены автором статьи в целом ряде работ [3–7 и др.], а также в [2].
[2] См., например, [11].



Энергетический коллапс на Кубе Источник: Norlys Perez Reuters

членов МЭА на конференции 4 июня 1993 года в Париже, разумная стоимость определялась как цена свободных операций рыночных сил, которые произвели бы «достаточные поставки», которые были бы доступны по этой цене [12].

На рубеже XX и XXI века во взглядах ведущих зарубежных специалистов и исследовательских центров на проблему энергетической безопасности произошли серьезные изменения, обусловленные тем, что снизилась политизированность проблемы, связанная с глобальным противостоянием двух систем (капиталистической и социалистической) и рядом других, менее значимых факторов [13, 14 и др.].



Топливный кризис в Европе и США в 1973 году
Источник: dontimes.news

Как уже неоднократно отмечалось в работах автора, в условиях развертывания процессов глобализации и либерализации мировой экономики и энергетики на рубеже XX и XXI веков произошла определенная трансформация и понятия «энергетическая безопасность» [2, 15]. Понимаемое, прежде всего, как надежное и бесперебойное снабжение потребителей топливом и энергией в необходимых объемах и требуемого качества по экономически приемлемым ценам, оно стало приобретать новое — глобальное — измерение, а сама энергетическая безопасность стала одной из самых актуальных составляющих глобальной безопасности. Одновременно энергетическая безопасность стала и важнейшей составной частью всей энергетической политики и национальной безопасности ведущих государств, и одним из основных системных вызовов, с которыми столкнулась современная энергетика. Тем самым энергетическая безопасность стала выступать одновременно и как техническая, и как экономическая, политическая и философская категория. Кроме того, в изменившихся условиях понятие «энергетическая безопасность» существенно расширилось, поскольку энергетические аспекты пронизывают практически все стороны человеческой деятельности.

Одновременно в условиях разрядки международных отношений стало складываться понимание того, что энергетическая безопасность — глобальная проблема, что

решить ее невозможно не то что на односторонней, но даже на двусторонней основе, что система энергетической безопасности призвана обеспечить надежность поставок энергоресурсов в общих интересах мировой экономики, в интересах всех стран: и потребителей, и производителей энергоресурсов. Отсюда понимание того, что эта система должна быть прозрачной, базироваться на международном праве и ответственной политике в отношении спроса и предложения [2].

Так, в документе ЕС «Зеленая книга. Европейская стратегия устойчивой, конкурентоспособной и безопасной энергетики», одобренном Еврокомиссией в ноябре 2000 года, отмечается, что в новом энергетическом ландшафте XXI века экономические регионы мира зависят друг от друга в плане обеспечения энергетической безопасности и стабильных экономических условий, а также в плане обеспечения действенных мер по противодействию изменению климата [16]. Позднее, в 2006 году, в преддверии петербургского саммита «Большой восьмерки» председатель Европейской комиссии Жозе Мануэль Баррозу сделал следующий, весьма важный вывод: «Энергетическая безопасность — это всемирная проблема, которая требует глобального решения» [17].

Россия стала рассматриваться как основная угроза энергобезопасности Запада. Меры по её обеспечению предполагают отказ от российских энергоресурсов и вытеснения их с мировых энергетических рынков

В эти же годы стало расти понимание того, что глобальной угрозой энергетической безопасности является низкая энергоэффективность экономик развивающихся стран, а также чрезмерное потребление энергоемких материальных благ в экономически развитых странах, ведущие к необоснованному росту спроса на энергоресурсы. Что процесс энергообеспечения не должен приводить к негативным последствиям для окружающей природной среды, к ее разруше-

Порт Приморск





ВЭС в Ставрополье
Источник: gorlovkv depositphotos.com

нию. Соответственно, проблеме глобальной энергетической безопасности все больше внимания стало уделяться в контексте устойчивого развития экономики и человечества в целом.

Однако в эти же годы стала набирать обороты и опасная тенденция политизации энергетических рынков с целью их использования как инструмента геополитики.

Под воздействием глобализации и изменений социально-политической ситуации в мире во взглядах экспертов МЭА происходит своеобразная эволюция самого понятия «энергетическая безопасность». По мнению МЭА, проблема энергетической безопасности состоит не в отсутствии энергоресурсов, а в обеспечении доступа к этим ресурсам. Соответственно, из этого вытекает обострение мировой конкуренции за права и условия этого доступа [2].

При этом с позиций развитых стран — импортеров энергоресурсов место России в системе глобальной энергетической безопасности должно было определяться ее возможностью обеспечивать им рост поставок энергоносителей на приемлемых для этих стран условиях и по выгодным для них ценам [15].

Но уже к середине первого десятилетия 2000-х годов в позиции ЕС по вопросам

Источник: a_medvedkov, depositphotos.com



обеспечения энергетической безопасности четко обозначились двойственность и непоследовательность подхода к России[3].

С одной стороны, Европейский союз критиковал РФ за ее неспособность полностью удовлетворить растущий спрос на топливо и энергию в Европе, но с другой — все больше и больше стремился ограничить доступ российских энергоносителей на европейский рынок. Более того, в последнее десятилетие, исходя из своего понимания возможностей обеспечения энергетической безопасности, ЕС направил усилия на поиск альтернативных внешних источников поставок энергоресурсов и диверсификацию их маршрутов.

Однако уже к концу первого десятилетия XXI века развитие и распространение технологий эффективного использования нетрадиционных ресурсов углеводородного сырья и развитие научно-технического прогресса в целом привели к тому, что стал нарастать глобальный энергетический профицит[4].

В частности, новые технологии и технические решения, обеспечившие эффективную добычу нефти и газа из нетрадиционных источников, а также появление новых технологий, которые дадут возможность использовать газ газогидратных залежей, угольный метан и газ других источников, не только увеличили ресурсы углеводородных энергоносителей, но и стали кардинально менять геополитическую ситуацию в мире. Соответственно, стало меняться и отношение развитых стран к проблеме энергетической безопасности.

Добыча сланцевой нефти в США

Источник: Shutterstock.com



[3] Эта двойственность и непоследовательность подхода к России зародилась еще в конце 90-х годов XX века. Однако своего «развития» она достигла уже на следующем этапе, когда обвинения в «ресурсном национализме», «энергетическом шантаже», «использовании энергоресурсов как оружия», «политических манипуляциях с экспортом энергоресурсов», «угрозе использования поставок энергоресурсов в качестве инструмента политического давления» и т. д. и т. п. достигли апогея. Подробнее см. [4].

[4] Основными движущими силами этого процесса выступили сланцевая революция в США и повсеместное развитие в экономически развитых странах возобновляемых источников энергии.



Горючие сланцы
Источник: Shutterstock.com

Нарастающий энергопрофицит привел к кардинальным изменениям геополитической ситуации в мире и переходу от политики международного энергетического сотрудничества к политике энергетической самодостаточности основных стран-потребителей. Тем самым проблема глобальной энергетической безопасности, стоявшая в 2006 году на первом месте в повестке дня саммита G8 в Санкт-Петербурге, вначале отошла на второй план, а в последнее время полностью выпала из сферы соответствующих дискуссий [18].

Во втором десятилетии XXI века изменения общей ситуации в мире не только получили дальнейшее развитие, но и значительно ускорились по всем направлениям. Усиливающаяся нестабильность в мире в условиях нарастающей геополитической напряженности и углубления межгосударственных противоречий приводит к изменению структуры мирового порядка, формированию новых архитектуры, правил и принципов мироустройства. Фактически нормой стали торговые войны, развитие практики ввода различных экономических санкций и других инструментов недобросовестной конкуренции. Успехи в развитии мировой ресурсной базы углеводородного сырья и эффективного освоения ВИЭ меняют энергетическую карту мира. Озабоченность негативными изменениями климата нашей планеты породило стремление к экологически чистой энергетике (и экономике в целом), к переходу к более инклюзивной, устойчивой, доступной и безопасной энергетической системе [19]. Соответствующие изменения происходили и в мерах по обеспечению энергетической безопасности.

Эволюция понятия «энергетическая безопасность» и мер по ее обеспечению на современном этапе

По мере того как меняется мир, меняются и проблемы, связанные с энергетической безопасностью. Трансформация и фрагментация мировой экономики, энергетики и международных отношений, происходящие в последние годы, отразились практически на всех аспектах энергетической политики не только крупнейших стран, но и большинства государств мира. В полной мере сказанное относится и к такой важнейшей составляющей энергетической политики, как энергетическая безопасность, ставшая в последние десятилетия одним из базовых понятий современного мира, одной из самых актуальных составляющих глобальной безопасности, рассматриваемой в контексте устойчивого развития экономики и человечества в целом [21].

Нарастающий энергопрофицит привел к кардинальным изменениям геополитической ситуации в мире и переходу от политики международного сотрудничества к политике энергетической самодостаточности

Кроме того, текущее переосмысление энергетической безопасности происходит в условиях энергетического перехода — перехода мировой энергетической системы от доминирующей зависимости от ископаемых видов топлива к более диверсифицированному энергетическому балансу и все более разнообразным и децентрализованным энергетическим системам[5].

[5] Подробнее об энергопереходе будет сказано ниже.

Осознание недостаточности и неполноты существующего понятия «энергетическая безопасность», проблем и мер по ее обеспечению стало приходить к западным специалистам еще накануне ковидной пандемии. Именно в это время в мире развернулись ценовые и торговые войны, вызвавшие резко возросшую волатильность цен на мировых сырьевых и энергетических рынках. Сама же пандемия COVID-19, сопровождаемая экономическим спадом и обвалом цен на нефть и другие энергоносители, выявила сразу несколько узких мест как в понимании, так и в обеспечении энергобезопасности. А украинские события резко обострили и выпятили все эти проблемы, показали необходимость их срочного решения. В целом же последние годы принесли глобальной энергетике множество потрясений: от пандемии и событий на Украине до сбоев в цепочках поставок, экстремальных погодных явлений и кибератак [21].

И все это происходило на фоне быстро меняющегося глобального энергетического ландшафта, бурного развития энергетических технологий, особенно экологически чистых, которые одновременно показали недостаточность сложившегося понимания энергетической безопасности и открыли новые возможности ее обеспечения, изменения моделей спроса и предложения, массовой электрификации и различных геополитических событий.

В последние годы практически во всех направлениях общественной и хозяйственной деятельности человечества резко возросла роль геополитического фактора. Именно он, как уже было отмечено нами [20], стал не только определять предстоящее развитие мировой экономики и энергетики, но и повернул вспять целый ряд уже сформировавшихся тенденций мирового развития, резко изменил основные положения энергетической политики ведущих стран, в том числе представление об энергетической безопасности.

Страны Латинской Америки, Африки и Азии увеличили производство нефти, чтобы смягчить геополитическое давление на рынок. Но эти меры противоречат глобальному движению к экологической устойчивости



Нефтетанкеры в Малаккском проливе

При этом в результате фрагментации всей системы мирохозяйственных отношений и фактической санкционной блокады России дальнейшие изменения в понимании сути и способов обеспечения энергобезопасности в ведущих странах Запада шли на фоне того, что РФ стала рассматриваться как основная угроза этой энергобезопасности. Соответственно, меры по ее обеспечению в первую очередь касались возможности отказа от российских энергоресурсов и вытеснения их с мировых энергетических рынков.

Тем самым вновь резко возрос интерес к проблемам энергетической безопасности в целом, к ее роли в современном обществе и месту в обеспечении национальной безопасности. При этом две основных составляющих энергетической безопасности — бесперебойное снабжение и приемлемые цены — вновь вышли на первый план, о чем, в частности, свидетельствует МЭА. В его основном труде WEO-2022, опубликованном в конце октября 2022 года, агент-



Источник: Shutterstock.com

Принципиально новым аспектом энергетической безопасности является обеспечение надежных цепочек поставок критически важных минералов, необходимых для развития экологически чистых энерготехнологий

ство подтвердило, что энергетическая безопасность — это не только наличие бесперебойного доступа к энергии, но и обеспечение поставок энергии по доступной цене[6].

По мере того как меняется мир, меняются и проблемы, связанные с энергетической безопасностью. Как отмечают специалисты Британского института экономики энергетики (The British Institute of Energy Economics, BIEE), в то время как риски, связанные с доступностью нефти и природного газа, не ослабевают, появляются новые, которые могут значительно затруднить энергетический переход и подорвать устойчивость энергетических систем, если их не решить быстро и эффективно. Это требует новых и усовершенствованных подходов к энергетической безопасности, отвечающих требованиям сегодняшнего дня и предстоящих десятилетий, для обеспечения бесперебойного доступа к недорогой энергии [23].

Сходной точки зрения придерживаются авторы World Energy Trilemma 2024 Report [24]. Понимание того, что составляет энергетическую безопасность, претерпевает глубокие изменения, уверены они. Простые идеи адекватного снабжения уступают место вниманию к устойчивости. Среди вызовов, которые создают экстремальные погодные явления, диверсификация источников энергии и новые угрозы как физической, так и цифровой инфраструктуре, адаптация энергетических систем для противостояния нарушениям и способность к управлению спросом являются ключевыми для энергетической безопасности. Совместные усилия по защите энергетической инфраструктуры от климатических нарушений отражают более широкое понимание того, что устойчивость заключается не только в реагировании на непосредственные угрозы, но и в предвидении и смягчении будущих вызовов, обеспечивая тем самым возможность энергетических систем устойчиво поддерживать нужды общества в эпоху климатической неопределенности.

В этой же работе отмечается, что военные события на Украине, сокращение производства нефти в странах ОПЕК+ и другие глобальные инциденты последних лет жестко проверили стратегии энергетической безопасности по всему миру. В ответ страны Латинской Америки, Африки и Азии увеличили производство нефти, газа и угля, чтобы смягчить геополитическое и рыночное давление. Однако эти меры, хотя и усиливают безопасность поставок в краткосрочной перспективе, противоречат глобальному движению к экологической устойчивости и переходу на более чистые формы энергии и должны уступить место долгосрочным структурным реформам, направленным на повышение безопасности за счет диверсификации

[6] "Energy security is not just about having uninterrupted access to energy, but also about securing energy supplies at an affordable price" [22, с. 184].

источников энергии, особенно через возобновляемые источники [21, 24].

Как уже было отмечено, текущее переосмысление энергетической безопасности происходит в условиях энергетического перехода. Увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическом балансе требует новых уровней взаимодействия и гибкости для решения задач, связанных с изменчивостью ветровой и солнечной энергии. Соответственно, считают западные специалисты, необходимо стратегическое видение перспективы, нужны инвестиции в цифровую инфраструктуру энергосетей с вычислительной мощностью для управления изменениями как в предложении, так и в спросе на электроэнергию.

В целом же по мере изменения энергетического ландшафта меняется и характер энергетической безопасности. В то же время исполнительный директор МЭА Фатих Бироль подчеркнул «три золотых правила» для решения проблемы энергетической безопасности, которые не изменились: диверсификация, предсказуемость и сотрудничество [21].

Китай производит почти 70% мирового объёма редкоземельных элементов и очищает около 90% от общего объёма их добычи, оказывая почти монопольное влияние на их переработку и маркетинг

К основным тенденциям, которые меняют глобальную энергетическую безопасность, западные специалисты относят [25]:

- изменения в спросе, предложении и торговле энергоносителями;
- внедрение экологически чистых и эффективных энергетических решений;
- наличие минералов и металлов, необходимых для технологий чистой



Глава МЭА Фатих Бироль

Источник: profile.ru



Война в Ормузском проливе Источник: theaviationist.com

энергетики — от ветряных турбин и солнечных батарей до электромобилей, аккумуляторов и промышленных накопителей энергии;
- распределение инвестиций в период перехода от ископаемого топлива.

Важным вкладом в понимание особенностей современного этапа развития энергобезопасности стал Саммит по вопросам будущего энергетической безопасности (Summit on the Future of Energy Security), который прошел в Лондоне 24 и 25 апреля 2025 года, его организаторами выступили МЭА и правительство Великобритании. В работе саммита приняли участие представители 60 правительств и более 50 крупных энергетических компаний, представляющих страны Африки, Северной и Южной Америки, Азиатско-Тихоокеанского региона, Европы и Ближнего Востока[7] . В рамках саммита обсуждались различные вызовы энергетической безопасности, с которыми сталкиваются разные страны, в том числе энергетика как движущая сила экономического роста и важность доступа к недорогой энергии, а также справедливый энергетический переход. Участники саммита отметили, что, поскольку энергия во всех ее формах лежит в основе человеческого и экономического развития, обеспечение безопасной, доступной и устойчивой энергетики для всех остается фундаментальным приоритетом на ближайшие годы и никогда не должно восприниматься как должное. В то время как эффективность и диверсификация видов топлива, энергетических технологий и маршрутов поставок остаются ключевыми традиционными стратегиями повышения энергетической безопасности, участники отметили возросшую сложность и взаимосвязанность нынешних и будущих энергетических систем. Они призвали к новым подходам, расширению масштабов и множественных аспектов энергетической безопасности, включая цепочки поставок критически важных минералов и компонентов. Кроме того, участники саммита подчеркнули сохраняющуюся необходимость обеспечения баланса между производством и потреблением ископаемого топлива. Вопреки предыдущим заявлениям МЭА о неприемлемости нефти уже в ближайшее время, участники саммита отметили, что нефть и газ будут по-прежнему востребованы в предстоящие годы, даже несмотря на то, что страны расширяют использование возобновляемых источников энергии, ядерной энергетики и новых и новейших энергетических технологий. Участники высказали

[7] Отметим, что Китай, который в последнее время позиционирует себя как защитника развивающихся стран и климатического лидера на мировой арене, делегата на лондонскую конференцию не направил. Ну а Россию на этот саммит никто и не приглашал.

мысль о том, что традиционные меры безопасности поставок, такие как стратегические запасы нефти и ограничение спроса, должны поддерживаться, укрепляться и адаптироваться к меняющемуся характеру рынков нефти и газа. Ими же была подчеркнута необходимость следить за рынками для обеспечения безопасности и доступности этих поставок, а также для обеспечения достаточных инвестиций в декарбонизацию по цепочкам поставок нефти и газа для снижения выбросов парниковых газов при их производстве [21, 26].

По сравнению с поставками ископаемого топлива, цепочки поставок экологически чистых энергетических технологий, как правило, гораздо более сложные и во многих случаях менее прозрачные

Особое внимание на саммите было уделено оценке рисков для безопасности поставок нефти и газа, поскольку эти риски остаются значительными и будут изменяться со временем. Геополитические изменения, растущая концентрация потоков нефти и СПГ через ограниченное количество узких мест, а также более экстремальные погодные условия и другие новые угрозы будут оставаться в центре внимания энергетической политики на протяжении десятилетий, отмечается в [27]. Кроме того, необходимо тщательно оценить инвестиционные требования для обеспечения безопасности поставок нефти и газа, гибкости и доступности. Также возникают новые риски, в том числе более сложные кибератаки, которые трудно предсказать и которые могут иметь значительное влияние на доставку нефти и природного газа. Объем потоков торговли нефтью и СПГ через ограниченное количество узких мест, таких как Ормузский пролив, как ожидается, существенно вырастет в среднесрочной перспективе, что будет создавать дополнительные риски для безопасности поставок нефти и природного газа[8]. Изменение климата и длительные периоды засухи могут ограничить транзит через определенные торговые каналы, в том числе Панамский канал, в то время как чувствительность спроса на природный газ к изменениям погодных условий, включая волны холода и тепла, как ожидается, будет увеличиваться в среднесрочной перспективе [21, 27].

Быстрое развитие энергетических технологий, особенно экологически чистых, обеспечивших энергетический переход, одновременно показало недостаточность сложившегося понимания энергетической безопасности и открыло новые возможности ее обеспечения. Основными новыми угрозами и одновременно факторами энергетической безопасности в последние годы стали сложные и взаимосвязанные цепочки поставок так называемых критически важных полезных ископаемых, лежащих в основе роста возобновляемых источников энергии, ядерной энергии и новых технологий чистой энергетики, и сам процесс энергетического перехода.

Роль критически важных полезных ископаемых в энергетическом переходе и обеспечении энергобезопасности

Принципиально новым аспектом энергетической безопасности, обсуждение которого было в центре внимания участников дискуссии на саммите в Лондоне, является обеспечение надежных и устойчивых цепочек поставок критически важных минералов, необходимых для развития экологически чистых энерготехнологий. Этот аспект энергобезопасности, как и сам его объект, появился и получил развитие в эпоху энергоперехода, высшим приоритетом которого (а также и целью, и задачей) является декарбонизация энергетики.

[8] Нападение 28 февраля 2026 года США и Израиля на Иран и полное закрытие Ормузского пролива привели к новому глобальному нефтегазовому кризису и показали высокую степень реализации этих рисков.



Редкоземельные материалы и металлы Источник: Shutterstock.com

«Чистые энерготехнологии», такие как ветровая, солнечная, ядерная энергия и аккумуляторные батареи, внедряются с беспрецедентной скоростью, помогая снизить зависимость от импорта ископаемого топлива и защитить потребителей от волатильности цен на него. Но именно для их развития требуются во все большем количестве так называемые критически важные минералы и редкоземельные элементы. Именно они вызвали к жизни принципиально новое измерение энергетической безопасности [28].

Такие термины, как «критически важные полезные ископаемые», «критически важные минералы и материалы», «критическое минеральное сырье», «критически важные минералы», «критические минералы», «критическое и стратегическое минеральное сырье», в последнее время в экономической и политической литературе ведущих промышленно развитых и бурно развивающихся стран получили широкое применение. При всем кажущемся разнообразии этих терминов они по большому счету означают одно и то же, а именно практически незаменимые для новейших промышленных технологий материалы, получение которых потребителем сопряжено со значительными рисками. Эти материалы жизненно важны для экономики и национальной безопасности страны, они являются основой современных оборонных отраслей, возобновляемой энергетики, транспорта и многих других секторов экономики, но получение их подвержено нарушениям в цепочках поставок.

Несмотря на то, что понятие стратегических, дефицитных, критических минеральных ресурсов широко используется в различных научных источниках, до сих пор нет четкого определения и разграничения между этими категориями полезных ископаемых [29]. Нет и единого списка критически важных полезных ископаемых — он варьируется от страны к стране[9]. Страны по-разному определяют КВПИ в зависимости от своей политики и отраслевых приоритетов, рисков, связанных с поставками, и технологических потребностей.

[9] Далее для удобства все они будут называться просто критически важными полезными ископаемыми – КВПИ.

Семь минералов — церий, кобальт, диспрозий, лантан, неодим, никель и тербий — определяются как «глобально критически важные для поставки» в национальных оценках критичности более 40 стран мира, на которые приходится более 90 % мирового потребления этих минералов [29]. Эти семь минералов лежат в основе основных компонентов современных технологий, обеспечивающих электромобили, системы хранения энергии и передовые аэрокосмические приложения. Уникальные свойства делают их необходимыми и труднодоступными для замены. В то же время их производство и переработка остаются высококонцентрированными, подвергая глобальные цепочки поставок серьезным рискам — от сбоев в эксплуатации и транспортных узких мест до изменений в политике.

Для энергетического сектора мировой экономики, особенно для реализации концепции энергетического перехода, особое значение имеют никель, литий, кобальт, графит, а также медь и редкоземельные элементы [30].

В целом же исследования критичности того или иного минерала опираются на общую концепцию, согласно которой минерал считается критически важным по сравнению с другими минералами, если он характеризуется как высокими рисками, связанными с поставками, так и высокой уязвимостью к ограничениям поставок [28]. В некоторых исследованиях добавляется третий аспект, учитывающий экологические последствия добычи [31].

Особое беспокойство западных специалистов вызывает то, что «Китай мертвой хваткой держит этот рынок, осуществляя от 60 до 80 % мировых поставок некоторых из этих материалов» [32]. Так, по данным портала White & Case LLP, Китай доминирует в производстве галлия (98,7 % глобального производства), магния (95,05 %), вольфрама (82,7 %), висмута (81,3 %), кремния (76,3 %), ванадия (70,0 %), плавикового шпата (68,4 %), и сурьмы (60,0 %) [33][10].

Редкий минерал петалит

Источник: Shuuterstock.com



[10] В других источниках эти цифры еще больше. Так, по данным Всемирного экономического форума и МЭА по состоянию на 2025 год, Китай обеспечивает 96 % производства рафинированного графита и 95 % марганца, что имеет решающее значение для химии аккумуляторов и систем хранения энергии; контролирует 99 % производства рафинированного галлия, используемого в полупроводниках, телекоммуникационном оборудовании и военной электронике; на него приходится 74 % мирового производства рафинированного производства германия и 70 % индия, необходимого для производства волоконной оптики, солнечных панелей и современных чипов. См. Charted: China's Grip on Critical Mineral Refining. URL: https://www.visualcapitalist.com/charted-chinas-grip-on-critical-mineral-refining/.



Руда с содержанием палладия Источник: Shuuterstock.com

За последние несколько десятилетий Китай, обладая одной из крупнейших в мире минерально-сырьевой базой, создал и динамично развил у себя большинство производственно-технологических цепочек, связанных с освоением, переработкой и введением в промышленный оборот добываемого минерального сырья. При этом речь идет не только о его добыче и первичной переработке в концентраты, но и о производстве высокочистых материалов и веществ, а также создании целых отраслей по выпуску новой высокотехнологичной продукции на их основе. Отметим, что производство КВПИ (в среднем рост 10 % в год), прежде всего неметаллических и рудных, направлено на удовлетворение собственных потребностей быстроразвивающейся экономики Китая и только потом на экспорт [34]. Пекин десятилетиями устанавливал контроль над этими процессами, и большая часть мира была готова позволить ему это сделать, учитывая стоимость создания этих отраслей, способность КНР удерживать низкие цены и связанные с этим экологические издержки.

В результате на Китай в настоящее время приходится до 86 % мировой переработки и рафинирования ключевых энергетических минералов [30, с. 6].

Ярким примером доминирования Китая в производстве КВПИ являются редкоземельные элементы (РЗЭ), наиболее известные своим использованием в современных магнитах. Согласно данным Reuters, Китай производит почти 70 % мирового объема редкоземельных элементов и очищает около 90 % общего объема их добычи, оказывая почти монопольное влияние на их переработку и маркетинг. При этом КНР продолжает строить заводы по разделению редкоземельных элементов — примерно 50 за последнее десятилетие [35]. В то же время в остальной части мира есть всего три завода, способные производить оксиды редкоземельных элементов в больших масштабах: один в Калифорнии, один в Эстонии и один в Малайзии.

Единственное предприятие по переработке редкоземельных элементов за пределами Азии и Океании находится в Эстонии, где в 2024 году было обработано 368 тонн РЗЭ. При общем объеме мирового рафинирования в 66 100 тонн это означает, что на Эстонию приходится всего 0,6 % мирового производства. Китай же отвечает за переработку от 90 до 95 %. Работа по

диверсификации цепочки поставок уже ведется, но сталкивается со многими трудностями [35].

Это доминирование использовалось Китаем как стратегический инструмент в контексте торговой войны с Соединенными Штатами, а в последнее время — как геополитический рычаг в военных и технологических конфликтах, что вызывает особую тревогу у американских специалистов.

Текущая ситуация показывает, что рассматриваемые природные ресурсы превратились в геоэкономическое оружие. По мнению экспертов Atalayar Entre Deux Rives, в новом мировом порядке контроль над такими материалами, как самарий, неодим или церий, может быть столь же важен, как нефть или газ в XX веке [36].

В целях обеспечения своей национальной безопасности на государственном уровне в США, ЕС, Японии, Канаде принимаются правительственные программы поддержки горнорудной и перерабатывающих отраслей промышленности, формируются отраслевые альянсы и консорциумы, в рамках проектов государственно-частного партнерства выделяются значительные инвестиции на воссоздание/развитие минерально-сырьевых комплексов и запуск современных производств по переработке КВПИ. Зарубежный подход к решению проблем производства КВПИ характеризуется высоким долевым участием государства в финансировании соответствующих программ развития. Госфинансирование в Канаде составляет 35–40 %, в США — 50–70 %, в Японии — 75–80 % общих инвестиций, направляемых в настоящее время в горнодобывающую промышленность [34]. При этом в США ведущим государственным инвестором выступает Министерство обороны (Department of Defense, ныне — Министерство войны) [35].

Проблема энергетической безопасности предопределена неравномерным размещением на Земле топливно-энергетических ресурсов и территориальным несовпадением основных потребляющих и добывающих стран

Конечным результатом энергоперехода, апогеем «энергетической революции», должна стать трансформация глобальной энергетической системы из базы на ископаемом топливе, в систему, основанную на возобновляемой энергии

Однако, по мнению специалистов МЭА, в обозримой перспективе ситуация с доминированием Китая в области КВПИ практически не изменится [30].

Для реализации концепции энергетического перехода, имеющей основной целью достижение углеродной нейтральности в энергетической системе в целях смягчения нарастающих последствий изменения климата, требуется значительное сокращение выбросов парниковых газов и осуществление структурного сдвига в сторону низкоуглеродной экономики. Успешность реализации этой концепции зависит, прежде всего, от масштабного внедрения инновационных энергетических технологий, которые в настоящее время варьируются от ветряных турбин и солнечных электростанций до электромобилей и атомной энергетики, а также технологий улавливания и хранения углерода (CCUS), для которых требуется значительное количество КПВИ.

Так, по оценкам МЭА, для электромобиля требуется в шесть раз больше КВПИ, чем для обычного автомобиля, а для наземной ветряной электростанции их требуется в девять раз больше, чем для электростанции, работающей на природном газе [37].



Добыча редкоземельных металлов в Китае Источник: atlanticcouncil.org

Виды используемых минеральных ресурсов зависят от технологии. Литий, никель, кобальт, марганец и графит имеют решающее значение для производительности, долговечности и плотности энергии аккумуляторных батарей. Редкоземельные элементы необходимы для создания постоянных магнитов, которые жизненно важны для ветряных турбин и электромоторов. Электрические сети нуждаются в огромном количестве меди и алюминия, а медь является краеугольным камнем всех технологий, связанных с электроэнергией. В этой связи интересно отметить, что в докладе Global Energy Perspective 2025 от McKinsey подчеркивается, что энергетический переход зависит от меди и лития так же, как от солнца и ветра [38].

Переход к экологически чистой энергетике приведет к значительному увеличению спроса на КВПИ, который осуществляется путем формирования весьма сложных глобальных цепочек поставок.

Современные международные механизмы обеспечения энергетической безопасности призваны страховать страны от рисков, связанных с перебоями в поставках углеводородов, особенно нефти, и скачками цен на них. Добыча КВПИ сопряжена с другими, специфическими проблемами. Переход к экологически чистой энергетической системе приводит к появлению новых моделей торговли энергоресурсами, вовлечению новых стран в цепочки КВПИ и возникновению новых геополитических факторов.

По сравнению с поставками ископаемого топлива, цепочки поставок экологически чистых энергетических технологий, как правило, гораздо более сложные (и во многих случаях менее прозрачные). Кроме того, цепочки поставок многих экологически чистых энергетических технологий и сырья для их производства географически более сконцентрированы, чем цепочки поставок нефти или природного газа.

Спрос на минералы, лежащие в основе чистых технологий, продолжает расти быстрее, чем цепочки поставок могут расшириться при текущих ограничениях по инвестициям и разрешениям

По оценкам МЭА и Wood Mackenzie, спрос на минералы, лежащие в основе чистых технологий, продолжает расти быстрее, чем цепочки поставок могут расшириться при текущих ограничениях по инвестициям и разрешениям.

Анализируя цепочки поставок нефти и газа и отдельных экологически чистых энергетических технологий, следует также отметить, что опасения по поводу волатильности цен и надежности поставок одинаково справедливы как для первых, так и для вторых. Соответственно, механизмы обеспечения энергетической безопасности призваны страховать страны от рисков, связанных с перебоями в поставках и тех и других.

Отметим также, что, хотя энергетическая безопасность является общей целью, ее значение и средства сильно различаются в разных странах. Каждая страна сталкивается со своими собственными вызовами и ограничениями в области энергетической безопасности.

Соответственно, каждая страна должна следовать пути, который лучше всего отвечает ее интересам и обстоятельствам, формируется ресурсами, политикой и приоритетами развития, тем более что в меняющемся мире у государств есть возможность сделать энергетические системы более безопасными, доступными и устойчивыми в интересах своих граждан.

Энергопереход как один из факторов энергетической безопасности[11]

Высший приоритет (он же и цель, и задача энергетического перехода, как уже было отмечено выше) — декарбонизация (decarbonization) энергетики. Под этим термином идеологи энергоперехода подразумевают резкое сокращение эмиссии CO_2 и стабилизацию глобальных выбросов всех парниковых газов, прежде всего того же диоксида углерода, в целях предотвращения негативных изменений климата нашей планеты.

Этот приоритет обеспечивается целым рядом мер, базирующихся на быстром развитии и распространении новых технологий, технологических решений и инноваций. Важнейшими из этих мер (они же и цели энергоперехода) являются [41]:

- рост энергоэффективности и связанные с ним замедление темпов роста

[11] Подробно особенности и проблемы этого фактора рассмотрены нами в [39].



Нефтетанкер и ветрогенераторы

Китай продолжает строить заводы по разделению редкоземельных элементов — примерно 50 за последнее десятилетие. В остальной части мира есть всего три завода, способных производить оксиды редкоземельных элементов

энергопотребления и снижение общего энергопотребления в мире;
- резкое сокращение потребления ископаемых видов топлива;
- рост использования возобновляемой энергии.

Но эти же меры одновременно являются и важнейшими направлениями обеспечения энергетической безопасности. Поэтому эти две категории — энергетическая безопасность и энергетический переход, — являясь основными целями энергетической политики и основными движущими силами энергетических трансформаций, все чаще и чаще рассматриваются и анализируются как единое целое.

Конечным результатом энергоперехода, апогеем «энергетической революции» должна стать трансформация глобальной энергетической системы из системы, повсеместно основанной на ископаемом топливе, в систему, основанную на возобновляемой энергии [40].

Однако при всех успехах политики энергоперехода в 2024–2025 годах стала развиваться тенденция корректировки господствующей в странах ОЭСР его концепции, поскольку реализация энергоперехода в последние три года стала заметно «пробуксовывать» в связи с беспрецедентной сложностью этого процесса. Как отмечают специалисты McKinsey, глобальный энергетический переход продвигается, но недостаточно быстро и справедливо. Новое равновесие будет определяться не между нефтью и ветром, а между медью, электросетями, финансированием и управлением [38].

В последних прогнозах и прогностических исследованиях большинства ведущих мировых аналитических агентств стало допускаться, что ископаемые виды топлива сохранят значительную долю в мировом энергетическом балансе не только в ближайшее десятилетие, но и в периоде до 2050 года. В свою очередь подобное сохра-



Источник: Shutterstock.com

нение подчеркивает необходимость сохранения и сложившихся представлений о сущности энергетической безопасности и методов ее достижения.

Так, в уже упомянутом отчете Global Energy Perspective 2025 от McKinsey & Company, опубликованном в октябре 2025 года [38], допускается, что ископаемые виды топлива могут составить даже в 2050-м от 41 до 55 % глобального потребления энергии. При этом природный газ продемонстрирует наибольший рост, вытесняя топливо с более высоким уровнем выбросов парниковых газов.

Даже МЭА в своем последнем выпуске Мирового энергетического прогноза (World Energy Outlook, WEO), вышедшем в ноябре 2025 года [41], в консервативном сценарии — «Сценарии текущей политики» — допускает, что потребление нефти будет увеличиваться и после 2030-го. Тем самым своего пика в 113 млн баррелей в сутки (на 13 % выше, чем в 2024 году) спрос достигнет только в 2050-м. Что же касается спроса на природный газ, то он продолжит расти в обоих сценариях WEO-2025.

Отметим также, что энергопереход — важнейшая составная часть энергетической политики большинства стран — самым непосредственным образом связан с проблемами обеспечения их энергобезопасности. При этом если вначале энергопереход рассматривался в основном с позиций климатической политики (как важнейший фактор декарбонизации), то в 2010-е он получил признание и как фактор энергобезопасности, причем в последние годы в ряде стран, прежде всего в ЕС, именно этот фактор становится основным

Ряд стран, включая США, тщательно изучают преимущества инвестиций и геополитической конкуренции для национальной безопасности в условиях продолжения энергоперехода и отказа от него

Широкое развитие использования ВИЭ позволяет снизить зависимость соответствующих стран от импортных энергоресурсов, замещая их произведенной на месте энергией возобновляемых источников

доводом в пользу дальнейшего развития энергоперехода. Широкое развитие использования ВИЭ позволяет снизить зависимость соответствующих стран от импортных энергоресурсов, замещая их произведенной на месте энергией возобновляемых источников. Это замещение импортных энергоносителей на местные и является прямым воздействием энергоперехода на энергетическую безопасность.

О масштабах этого замещения можно судить по следующим данным.

В ЕС в результате реализации политики «Европейского зеленого курса» (European Green Deal) доля ВИЭ в суммарном производстве электроэнергии возросла с 34 % в 2019 году до 47 % в 2024-м.

При этом доля ископаемого топлива сократилась с 39 % до исторического минимума в 29 %. Соответственно, более половины стран ЕС либо полностью отказались от угля в целях электрогенерации, либо снизили его долю до менее 5 %. Пять лет подряд снижается и потребление природного газа в этих целях.

Это устойчивое снижение сыграло ключевую роль в сокращении общего потребления газа в ЕС на 20 % за последние пять лет: примерно треть снижения пришлась на электроэнергетический сектор. Без ветровой и солнечной энергии в 2024 году потребление природного газа в ЕС для производства электроэнергии было бы на 11 % выше [39].

В целом же, согласно последнему обзору European Electricity Review, подготовленному аналитическим центром Ember, без учета введенных с 2019 года мощно-



стей только ветровой и солнечной энергии ЕС пришлось бы импортировать на 92 млрд куб. м больше газа и на 55 млн тонн больше каменного угля, что стоило бы 59 млрд евро [42].

Интересно отметить, что рост энергобезопасности через энергопереход в свою очередь влияет на реализацию климатической политики. Так, анализируя и моделируя различные эффекты энергоперехода как фактора энергобезопасности, специалисты DNV в девятом выпуске своего ежегодного обзора энергетического перехода Energy Transition Outlook отмечают, что глобальные меры по энергетической безопасности со временем приводят к снижению эмиссии парниковых газов. По их оценкам, совокупные меры по обеспечению энергетической безопасности снижают глобальные выбросы на один-два процента в зависимости от года. Особенно этот эффект заметен для Европы, где в результате подобных мер выбросы в 2040 году будут ниже современного уровня на 3,2 %, а в 2050-м — на 9 % [43].

Однако, несмотря на то, что за последние десятилетия мир добился значительных успехов в энергетическом переходе, целый ряд геоэкономических факторов все больше и больше угрожают изменить ход переходного процесса. И основной из них состоит в том, что некоторые страны, включая США, тщательно изучают экономическую ценность и преимущества инвестиций



Источник: Shutterstock.com



Источник: Shutterstock.com

Уголь — один из самых популярных ископаемых энергоносителей

Источник: Shutterstock.com

и геополитической конкуренции для национальной безопасности в условиях продолжения энергоперехода и отказа от него.

Обсуждение этой проблемы не только ведется аналитиками внутри отдельных стран и исследовательских структур, но и стало одним из основных пунктов повестки дня очередного заседания Всемирного экономического форума (ВЭФ) в январе 2025 года в Давосе. Обсуждая вопросы геополитической стабильности, экономической устойчивости, изменения климата, искусственного интеллекта и инклюзивного экономического роста, его участники пришли к согласию, что усиливающаяся фрагментация мировой экономики все больше влияет на среднесрочные ориентиры роста отдельных стран. И хотя участники ВЭФ констатировали важность глобализации, а также готовность к сотрудничеству, они вынуждены были признать, что многие государства все чаще ориентируют свои экономики на поддержку роста изнутри, а не извне [39].

В ходе этих выступлений прозвучал вопрос, заданный исполнительным директором МЭА Фатихом Биролем: «Что важнее: энергетическая безопасность или энергетический переход? Чему мы должны отдать приоритет?» И сам же Бироль дал на него ответ: «Противопоставление этих двух важ-

Геополитические события в Венесуэле и военная кампания США и Израиля против Ирана дают основание выделить применение вооруженных сил в качестве нового фактора глобальной энергобезопасности

ных для человека целей сегодня, на мой взгляд, вводит нас в заблуждение. Мы можем сделать и то, и другое, мы уже делали много подобных вещей в мире — и это очень важно». И добавил: «Для меня успешный переход к чистой энергии — это тот, который делает энергетические системы гораздо более безопасными и устойчивыми, делает цены на энергию доступными и в то же время снижает зависимость от других стран... Благодаря хорошо продуманной политике энергетического перехода мы можем обеспечить наилучшую энергетическую без-



Дата-центр Amazon в Индиане

Источник: nytimes.com



Дата-центр Google

Источник: goodfon.ru

опасность... Мы можем снизить цены, мы можем принести процветание людям, и мы можем создать рабочие места...» [44].

Таким образом, по мнению МЭА, переход к чистой энергии и энергетическая безопасность неразрывно связаны, а диверсификация, эффективность и гибкость в энергетическом секторе являются «основными условиями как для энергетической безопасности, так и для ускорения энергетического перехода».

Интересен и такой вывод, сделанный в уже упомянутом отчете Global Energy Perspective 2025 от McKinsey & Company: экономическая доступность энергии и энергетическая безопасность становятся критически важными приоритетами, иногда превосходящими даже декарбонизацию. В пояснении к этому выводу отмечается, что на фоне геополитических потрясений, неконкурентоспособных технологий с низким уровнем выбросов и растущего спроса на электроэнергию «энергетическая безопасность снова стала главным приоритетом, и правительства отдают предпочтение стабильности и доступности, а не долгосрочным климатическим целям» [38].

Потрясения текущего года на мировых энергетических рынках (геополитические события в Венесуэле и особенно война на Ближнем Востоке и закрытие Ормузского пролива) поддержали и дали новый импульс развитию энергоперехода — ускорению развития технологий, которые должны снизить зависимость мировой экономики от нефти и газа. Многие страны и компании стали пересматривать свои стратегии инвестиций в энергетику в ответ на повышенную обеспокоенность по поводу энергетической безопасности и надежности глобальных торговых потоков, а некоторые из них стремятся уменьшить зависимость от импортируемых ископаемых видов топлива. Тем самым новый виток нестабильности на нефтяном рынке и кратно возросшие риски для поставок нефти и СПГ через Ближний Восток усилили позиции возобновляемой энергетики и возродили интерес к атомной энергетике.

Одновременно отмеченные геополитические события в Венесуэле и военная кампания США и Израиля против Ирана дают основание выделить применение вооруженных сил в качестве нового фактора глобальной энергобезопасности.

Надежное обеспечение электроэнергией как внутренний фактор энергетической безопасности

Анализ развития глобальной энергетики свидетельствует, что электроэнергия остается самым динамичным компонентом мирового спроса на энергию. Спрос на электроэнергию продолжает расти быстрыми темпами, причем за последнее десятилетие потребление электроэнергии растет вдвое быстрее, чем общий спрос на энергию. Индустриализация, электрификация конечного использования, мобильность, цифровизация, урбанизация и искусственный интеллект одновременно увеличивают этот спрос. Как и в прошлые эпохи роста населения, увеличения доходов и внедрения технологий, множество структурных факторов складываются, а не заменяют друг друга.

Ожидается, что мировой спрос на электроэнергию будет и дальше расти опережающими темпами в результате развития электрификации, в том числе транспорта, роста потребностей в охлаждении и быстрого расширения дата-центров. При этом более 80 % увеличения мировой выработки электроэнергии уже сейчас обеспечивается возобновляемыми источниками и ядерной энергией.

Рассматривая проблемы развития электроэнергетики и исходя из того, что безопасность электроснабжения — это способность электроэнергетической системы обеспечивать бесперебойную доступность электроэнергии путем противостояния и восстановления после сбоев и непредвиденных обстоятельств, участники лондонского саммита по энергобезопасности сделали следующий вывод. По мере того как роль электроэнергетики расширяется во всех секторах и экономиках, безопасность поставок должна рассматриваться не только как техническая проблема, но и как вопрос стратегической важности. Они признали, что ВИЭ и ядерная энергетика способствуют диверсификации и энергетической безопасности, снижая подверженность волатильным рынкам ископаемого топлива, а также обеспечивая значительную экономию для потребителей [26].

Тем самым электроэнергетическая безопасность объединяет все действия — технические, экономические и политические, — предпринимаемые для максимального



АЭС — один из надежных источников генерации

повышения степени безопасности в контексте энергетического перехода, киберсобытий и климатических воздействий, как краткосрочных, так и долгосрочных.

Важным дополнительным фактором повышения роли и значимости электроэнергетики в обеспечении энергетической безопасности является бум ИИ и дата-центров, которые становятся крупнейшими по-

Спрос на электроэнергию продолжает расти быстрыми темпами, причём за последнее десятилетие потребление электроэнергии растёт в два раза быстрее, чем общий спрос на энергоресурсы



Источник: Shutterstock.com

требителями электроэнергии, причем электроэнергии постоянно высокого качества.

По имеющимся данным, в течение последних шести лет потребление энергии дата-центрами ежегодно увеличивалось в два раза[12] [46].

Именно поэтому крупные центры обработки данных (ЦОД) начинают размещать вблизи газовых месторождений и других надежных источников первичной энергии и электроэнергии. Примеры — крупные дата-центры Amazon и Oracle в ОАЭ и Бахрейне, ЦОД Oracle в Дубае. Корпорация Microsoft инвестировала миллиарды долларов в развитие таких центров в ОАЭ. Amazon запустил проекты дата-центров в Саудовской Аравии стоимостью более 5 млрд долларов. Илон Маск анонсировал создание крупного ЦОД в Саудовской Аравии (проект будет реализован совместно с NVIDIA, чипы которой будут использоваться). В течение следующих пяти лет Humain намерена построить в Саудовской Аравии несколько ЦОД мощностью до 500 МВт, которые получат сотни тысяч передовых ускорителей NVIDIA [39].

Крупные ЦОД в ближайшем будущем разместятся вблизи американских газовых месторождений в Техасе. О проектах суммарной мощностью 4 ГВт с реализацией до 2027 года заявили ведущая американская нефтегазовая компания Chevron и поставщик газовых турбин GE Vernova, дочерняя компания General Electric [47]. Подключение дата-центров к угольным электростанциям также не исключается. В апреле 2025 года президент США Дональд Трамп подписал указ, направленный на возрождение угольной промышленности как важной компоненты национальной энергетической стратегии США. Указ прямо связывает поддержку угольной генерации с растущими потребностями ЦОД, особенно тех, что обслуживают ИИ-сферу [20]. И подобные примеры можно продолжать и продолжать.

По мере того, как роль электроэнергетики расширяется во всех секторах экономики, безопасность поставок должна рассматриваться не только как техническая проблема, но и как вопрос стратегической важности

Как полагает доктор Сара Вахшури (Sara Vakhshouri), основатель и президент SVB Energy International[13], ожидается, что бум на ИИ приведет к росту спроса на электроэнергию, какого мир не видел за последние десятилетия. Крупномасштабные дата-центры, учебные кластеры и вычис-

[12] По прогнозам McKinsey, в период с 2022 по 2030 год потребление электроэнергии центрами обработки данных будет расти в среднем на 17 % в год, особенно в странах ОЭСР [38].

[13] SVB Energy International – глобальная стратегическая консалтинговая компания, специализирующаяся на энергетической сфере.

лительные системы на базе ИИ потребляют огромное количество энергии, работают непрерывно и требуют исключительно надежной энергии [49]. И делает вывод: именно надежная, недорогая и обильная энергия будет определять, какие страны возглавят следующий этап технологических инноваций. Таким образом, ИИ объединил энергетическую политику с национальной безопасностью, поскольку способность управлять алгоритмами все больше определяет экономическую и национальную безопасность, а также геополитическую силу [49].

Однако быстрое развитие ИИ и ЦОД выявило еще одну проблему в энергетике, напрямую связанную с энергетической безопасностью, — отставание развития энергетической инфраструктуры. Датацентры строятся быстрее, чем создаются новые мощности в электрогенерации или пропускные мощности электросетей. Тем самым рост спроса на электроэнергию в результате развития ИИ (наряду с электрификацией транспорта и производства) вновь вызвал широкие дебаты об энергетической безопасности, надежности и доступности энергии. Особенно острыми они стали в Евросоюзе, где уже в настоящее время крупнейшие агломерации FLAPD (аббревиатура, состоящая из первых букв названий городов на латинице: Франкфурт, Лондон, Амстердам, Париж, Дублин) потеряли способность наращивать вычислительные мощности.

В США эти дебаты вышли на уровень президента страны и завершились тем, что в конце 2025 года Дональд Трамп объявил чрезвычайное положение в области энергетики, назвав энергетическую устойчивость приоритетом национальной безопасности. Он также создал Национальный совет по энергетическому доминированию[14] для координации федеральной политики в области производства, инвестиций, безопасности цепочек поставок, включая критически важные минералы, и инноваций, чтобы сохранить конкурентоспособность США в области ИИ и энергоемких отраслей [49].



ТЭС — основной источник электрогенерации

Увеличение инвестиций в развитие электросетей стало макроэкономической необходимостью, поскольку заторы и задержки в поставках электроэнергии напрямую приводят к росту затрат на ее доставку и увеличению риска отключения [50]. По мере того как экономики становятся все более электрифицированными, сбои в надеж-

[14] Концепция энергетического доминирования, введенная при Трампе, подчеркивает необходимость использования всех источников энергии и минералов для достижения энергетического изобилия и доступности. Стратегически это не подразумевает добычу одного источника за счет другого или предоставление приоритетов какому-либо пути – ископаемому, возобновляемому или ядерному — через субсидии или исключение. Вместо этого доминирование в энергетике представляет собой стратегическое согласование рынков, технологий и ресурсов, чтобы США поддерживали достаточное, надежное и доступное количество энергии для удовлетворения внутреннего спроса, стимулирования промышленного роста и поддержания геополитического влияния. Концепция делает акцент на мощности и устойчивости, а не на контроле, признавая, что сила Америки заключается в разнообразии ее энергетической базы – нефти, газа, угля, ядерной, ветровой, солнечной, гидроэнергетики и новых видов топлива – и в способности интегрировать их в целостную, ориентированную на рынок систему. В эпоху ИИ доминирование в области энергии является основой цифрового лидерства, поскольку данные, вычисления и инновации зависят от одного важного входа – избытка энергии [49].



Источник: Shutterstock.com

ности энергосистемы все чаще имеют последствия для всей экономики. Недавние инциденты иллюстрируют масштаб этого воздействия: крупная авария электропередачи в Чили в феврале 2025 года оставила почти всю страну без электроэнергии примерно на 17 часов, а в Испании и Португалии в апреле 2025 года произошло отключение электроэнергии, длившееся более 10 часов. Независимо от технических причин, эти события подчеркивают растущую экономическую стоимость отключений во все более электрифицированных экономиках и усиливающуюся ценность устойчивости систем [50].

Тем не менее развитие электросетей не успевает за ростом электрогенерации и потребностей в электрификации. Симптомы этого отставания уже заметны: задержки в поставках электроэнергии и подключении новых генераций и спроса, более резкое сокращение ветровой и солнечной энергии, а также более частые негативные цены на оптовых рынках.

Еще одна внутренняя угроза энергетической безопасности — устаревающая энергетическая инфраструктура, которая требует значительных модернизаций не только для обеспечения энергетического перехода, но и просто для нормальной экономической жизни государства. Ярким напоминанием об уязвимостях энергетических сетей и примером того, чем грозит их недооценка, служит отключение электроэнергии на северо-востоке США 14 августа 2003 года. Тогда в результате масштабного сбоя без электричества остались около 50–55 млн человек в северо-восточных штатах США и канадской провинции Онтарио. Были отключены 263 электростанции, включая 10 АЭС в США и Канаде. Авария привела к транспортному коллапсу (закрылись аэропорты, застряли пассажиры в метро), сбоям в работе коммуникаций (сотовая и телефонная связь), проблемам с водоснабжением и другим негативным последствиям. Ущерб экономике двух стран оценивался в диапазоне от 6 до 10 млрд долларов [52–54].

В целом же, по оценкам МЭА, недавние ежегодные сбои в эксплуатации критически важной энергетической инфраструктуры повлияли на энергоснабжение более 200 млн домохозяйств по всему миру. Основным фактором являются погодные риски: засухи ограничивают производство гидроэнергетики и некоторых тепловых генераторов, а штормы, наводнения и лесные пожары вынуждают отключить работу и наносят ущерб активам различных генерационных и сетевых технологий. Линии электропередачи особенно уязвимы: сети передачи и распределения затрагиваются примерно в 85 % случаев [50]. В то же время кибератаки и другие вредоносные риски

Без учёта введённых с 2019 г. мощностей ветровой и солнечной энергии, ЕС пришлось бы импортировать на 92 млрд куб. м больше газа и на 55 млн т больше угля, что стоило бы 59 млрд евро

становятся все более заметными по мере того, как энергетические системы становятся все более цифровыми и взаимосвязанными.

В заключение несколько слов о новейших факторах энергобезопасности и о роли глобального сотрудничества в реализации ее задач и задач энергоперехода.

Выше уже было показано, как развитие ИИ и дата-центров стало дополнительным фактором повышения роли и значимости электроэнергетики в обеспечении энергетической безопасности. Но следует особо отметить, что и искусственный интеллект, и цифровые инновации сами по себе водоемки, поэтому их дальнейшее развитие грозит усугубить дефицит воды, важнейшего природного ресурса. Тем самым развитие ИИ и дата-центров одновременно влияет на состояние энергетической безопасности и устойчивости водопотребления, грозя породить новые гидрополитические конфликты.

Об этой проблеме впервые предельно четко было сказано на ПМЭФ-2026, где Ретно Марсуди, специальный посланник Генерального секретаря ООН по водным ресурсам, особо предупредила: искусственный интеллект и цифровые инновации сами по себе водоемки и не должны усугублять дефицит этого ресурса. В ответ на эту озабоченность Дэвид Окпатума, соучредитель Организации по развитию и сотрудничеству в Африке (DevCA), выступая 3 июня 2026 года на специальной сессии «Вызовы и перспективы международного водного сотрудничества: вода как фактор устойчивого развития», предложил рассматривать воду не как тему политики охраны окружающей среды, а как вопрос национальной и международной безопасности [55]. Коснулся этой проблемы и главный исполнительный директор, председатель правления ПАО «НК “Роснефть”» И. И. Сечин, добавив, что к 2030 году потребление воды центрами обработки данных может почти удвоиться [56].

Отметим, что особую остроту эта проблема приобретает, когда речь заходит о трансграничных водных ресурсах, что грозит активизировать и такой фактор энергобезопасности, как применение вооруженных сил. Значимость этого фактора для энергобезопасности сейчас особенно хорошо видна на Ближнем Востоке, где военные действия США и Израиля против Ирана привели к многомесячной блокировке Ормузского пролива и новому глобальному нефтегазовому кризису.



Высоковольтная ЛЭП
Автор: Михаил Дышлюк

Специалистами обсуждаются и такие факторы энергобезопасности, как:

- экстремальные погодные явления и защита энергетической инфраструктуры от климатических нарушений;
- угрозы как физической, так и цифровой инфраструктуре от кибератак;
- адаптация энергетических систем для противостояния нарушениям и способность к управлению спросом;
- ключевые цепочки поставок оборудования, особенно для нефтепереработки, и компонентов электросети, поскольку торговые ограничения, узкие места и геополитические рычаги могут замедлить внедрение и повысить затраты и др.



Однако изучение этих факторов в настоящее время находится в начальной стадии, а разработка практических мер по их нейтрализации — практически на нулевом уровне.

Анализ ситуации в сфере обеспечения энергобезопасности дает основание сделать вывод, что по мере того, как глобальные проблемы становятся все более сложными и взаимосвязанными, достижение устойчивости как основы глобальной энергобезопасности будет все больше и больше зависеть от масштабов и степени сотрудничества между странами мира и основными энергетическими компаниями. Сотрудничества, которое было основательно подорвано в последнее десятилетие, доказательством чего является фактически полный разрыв энергетических взаимоотношений России со странами Запада [39].

Подобная ситуация зарубежными специалистами видится и оценивается по-разному. Так, в работах Всемирного экономического форума отмечается, что, несмотря на «препятствия для многосторонности», некоторые области сотрудничества оказываются устойчивыми, что свертывание связей с Россией приводит к эволюции глобального сотрудничества, а не к его прекращению. В результате глобальное сотрудничество в целом демонстрирует устойчивость, хотя ситуация в различных его сферах отличается диаметрально: если в сфере климата и технологий оно получило значительное развитие, то в сфере здравоохранения и торговли в целом осталось на прежнем уровне, а сотрудничество в области мира и безопасности резко снизилось [57].

Электроэнергетическая безопасность объединяет все действия: технические, экономические и политические, предпринимаемые для максимального повышения степени безопасности в контексте энергоперехода

Быстрое развитие ИИ и ЦОД выявило ещё одну проблему в энергетике, напрямую связанную с энергетической безопасностью – отставание развития энергетической инфраструктуры

В целом же глобальное сотрудничество находится ниже необходимого уровня для решения критически важных экономических и экологических проблем и проблем безопасности. Для его развития до необходимого уровня в сложившемся сложном и неопределенном геополитическом контексте требуется открытый и конструктивный диалог, который является ключевым фактором для выявления потенциальных путей сотрудничества, способствующих продвижению общих интересов.

Однако многие западные аналитики и специалисты, исключая Россию из сферы своего анализа и исходя только из мира без нее, полагают, что полномасштабное партнерство и сотрудничество возможно и в рамках раздробленного, фрагментированного мира, то есть в каждой из его частей.

И надо понимать, что призывы политически нейтральных и непредвзятых по отношению к России специалистов к необходимости международного сотрудничества в целях обеспечения глобальной энергобезопасности (которые можно только приветствовать) в сложившихся международных отношениях в ближайшие годы, а то и десятилетия реальных результатов не дадут.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных в рамках Госзадания ИПНГ РАН (тема № FMME-2025_0012) «Фундаментальный базис инновационных, цифровых технологий прогноза, поиска, разведки и освоения нефтегазовых ресурсов (фундаментальные, поисковые, прикладные, экономические и междисциплинарные исследования до 2030 года)».

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. *Повестка переговоров по переустройству мира: крах старого порядка // Коммерсантъ. URL: https://www.kommersant.ru/doc/8623271?nav_id=chapter_2.*
2. *Мастепанов А. М. Проблемы обеспечения энергетической безопасности в новых геополитических условиях // Энергетическая политика. 2017. № 1. С. 20–37.*
3. *Энергетика и геополитика / под ред. В. В. Костюка и А. А. Макарова. М.: Наука, 2011.*
4. *Энергетические приоритеты и безопасность России (нефтегазовый комплекс) / под общей редакцией А. М. Мастепанова. М.: ООО «Газпром экспо», 2013. 336 с.*
5. *Энергетическая безопасность России / В. В. Бушуев [и др.]. РАН. Сибирское отделение. М.: Наука, 1998. 301 с.*
6. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Энергетическая безопасность (ТЭК и государство). М.: МГФ «Знание», 2000. 304 с.*
7. *Ресурсно-инновационное развитие России / под. ред. А. М. Мастепанова и Н. И. Комкова. Изд. 2-е, доп. М.: Институт компьютерных исследований, 2014. 744 с.*
8. *Energy Dictionary / World Energy Council. Paris: Jouve Sl., 1992.*
9. *Energy Technology Policy. OECD. Paris, 1985.*
10. *Security of Supply. Energy in Europe. 1990. No. 16.*
11. *The IEA Natural Gas Security Study. IEA/OECD. Paris, 1995.*
12. *Shared Goals. OECD. Paris, 1993.*
13. *The History of the IEA. Vol. II. Major Policies and Actions. OECD. Paris, 1995.*
14. *Energy Policies of the IEA Countries. 1997 Review. OECD/IEA. 1997.*
15. *Мастепанов А. М. Россия в системе глобальной энергетической безопасности // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. Вып. 11 / РАН. ИНИОН. Отд. науч. сотрудничества; отв. ред. В. И. Герасимов. М., 2016. Ч. 2. С. 138–144.*
16. *Энергодиалог Европейский Союз – Российская Федерация. Вектор развития Евросоюза. // Приложение к общественно-деловому журналу «Энергетическая политика». М.: ГУ ИЭС, 2007.*
17. *Председатель Европейской комиссии Жозе-Мануэль Баррозу: «Энергетическую безопасность не обеспечить, латая дыры» // Известия. 11.07.2006.*
18. *Мастепанов А. М. Энергетическая безопасность как фактор современного мира // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2021. № 5(197). С. 5–13.*
19. *Мастепанов А. М. Ожидаемая трансформация основных угроз энергетической безопасности России и меры, необходимые для их нейтрализации // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2021. № 9(201). С. 5–12.*
20. *Мастепанов А. М. Энергетическая безопасность «по-европейски» // Энергетическая политика. 2023. № 1(179). С. 4–23. DOI 10.46920/2409-5516_2023_1179_4.*
21. *Мастепанов А. М. Новые аспекты энергетической безопасности во фрагментированном геополитическом пространстве // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2025. № 7(247). С. 31–42.*
22. *World Energy Outlook 2022. OECD/IEA. 524 p. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022.*
23. *IEA to convene major international energy security summit in London, hosted by UK government. URL: https://www.biee.org/iea-to-convene-major-international-energy-security-summit-in-london-hosted-by-uk-government/.*
24. *World Energy Trilemma 2024: Evolving with resilience and justice. URL: https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-report-2024.*
25. *IEA to convene major international energy security summit in London, hosted by UK government. News 02 August 2024. URL: https://www.iea.org/news/iea-to-convene-major-international-energy-security-summit-in-london-hosted-by-uk-government.*
26. *Chairs' Summary Summit on the Future of Energy Security. Lancaster House, London, 24-25th April 2025. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/e9c913b8-4efe-4e25-8c50-460f800cc2a6/ChairsSummary_FutureofEnergySecurity.pdf.*
27. *Summit on the Future of Energy Security. Background paper. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9d5540fa-7626-477b-8505-443a6eb14e69/BackgroundPaper_FutureofEnergySecurity_web.pdf.*
28. *UK Energy Security Summit 2025: Will Renewable Energy Win Over Oil & Gas? URL: https://theeuropeanleaders.com/uk-energy-security-summit/.*
29. *A Critical Minerals Enabled Energy Future. A report by the International Energy Forum. December 2025. URL: https://www.ief.org/reports/a-critical-minerals-enabled-energy-future.*
30. *Global Critical Minerals Outlook 2025. URL: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025.*

31. *Critical Minerals Today and in 2030: An Analysis for OECD Countries. Environment Working Paper. No. 91. URL:https/www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2015/09/critical-minerals-today-and-in-2030_g17a26fa/5jrtknwm5hr5-en.pdf.*
32. *Six things we learned about the future of energy security at UK summit. URL: https://www.theguardian.com/environment/2025/apr/25/five-things-we-learned-about-the-future-of-energy-security-at-uk-summit.*
33. *Production Share of Critical Minerals worldwide as of 2024, by majority producing country. URL: https://www.whitecase.com/sites/default/files/2025-10/us-mining-policy-charts4.pdf.*
34. *Критически важные минералы и материалы для индустрии 4.0: особенности получения и перспективы применения на глобальных рынках. Аналитический отчет / Мансуров О. А., Птицын П. Б. М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. 142 с.*
35. *Critical Minerals, Rare Earth Elements, and the Challenges Ahead for the United States. Report by Karl Friedhoff. URL: https://globalaffairs.org/research/report/critical-minerals-rare-earth-elements-and-challenges-ahead-united-states.*
36. *La lutte entre la Chine et les Etats-Unis pour les métaux rares: un nouveau front dans la guerre commerciale. URL: https://www.atalayar.com/fr/articulo/reportages/lutte-chine-et-etats-unis-pour-metaux-rares-nouveau-front-dans-guerre-commerciale/20250611135726215821.html.*
37. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, International Energy Forum. IEA. Revised version, March 2022. URL: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions.pdf.*
38. *McKinsey's Global Energy Perspective 2025. URL: https://www.mckinsey.com/industries/energy-and-materials/our-insights/global-energy-perspective.*
39. *Мастепанов А. М. Энергопереход как один из факторов энергетической безопасности // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2026. № 6(258). С. 33–42.*
40. *Мастепанов А. М. Углеродная нейтральность как основной вектор предстоящего развития мировой энергетики. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2022. 437 с.*
41. *World Energy Outlook 2025. IEA. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025.*
42. *European Electricity Review 2025. Ember, 23 January 2025. URL: https://ember-energy.org/app/uploads/2025/01/EER_2025_22012025.pdf.*
43. *DNV Global Energy Transition Outlook 2025. URL: https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download/.*
44. *The energy transition is not a rival of energy security | World Economic Forum. URL: https://www.weforum.org/stories/2025/01/davos-2025-do-we-really-have-to-choose-between-energy-security-and-the-energy-transition/.*
45. *WEC. World Energy Trilemma 2024. URL: https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-report-2024.*
46. *Trends in AI Supercomputers // Epoch AI. 03.2025. URL: https://epoch.ai/blog/trends-in-ai-supercomputers.*
47. *Engine no. 1, Chevron and GE Vernova to power U.S. data centers // Chevron. 28.01.2025. URL: https://www.chevron.com/newsroom/2025/q1/power-solutions-for-us-data-centers.*
48. *Reinvigorating America's Beautiful Clean Coal Industry and Amending Executive Order 14241 // The White House. 08.04.2025. URL: https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/reinvigorating-americas-beautiful-clean-coalindustry-and-amending-executive-order-14241/.*
49. *Vakhshouri Sara. Outlook 2026: The algorithmic arms race for energy – When data becomes a load on geopolitics and energy security. URL: https://pemedianetwork.com/petroleum-economist/articles/geopolitics/2025/outlook-2026-the-algorithmic-arms-race-for-energy/.*
50. *Rim Berahab. What 2025-2026 Tells Us About the Future of Global Energy. URL: https://www.policycenter.ma/publications/what-2025-2026-tells-us-about-future-global-energy.*
52. *The Great Northeast Blackout of 2003. URL: https://discover.hubpages.com/technology/The-Great-Northeast-Blackout-of-2003.*
53. *Northeastern blackout of 2003. URL: https://www.ebsco.com/research-starters/power-and-energy/northeastern-blackout-2003#full-article.*
54. *The August 14, 2003. Blackout in the United States: Technical and Regulatory Issues. URL: https://archive.org/details/august-2003-blackout-rosen.*
55. *Команда ИНФРАГРИН. Водное сотрудничество в сложном мире: мнения спикеров ПМЭФ. URL: https://infragreen.ru/glavnyi-riesurs-chieloviechiestva-pochiemu-voda-staniet-osnovoi-novogho-mirovogho-poriadka/.*
56. *Глава «Роснефти» рассказал о будущем мировой экономики // Ведомости. 08.06.2026. URL: https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2026/06/08/1204060-glava-rosnefti-rasskazal-o-buduschem-mirovoi-ekonomiki?from=copy_text.*
57. *WEF. Forum Stories: Special Edition: Annual Meeting 2026/Global Cooperation Barometer. 19/01/2026. URL: https://www.weforum.org/stories/.*

УДК. 339.972 DOI 10.46920/2409-5516_2026_6221_44 EDN MILKKH

Критические металлы и минералы: критический взгляд на терминологию, стратегии и императивы

Critical Metals and Minerals: a Critical Look into Terminology, Strategies, and Imperatives

Алексей ЧЕРЕПОВИЦЫН
Заведующий кафедрой организации и управления Санкт-Петербургского горного университета, д. э. н., профессор
E-mail: alekseicherepov@inbox.ru

Никита ИЛЛЕРИЦКИЙ
Доцент кафедры организации и управления Санкт-Петербургского горного университета, к. э. н.
E-mail: illernick@yandex.ru

Alexey CHEREPOVITSYN
Head of the Department of Organization and Management, St. Petersburg Mining University, Doctor of Economic Sciences, Professor
E-mail: alekseicherepov@inbox.ru

Nikita ILLERITSKIY
Associate Professor of the Department of Organization and Management, St. Petersburg Mining University, Candidate of Economic Sciences
E-mail: illernick@yandex.ru



Добыча лития в Аргентине
Источник: Shutterstock.com

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты понятия «критические металлы и минералы» в контексте современного ресурсно-энергетического развития. Авторы анализируют различные подходы к определению данного термина в зарубежной и отечественной научной литературе, а также исследуют методологию идентификации наиболее значимых минеральных ресурсов. В работе представлен сравнительный анализ документов государственного стратегического планирования США, ЕС, КНР и МЭА в области критических металлов и минералов. Особое внимание уделяется анализу перечней критических металлов в различных странах и организациях, а также оценке текущей ситуации в российской горнодобывающей отрасли.
Авторы подробно рассматривают значимость меди и алюминия для развития экономики и энергетического комплекса, анализируют текущее состояние и перспективы развития российской медной и алюминиевой промышленности. Особое внимание уделяется проблемам сырьевой безопасности и технологического развития отечественной медной и алюминиевой промышленности.
В результате исследования предложены конкретные рекомендации по совершенствованию терминологического аппарата, развитию государственной политики в области управления стратегическим сырьем и повышению конкурентоспособности российской горнодобывающей отрасли. В частности, предлагается использовать термин «инфраструктурно значимые металлы и минералы» вместо «критические». Основные выводы работы заключаются в необходимости усиления государственной поддержки российской горнодобывающей отрасли, развития собственных технологий переработки сырья и формирования независимых производственно-логистических цепочек. Авторы подчеркивают важность интеграции электроэнергетического комплекса, машиностроения и горнодобывающей промышленности в рамках национальных проектов по модернизации энергетической инфраструктуры.
Ключевые слова: критические металлы, стратегические ресурсы, минерально-сырьевая база, энергетическая инфраструктура, горнодобывающая промышленность, государственное планирование, металлургическая отрасль, электроэнергетика, ресурсная безопасность, экономическое развитие

Abstract. The article discusses the theoretical and practical aspects of the concept of “critical metals and minerals” in the context of modern resource and energy development. The authors analyze various approaches to the definition of this term in foreign and domestic scientific literature, as well as explore the methodology for identifying the most significant mineral resources. The paper presents a comparative analysis of the documents of the state strategic planning of the USA, the EU, the PRC and the IEA in the field of critical metals and minerals. Special attention is paid to analyzing the lists of critical metals in various countries and organizations, as well as assessing the current situation in the Russian mining industry.
The authors also consider in detail the importance of copper and aluminum for the development of the economy and the energy complex, analyze the current state and prospects for the development of the Russian copper and aluminum industry. Special attention is paid to the problems of raw material safety and technological development of the domestic copper and aluminum industries.
As a result of the research, specific recommendations are proposed for improving the terminological apparatus, developing state policy in the field of strategic raw materials management and increasing the competitiveness of the Russian mining industry. In par-

ticular, it is proposed to use the term “infrastructurally significant metals and minerals” instead of “critical” ones. The main conclusions of the work are the need to strengthen state support for the Russian mining industry, develop its own technologies for processing raw materials and form independent production and logistics chains. The authors emphasize the importance of integrating the electric power industry, mechanical engineering, and mining industries within the framework of national energy infrastructure modernization projects.
Keywords: critical metals, strategic resources, mineral resource base, energy infrastructure, mining industry, government planning, metallurgical industry, electric power industry, resource security, economic development

Введение

В период с середины 2010-х годов на фоне коренных изменений в ресурсно-энергетической политике и стратегическом планировании развития ресурсно-энергетических комплексов различных групп стран и регионов мира новое прочтение приобрела проблематика добычи и использования ряда металлов и природных элементов. Авторами уже рассматривалось несколько комплексных и неоднозначных сюжетов на данную тематику [1]. В западной терминологии эта группа металлов и элементов получила название critical metals & minerals, что было калькировано на русский язык в виде термина «критические металлы и минералы» либо «критические и стратегические элементы». Однако, во-первых, в различных научных и корпоративных источниках в эту группу включается разный набор собственно металлов и химических элементов, а во-вторых, терминологический аппарат, во всяком случае русскоязычный, требует здесь безусловной корректировки и формализации. Соответствующие предложения будут представлены авторами в заключительной части данной статьи.

Комплекс тем, связанных с понятием критических металлов и минералов, в зарубежных исследованиях освещается по понятным причинам более чем широко. На подобные темы опубликованы сотни статей в ведущих зарубежных научных журналах, однако надо отметить, что большая часть зарубежных авторов так или иначе поддерживает «зеленую повестку», рассматривая критические металлы и минералы в качестве основы так называемого энергетического перехода. Наибольшее количество статей в связи со взрывным ростом производства химических аккумуляторов раскрывают аспекты добычи и использования лития и литиевых батарей [2, 3], а также общей роли критических материалов в развитии ВИЭ в странах Запада [4]. Более комплексные исследования оценивают отрасль критических металлов и минералов с использованием подхода жизненного цикла, в том числе с точки зрения воздействия на окружающую среду [5]. Значительный интерес также представляют всесторонние исследования рисков, вызовов и возможностей развития отрасли критических металлов и минералов в условиях энергетического перехода [6, 7]. Любопытно, что наиболее прогрессивные зарубежные авторы наконец начинают отходить от одностороннего лоббирования «зеленой повестки», объективно оценивая влияние масштабирования добычи критических металлов и элементов на окружающую среду и отмечая пара-

Важнейшие стратегии Китая в области добычи полезных ископаемых зародились в 1970-х годах в индустрии редкоземельных элементов, которая на сегодняшний день достигла беспрецедентных масштабов

доксы энергетического перехода [8]. Важно отметить, что западные авторы прекрасно понимают высокую значимость Арктики, Евразии и Центральной Азии в процессах взрывного роста мирового рынка критических металлов и минералов и усиления конкуренции за эти ресурсы [9–11]. В 2024–2026 годах обострилась полемика в контексте ужесточения конкуренции и торговых войн за ресурсно-технологическое обеспечение высокотехнологичных отраслей между США и Китаем, который является практически монополистом в этой отрасли мировой экономики [12], хотя отдельные авторы указывают на важность взаимозависимостей торгово-производственных цепочек между Китаем и США в данной отрасли [13].

Российские авторы в меньшей степени сконцентрированы на тематике «зеленой повестки» и энергетического перехода, но в гораздо большей — на обеспечении ресурсной безопасности [14] и ресурсно-геологических аспектах [15–17], велико число инженерно-технических статей, патентов и разработок. Однако количество научных работ, освещающих общие стратегические, отраслевые и технико-экономические аспекты, относительно мало, а большая часть таких статей носит обзорный характер [18]. Лишь единичные работы содержат последовательный и глубокий анализ проблематики с технико-экономическими импликациями, особенно применительно к Российской Федерации [19].

Методы

История зарубежной терминологии во многом основана на методике идентификации наиболее экономически значимого минерального сырья, разработанной в США в середине 2000-х годов [20]. Целью этой работы было определение основных риск-факторов развития американской экономики с учетом необходимости обеспечения потребности в основных видах минерального



Редкоземельные минералы и металлы Источник: Shutterstock.com



Богучанский алюминиевый завод Источник: РУСАЛ

сырья (не только металлического свойства, но и в широком смысле, включая углеводороды). Развитие этой работы в США (и по образу и подобию — в Европе и ряде других регионов мира) сформировало достаточно устоявшуюся методологию оценки критичности (criticality) тех или иных ресурсов для экономического развития. Американский Департамент энергетики (DOE) формирует и актуализирует соответствующую методологию в рамках документа государственного стратегического планирования — Critical Materials Assessment[1], а также соответствующий перечень металлов и элементов с импликациями их стратегической значимости[2], куда входит 50 наиболее значимых химических элементов, в том числе 18 наиболее значимых для развития топливно-энергетического комплекса. Уровень критичности в результате визуализируется в общепринятом виде матрицы или «тепловой карты» рисков, на основании анализа наличия запасов, возможностей производства или импорта для каждого элемента разработаны и предлагаются меры государственной стратегической политики и поддержки в данной сфере. Таким образом, американское законодательство и государственная политика в данной области являются максимально предметными, нацеленными на обеспечение национальных интересов и интересов компаний США. Кроме того, разработана многосторонняя стратегия по укреплению важнейших цепочек поставок полезных ископаемых и диверсификации их импорта в США без участия Китая, включая восстановление связей между «надежными партнерами», двусторонние соглашения с союзниками и более широкие партнерства в рамках возглавляемого Соединенными Штатами Партнерства по обеспечению безопасности полезных ископаемых[3].

[1] U.S. Department of Energy (2023). Critical Materials Assessment. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf.

[2] U.S. Department of Energy (2023). Notice of final determination on 2023 DOE Critical Materials List. Federal Register. URL: https://www.federalregister.gov/documents/2023/08/04/2023-16611/notice-of-final-determination-on-2023-doe-critical-materials-list.

[3] U.S. Department of State (2022). Minerals Security Partnership. URL: https://www.state.gov/minerals-security-partnership. Official Journal of the European Union (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng.

Медь играет ключевую роль не только в процессах так называемого энергетического перехода, но и в целом в развитии энергетической инфраструктуры, в первую очередь в новых этапах электрификации

В Европе законодательные акты и инициативы, касающиеся обеспечения безопасности поставок критического сырья, разрабатывались с начала 2010-х. Начиная с 2011 года Еврокомиссия раз в три года формировала перечень критически важных минералов и материалов. Однако в достаточно формализованном виде документы государственного стратегического планирования в этой области были разработаны и приняты только в 2022–2024 годах, что дополнило обширную, но, как сегодня становится понятно, не слишком эффективную и экономически полезную законодательную базу европейской «зеленой сделки». Итоговая версия документа (в европейском нарративе для него принят акроним CRMA — Critical Raw Materials Act)[4] включает в себя перечень из 34 критических и 17 стратегических видов сырья, которые признаны жизненно необходимыми европейской экономике и промышленности для осуществления «зеленой» и цифровой трансформации. За политически мотивированными формулировками данного акта на самом деле скрывается обоснование выделения дополнительного объема общеевропейского финансирования на проекты, связанные с обеспечением доступности в Европе данных материалов и продукции на их основе, включая и открыто протекционистские меры. Важно также, что CRMA устанавливает три критерия для годового потребления данного сырья в Евросоюзе: 10 % должно приходиться на собственную добычу стран ЕС, 40 % должно перерабатываться в ЕС и 25 % должно поступать из переработанных материалов. Таким образом, для чистого импорта остается лишь 25 % рынка, а добывающие и перерабатывающие компании ЕС получат льготы, упроще-

Добыча лития в США

Источник: prometall.info



[4] Official Journal of the European Union (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng.

ние разрешительных и согласовательных процедур на уровне государств — членов Евросоюза и ряд других преимуществ. Кроме того, документ прямо обязывает компании отрасли провести риск-анализ производственно-стоимостных цепочек с целью выявления уязвимых мест, после чего предоставить соответствующие отчеты в европейские органы. Следовательно, европейские стратегические нарративы в этой области сформированы «на бумаге», но пока еще не подкреплены достаточным объемом конкретных политико-экономических мер.

Важнейшие стратегии Китая в области добычи полезных ископаемых зародились в 1970-х годах в индустрии редкоземельных элементов, которая на сегодняшний день достигла беспрецедентных масштабов и эффективности. Китай не только владеет значительной (для отдельных минералов — доминирующей) долей мировых запасов критических элементов — он доминирует в процессе их переработки, являясь крупнейшим в мире импортером важнейших минералов, которые перерабатывает и поставляет остальному миру. В рамках деятельности администрации Си Цзиньпина китайскими стратегами был выработан сбалансированный подход к содействию промышленным реформам, направленным на защиту природных ресурсов и окружающей среды с помощью технологий, инноваций и устойчивого развития. Впервые упоминание стратегических полезных ископаемых было сделано в Национальном плане по минеральным ресурсам (НПМР) на 2016–2020 годы и его последующих обновленных версиях[5]. В документе были определены 24 стратегических ресурса: металлические и неметаллические полезные ископаемые и энергетические ресурсы. В нем также изложена все-

В странах с наиболее активной добычей меди, таких как Чили, Перу, Конго, США, истощение запасов наступит уже менее чем через 50 лет, а в случае Китая — менее чем через 25 лет

Баимский ГОК

Источник: chaunmuseum.ru



[5] Национальный план по минеральным ресурсам на 2016–2020 гг. (2017). Департамент планирования развития Государственного комитета по делам развития и реформ КНР. URL: https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201705/t20170511_1196755.html.





Добыча бокситов в Африке
Источник: bloomberg.com

объемлющая стратегия страны в области добычи полезных ископаемых, сочетающая внутреннюю и внешнюю политику. При этом в стратегии Китая основное внимание уделяется развитию горнодобывающей деятельности, повышению эффективности использования и сохранности полезных ископаемых, модернизации промышленных структур, продвижению инноваций, а также развитию экономики замкнутого цикла в промышленности. Редкоземельные металлы и минералы неоднократно упоминаются и в разделе 4 главы 8[6] 14-го пятилетнего плана развития КНР. Напротив, стратегии США и ЕС делают акцент на развитии международного сотрудничества в области добычи полезных ископаемых в Китае и других странах, то есть поддерживают глобалистскую повестку.

Международное энергетическое агентство (МЭА) в полной мере озаботилось вопросом критических минералов в 2022–2023 годах. В 2023-м был опубликован первый (в последующем — регулярный) обзор мировой отрасли критических минералов (CMMR)[7], а в 2024-м — соответствующий долгосрочный прогноз (GCMO)[8]. Оставляя за скобками (в рамках данной статьи) возрастающий объем совершенно справедливой критики в адрес прогнозов и политических импликаций МЭА, необходимо отметить высокую информационно-аналитическую ценность их фактических данных: по сути, результата первой попытки формирования глобальной статистической базы по критическим металлам и минералам. Что важно, в МЭА, в отличие

[6] National Development and Reform Commission of the People's Republic of China (2022). The 14th Five-Year Plan and Long-Range Objectives Through 2035. Part III, Chapter 8. URL: https://en.ndrc.gov.cn/policies/202204/P020220426647680289561.pdf.
[7] IEA (2023). Critical Minerals Market Review 2023. URL: https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023.
[8] IEA (2024). Global Critical Minerals Outlook 2024. URL: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024.



Добыча меди в Норильске Источник: www1.ru

от Европейского союза, уделили большое внимание и отнесли к критическим не только редкие и редкоземельные металлы и элементы (также группируемые как «материалы энергоперехода»), но и алюминий и медь, подчеркивая их инфраструктурное значение для развития в первую очередь сетей передачи электроэнергии и телекоммуникационных сетей. МЭА отмечает, что в последние годы объем рынка критических полезных ископаемых, которые имеют жизненно важное значение для целого ряда технологий получения экологически чистой энергии, увеличился более чем в два раза, а перспективы дальнейшего активного роста связаны с увеличением инвестиций в отрасль. Причем наиболее быстрыми темпами растут инвестиции в литиевые проекты, за ними следуют медь и никель, и если все заявленные проекты будут реализованы в срок, то объема предложения будет достаточно для удовлетворения ожидаемого спроса.

Нельзя не отметить, что во всех рассмотренных выше случаях перечень металлов и элементов, относимых к критическим, существенно отличается. Наиболее полные и сходные перечни — у США и МЭА, однако по неизвестной причине медь не включена в список USGS/DOE. Любопытно также, что в перечень КНР не включены редкоземельные элементы и металлы платиновой группы — вероятно, по причине их достаточной доступности на территории Китая. При этом литий и другие компоненты аккумуляторных батарей включены в перечни всех рассматриваемых участников (табл. 1).

Добыча лития в Чили Источник: Shutterstock.com



Добыча меди в Норильске Источник: www1.ru

Таблица 1. Перечни критических металлов и элементов в документах США, ЕС, КНР и МЭА

Металл / элемент	США (USGS / DOE)	ЕС (CRMA)	КНР (НПМР)	МЭА (CMMR)
Алюминий	+	+	+	
Барит	+			
Бериллий	+			
Бор		+		+
Ванадий	+			+
Висмут	+	+		
Вольфрам	+	+	+	+
Гадолиний	+	+		
Галлий	+	+		+
Гафний	+			+
Германий	+	+		+
Гольмий	+			
Графит	+		+	+
Диспрозий	+	+		+
Европий	+			
Железо			+	
Жесть	+			+
Золото			+	
Индий	+			+
Иридий	+			+
Иттербий	+			
Иттрий	+			+
Кадмий				+
Кобальт	+	+		+
Кремний		+		+
Лантан	+			+
Литий	+	+	+	+
Лютеций	+			
Магний	+	+		+
Марганец	+	+	+	+
Медь		+	+	+
Молибден				+
Мышьяк	+			+
Неодим	+	+		+
Никель	+	+	+	+
Ниобий	+			+
Олово			+	
Осмий		+		+
Палладий	+	+		+
Плавиковый шпат	+			
Платина	+	+		+
Празеодим	+	+		+
Родий	+	+		+
Рубидий	+			
Рутений	+	+		+
Самарий	+	+		
Свинец			+	+
Селен				+
Серебро				+
Скандий	+			
Сурьма	+		+	
Тантал	+			+
Теллур	+			+

Источники: данные документов государственного стратегического планирования США, КНР, ЕС, данные МЭА

Россия, безусловно, стремится стать лидером в области разработки технологий добычи и переработки критических минералов, что вполне естественно с учетом объема отечественных запасов этого сырья. Минерально-сырьевая база страны позволяет удовлетворить потребности отечественной промышленности в большинстве металлов и минералов и вывести соответствующую продукцию на международный уровень. Тем не менее до недавнего времени в нашей стране не было сформировано общефедеральных документов государственного стратегического планирования в этой области. В 2019 году было принято распоряжение Правительства РФ № 1484-р, которое утвердило план по развитию технологий новых материалов и веществ[9]. Целью программы было снижение зависимости от импорта и повышение конкурентоспособности страны в производстве высокочистых материалов. Программа предполагала инвестиции в размере 100 млрд руб. и ставила задачу достичь производства 2000 тонн редкоземельных элементов к 2024 году, а также полностью прекратить зависимость от импорта этих металлов к 2030-му. Очевидно, что в условиях после 2022 года данный документ уже утратил актуальность и нуждается в уточнении смысловой и стратегической частей, а также в корректировке сроков в соответствии с фактической динамикой отрасли.

В конце 2023 года были внесены поправки в закон «О недрах»[10]. С учетом этих изменений правительство Российской Федерации получило право утверждать списки дефицитного сырья и продукции, полученной из него. Для таких полезных ископаемых могут быть установлены сниженные размеры стартовых платежей на аукционах по отдельным распоряжениям президента. Кроме того, изменения позволяют вводить специальные требования к участникам аукционов. Очевидно, правительство планирует перенаправить усилия в области геологоразведки и создать благоприятные условия для быстрого запуска новых проектов по добыче и переработке дефицитного сырья в РФ.



Хакасский алюминиевый завод
Источник: gazeta19.ru

В апреле 2024 года в России был утвержден список из 31 вида дефицитных твердых полезных ископаемых, включая уран, марганец, хром, титан, молибден, редкие металлы (литий, бериллий, цирконий и другие), а также графит и плавиковый шпат. Кроме того, был утвержден перечень из 310 позиций продукции с высокой добавленной стоимостью[11]. Это стало первым шагом на пути к формированию актуального и эффективного механизма государственного стратегического управления и планирования развития данной отрасли, однако данную работу необходимо активно продолжать. На текущий момент система государственного стратегического целеполагания и поддержки развития данной отрасли еще не сложилась, а актуальность такой под-

[9] Распоряжение Правительства РФ от 08.07.2019 № 1484-р «О подписании соглашений о намерении между Правительством Российской Федерации и государственными корпорациями и компаниями с государственным участием в целях развития отдельных высокотехнологичных направлений».
URL: https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=558623#9Y9ZIFVxBsIqVM6e.

[10] Закон Российской Федерации «О недрах» от 21 февраля 1992 года № 2395-I (ред. от 13.12.2024).
URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/.

[11] Распоряжение Правительства РФ от 16.04.2024 № 939-р «Об утверждении Перечня дефицитных видов твердых полезных ископаемых и Перечня продукции с высокой долей добавленной стоимости, производимой с использованием добытых дефицитных видов твердых полезных ископаемых».
URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_474962/.

Превышение спроса над добычей меди может достигнуть 7 млн тонн. Это потребует активной переработки лома и других отходов, содержащих медь, а также ускоренного ввода новых горно-обогатительных проектов по всему миру

держки в условиях ограниченности доступа российских компаний к капиталу и технологиям сегодня высока как никогда. Кроме того, в российских документах, как и в большинстве других рассмотренных перечней и документов зарубежных стран и организаций, практически не упоминаются медь и алюминий, в то время как для редкоземельных металлов и элементов стратегические государственные императивы очерчены гораздо более точно. В рамках национальной стратегии развития отрасли редкоземельных металлов (РЗМ) была разработана дорожная карта правительства «Технологии новых материалов и веществ» на период до 2030 года, включающая отдельное направление «Редкие и редкоземельные металлы». Целью стратегии является достижение объема производства РЗМ в размере 7500 тонн к 2030 году и вхождение в пятерку мировых лидеров по производству данных металлов[12]. Следует отметить, что этот объем в три раза превышает текущий уровень добычи (2500 тонн) и почти в четыре раза — объемы внутреннего потребления (около 2000 тонн). Реализовать поставленную цель будет сложно, учитывая необходимость выхода на внешние рынки и конкуренцию с доминирующим Китаем. Развитие редкоземельной промышленности в России также рассматривается в рамках более широких стратегических документов, таких как Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года[13]. Эта стратегия предусматривает меры по укреплению технологического суверенитета и импортозамещения в высокотехнологичных отраслях, включая электронику и оборонно-промышленный комплекс.

В 2025 году в России были приняты новые значимые решения и нормативные акты в сфере редкоземельных и критических металлов и минералов. Основные из них связаны с разработкой стратегий развития отрасли, установлением технологических стандартов и поручениями высшего руководства. 4 ноября 2025 года президент Владимир Путин поручил правительству утвердить план мероприятий (дорожную карту) по долгосрочному развитию добычи и производства редких и редкоземельных металлов[14]. Это решение было принято по итогам Восточного экономического форума. Минпромторг разработал проект дорожной карты и направил его на рассмотрение в заинтересованные ведомства и компании[15]. Кроме того, 15 декабря 2025 года Росстандарт утвердил информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ) «Производство редких и редкоземельных металлов» (ИТС 24–2025)[16]. Этот документ устанавливает технологические стандарты для отрасли, что способствует повышению эффективности и экологичности производства. Таким образом, в 2025 году в России были предприняты новые важные шаги в стратегическом планировании, технологическом регулировании и активизации раз-

[12] Минпромторг России. О поддержке развития производства новых материалов и веществ в Российской Федерации. URL: http://council.gov.ru/media/files/s08AM4l7I2V948CLUQpWeufPvFKeUdZp.pdf.

[13] Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_481663/d3ac08e11a8760e4015937e70dec199a6bbe7c7e/.

[14] Путин поручил утвердить дорожную карту по добыче редкоземельных металлов в РФ // Ведомости. URL: https://www.vedomosti.ru/politics/news/2025/11/04/1152101-putin-poruchil-utverdit.

[15] Минпромторг подготовил план по развитию отрасли редкоземельных металлов // РИА Новости. URL: https://ria.ru/20251110/metally-2053974564.html.

[16] Приказ Росстандарта от 15 декабря 2025 года № 2763 «Об утверждении информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям "Производство редких и редкоземельных металлов"». URL: https://rst.gov.ru:8443/file-service/file/load/1766147218384.



Добыча меди в Чили Источник: zpp-ural.ru

вития отрасли, и безусловно, эта работа должна быть продолжена.

Результаты анализа

Необходимо подчеркнуть, что именно медь играет ключевую роль не только в процессах так называемого энергетического перехода[17], но и в целом в развитии энергетической инфраструктуры, в первую очередь в новых этапах электрификации. Согласно фактическим данным и прогнозам МЭА, спрос на электроэнергию в мире на горизонте до 2030 года будет расти темпами более 4 % в год, то есть опережать рост мирового ВВП[18]. Этот прогноз выглядит вполне обоснованным, учитывая тот факт, что новая волна электрификации обусловлена, во-первых, увеличением доступности электроэнергии и ростом ее потребления в динамичных экономиках Азии. Увеличение уровня жизни населения в Китае, Индии и других странах приводит к увеличению потребления электроэнергии в коммунально-бытовом секторе, в частности на нужды кондиционирования в условиях жаркого летнего периода и для использования других бытовых электроприборов. Кроме того, существенно меняется сама структура спроса на электроэнергию. Традиционные крупные потребители, такие как энергоемкая промышленность и коммунально-бытовой сектор, дополняются новыми крупными потребителями, в первую очередь телекоммуникационным и ИТ-сектором, а также (в ряде регионов мира) электромобильным транспортом. Наиболее значимыми движущими силами этих процессов являются развитие вычислительных мощностей центров обработки данных для технологий искусственного интеллекта, развитие инфраструктуры вторичной и третичной электрификации для электромобильного транспорта и телекоммуникационных сетей поколений 5G+. В период после 2030–2035 годов новую волну аналогичных процессов

[17] Процессы энергетического перехода являются, на взгляд авторов, во многом политически мотивированными и не во всем оправданными с производственно-экономической точки зрения, но данная дискуссия лежит за рамками текущей статьи.

[18] IEA (2025). Electricity 2025. URL: https://www.iea.org/reports/electricity-2025.

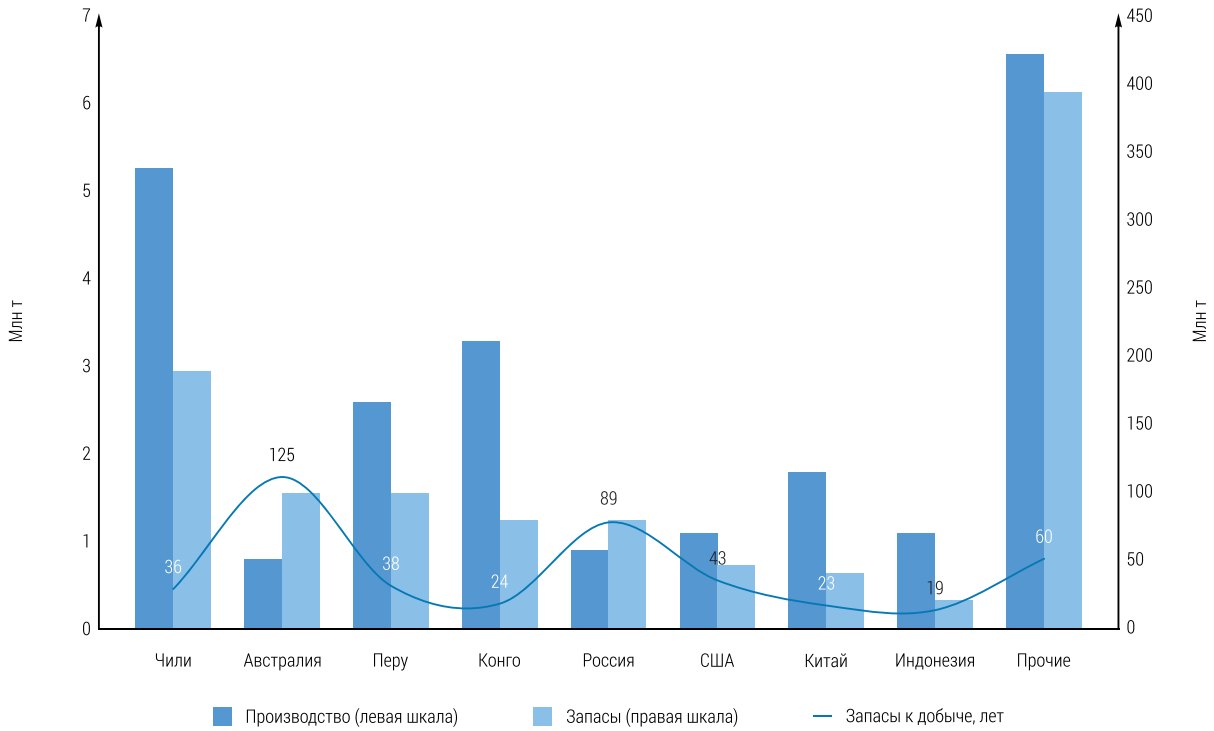


Рис. 1. Запасы и добыча крупнейших производителей меди в мире (по состоянию на начало 2025 года)

Источники: составлено по данным USGS[19], EI Statistical Review of World Energy 2025[20]

Основным вызовом для российской алюминиевой отрасли остается обеспечение сырьевой безопасности производства и поставок глинозема. Опыт последних лет показывает, что рассчитывать на надежность импорта здесь нельзя

можно будет ожидать в странах Африки по мере увеличения темпов их социально-экономического развития.

Эти процессы глубокой трансформации спроса на электроэнергию, а также бурное развитие информационно-технологического и телекоммуникационного секторов предъявляют новые, повышенные требования не только к сектору генерации электроэнергии (о чем необходимо говорить в рамках отдельного исследования), но и к сетевой инфраструктуре передачи электроэнергии. Для развития сетевой инфраструктуры в первую очередь медь, а также во многом алюминий и сталь являются ключевыми материальными ресурсами. Российская Федерация — один из ведущих мировых держателей запасов и производителей меди, страна занимает 5-е место в мире по объему доказанных запасов меди (в пересчете на чистый металл, рис. 1).

Необходимо отметить, что в странах с наиболее активной добычей, таких как Чили, Перу, Конго, США, истощение запасов наступит уже менее чем через 50 лет, а в случае Китая — менее чем через 25 лет. Прочие производители, которые более консервативно относятся к разработке либо активно занимаются геологической разведкой новых залежей (в том числе Россия), обеспечены запасами на более чем

[19] U.S. Geological Survey (2025). Mineral commodity summaries 2025. URL: https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2025.
[20] Energy Institute (2025). EI Statistical Review of World Energy 2025. URL: https://www.energyinst.org/statistical-review/about.



Гигафабрика Tesla по производству литий-ионных аккумуляторов в Китае Источник: news.cgtn.com

60-летний период при сохранении сопоставимых темпов добычи. Таким образом, благодаря высокому уровню запасов Россия сохранит одну из ведущих ролей в мировой медной индустрии в долгосрочной перспективе (табл. 2). Это особенно важный фактор в условиях того, что уже к 2030 году мир столкнется с существенным дефицитом меди. Сценарии спроса, смоделированные МЭА, демонстрируют, что превышение спроса над добычей может достигнуть 7 млн тонн, что потребует активного повторного использования и переработки лома и других отходов, содержащих медь, а также ускоренного ввода новых горно-обогатительных проектов по всему миру. При этом в 2024–2025 годах цены на медь на мировых рынках продолжали устойчиво расти и в 2025-м достигли исторических рекордов. Вероятнее всего, на ожиданиях дефицита рост продолжится в ближайшие годы[21].

Таблица 2. Добыча меди (в пересчете на чистый металл), тыс. тонн

Страна	Факт	Прогноз (STEPS)		
	2024	2030	2035	2040
Чили	5476	5505	4730	4164
Конго	2876	3578	2662	2156
Перу	2631	2425	2117	1138
Китай	1815	1962	1870	1676
Россия	1101	1194	1079	998
США	1138	1142	833	675
Прочие	7757	8465	6503	5029
Всего	22794	24271	19794	15836
Доля трех лидеров	48 %	47 %	48 %	50 %
Прогноз спроса (STEPS)	–	31348	32634	34137
Дефицит предложения		7077	12840	18301

Источник: МЭА[22]

[21] Цена на медь в 2026 году может подскочить почти на четверть // Ведомости. URL: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2025/11/01/1151611-tsena-na-med-mozhet-podskochit.

[22] IEA (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. URL: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025.



Добыча лития в Австралии Источник: Shutterstock.com

Российская минерально-сырьевая база меди имеет свои уникальные особенности по сравнению с мировой структурой. В стране преобладают медно-порфировые месторождения, а значительная часть металла добывается как попутный продукт при разработке сульфидно-никелевых залежей в Таймырской и Кольской провинциях. В России функционирует около 50 медных месторождений, разработкой которых занимаются более десятка компаний. Ключевыми производителями рафинированной меди являются три крупные компании: ГМК «Норникель» (сульфидные медно-никелевые руды), УГМК (медно-колчеданные месторождения) и «Русская медная компания» (медно-порфировые месторождения).

«Норникель» является безусловным лидером на российском рынке меди и входит в топ-15 мировых производителей. Компания разрабатывает крупные месторождения «Октябрьское» и «Талнахское» в Норильском промышленном районе, а также на Кольском полуострове. Ее доказанные и вероятные запасы оцениваются более чем в 15,5 млн тонн, оцененные и выявленные ресурсы — около 22 млн тонн, предполагаемые ресурсы — более 10 млн тонн. В 2023 году «Норникель» произвел более 425 тыс. тонн меди, в 2024-м — 433 тыс. тонн, в 2025-м — 425 тыс. тонн. Компания планирует расширение производства: ожидается запуск нового медного завода в Мончегорске по технологии «обжиг — выщелачивание — электростанция», среди проектов развития также необходимо выделить Масловское месторождение в составе Норильского рудного узла, фланги Быстринского месторождения и перспективные площади на Таймыре[23]. УГМК является вторым по значимости производителем меди в России, разрабатывая месторождения Уральской провинции. Флагман компании — Гайский ГОК, основанный в 1959 году на базе крупного медно-колчеданного месторождения (76 % запасов Оренбургской области). С 1999 года предприятие входит в состав УГМК и является основным поставщиком медного сырья. Объем производства составляет более 90 тыс. тонн меди в концентрате ежегодно, планируется увеличение мощности обогатительной фабрики до 10 млн тонн руды в год. Среди других значимых месторождений УГМК выделяются: Узельгинское (30 тыс. тонн),

[23] «Норникель» (2024). Годовой отчет 2023. URL: https://nornickel.ru/investors/reports-and-results/annual-reports/; «Норникель» (2025). Годовой отчет 2024. URL: https://nornickel.ru/investors/reports-and-results/annual-reports/.



Хакасский алюминиевый завод Источник: ZAVODFOTO.RU

Новошемурское (22 тыс. тонн), Сафьяновское (20 тыс. тонн) и Юбилейное (15,4 тыс. тонн). Общий объем производства медных катодов УГКМ составляет более 430 тыс. тонн в год. Сведения о финансовых результатах компании за период после 2022 года в открытом доступе не публикуются.

«Русская медная компания» (РМК) является впечатляющим примером развития отраслевого бизнеса. Начав без собственных добывающих активов, компания сфокусировалась на разработке медно-порфировых месторождений с относительно низким содержанием меди. Сегодня РМК — один из трех крупнейших производителей меди в России, в состав которого входят более 10 дочерних добывающих, обогатительных и производственных компаний. На долю РМК приходится более 20 % производства порфировой меди в России, а Томинский рудник стал вторым по объему добычи меди из одного месторождения (более 130 тыс. тонн). Среди проектов развития РМК — разработка Тарутинского месторождения с максимальной годовой добычей на уровне 750 тыс. тонн медной руды.

Тенденции последних лет оказывают неизбежное давление на финансово-экономические показатели медной промышленности, что не может не вызывать существенную обеспокоенность. Важно, что российская медная промышленность имеет большой потенциал для усиления своих позиций на мировом рынке благодаря трем крупным проектам развития: Малмыжскому месторождению РМК (с запасами более 8 млн тонн меди), Удоканскому месторождению (более 26 млн тонн меди) и Баимской рудной зоне (более чем 9,5 млн тонн меди). Запуск добычи и выходы на полные циклы обогащения и производства по всем трем крупнейшим проектам развития запланированы на период до 2028 года, что позволит существенно укрепить положение России на растущих мировых рынках медной продукции.

На электроэнергетику приходится около 15 % мирового потребления алюминия, и спрос в этом секторе растет самыми высокими темпами по сравнению с другими направлениями промышленности

Российская алюминиевая отрасль: основные перспективы и вызовы

В отличие от меди, крупнейшим сектором потребления алюминия является не электроэнергетика и инфраструктура, а автомобильная промышленность и строительство. Однако на электроэнергетику

приходится около 15 % мирового потребления алюминия, и спрос в этом секторе растет самыми высокими темпами по сравнению с другими секторами, что подтверждает тренды, отмеченные нами в предыдущих частях статьи.

В российской экономике алюминиевая промышленность, как правило, классифицируется как добывающая, хотя фактически она является перерабатывающей отраслью, поскольку алюминий не может быть добыт непосредственно из недр, а его производство представляет собой многоэтапный процесс сложной и дорогостоящей переработки преимущественно импортируемых ресурсов. Процесс производства и переработки алюминия включает несколько последовательных этапов: добычу руды, производство из нее глинозема, получение алюминия из глинозема и изготовление конечной продукции из алюминия. При этом в России практически отсутствуют месторождения высококачественной руды (бокситов с высоким содержанием полезного компонента), а новые глиноземные производства не создавались с 1970 года. Потребности российской алюминиевой отрасли в глиноземе на 65 % удовлетворяются за счет импортных поставок, что требует валютных затрат на мировом рынке и нивелирует потенциальные выгоды от экспорта при ослаблении рубля.

Помимо бокситов, источником глинозема могут быть нефелиновые руды — алюмосиликаты натрия и калия. Крупнейшие запасы нефелиновых руд сосредоточены на Кольском полуострове в месторождениях апатит-нефелиновых руд Хибинской группы. Однако главным компонентом этих руд является фосфор, а содержание оксидов алюминия в них низкое. С учетом имеющихся возможностей и технологий обогащения пока не удается получать из данных запасов руды глинозем металлургического качества, пригодный для дальнейшего производства алюминия. Нефелиновые руды, позволяющие получать глинозем металлургического качества, разрабатываются в Кемеровской области, однако запасы там невелики, их себестоимость выше, чем себестоимость переработки бокситов, и они не могут обеспечить

Колмозерское месторождение лития

Источник: 51.ru



[24] Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvenny_doklad_o_sostoyani_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/.

все потребности в сырье российской алюминиевой промышленности[24].

Российский производитель алюминия РУСАЛ, являющийся одним из крупнейших в мире, включает 29 производственных объектов с общей мощностью около 5,6 млн тонн глинозема и 4,5 млн тонн алюминия в год. В отрасли функционирует около 400 предприятий по переработке алюминия, поставляющих широкий ассортимент продукции для автомобильной, строительной, телекоммуникационной, медицинской и пищевой промышленности. С 1980-х годов в России впервые были созданы новые алюминиевые производства с нуля: Хакасский алюминиевый завод (2006 год), Богучанский алюминиевый завод (2015 год) и Тайшетский алюминиевый завод (2021 год) с общей мощностью около 1,3 млн тонн.

Российская алюминиевая промышленность во многом ориентирована на экспорт, при этом рынок СНГ, где доминирует РФ, занимает около трети в отечественных экспортных поставках, что обусловлено низким уровнем развития внутренней переработки. Алюминий является биржевым товаром, что исключает возможность управления ценами со стороны поставщиков. В настоящее время российская алюминиевая отрасль находится под беспрецедентным давлением со стороны недружественных стран и внешних факторов, что ставит ее на грань острого кризиса с тяжелыми долгосрочными последствиями. До 2022 года отрасль была полностью обеспечена собственным глиноземом за счет зарубежных производств, в которых участвовали российские компании, однако в 2022 году действия недружественных стран существенно подорвали сырьевую базу отрасли: были прекращены поставки глинозема с предприятий в Николаеве, Австралии и частично в Ирландии, а также перекрыты каналы поставок от многих традиционных поставщиков. В результате отрасль потеряла более трети необходимого объема глинозема и была вынуждена организовать альтернативные поставки из стран Азии, что привело к существенным финансовым потерям, поскольку цены на глинозем в Азии в среднем на 25 % выше, чем на ранее доступных рынках. Многие традиционные рынки сбыта для России были утрачены, а работа на других существенно осложнена.

США, Великобритания и Австралия ввели заградительные пошлины на российский алюминий (270, 35 и 35 % соответственно), в Евросоюзе ключевые переработчики прибегли к практике «самосанкций», отказавшись от российского алюминия, а в 12-й пакет санкций ЕС были включены алюминиевые изделия (проволока, фольга, трубки и трубы). Из-за стагнации ряда западных экономик и замедления роста в Азии (что привело к профициту алюминия на мировых рынках) значительно обострилась конкуренция по условиям поставки металла. В течение 2023 календарного года зафиксировано существенное снижение котировок алюминия на Лондонской бирже металлов, где средневзвешенная цена снизилась на 455 долларов США за тонну относительно начальных показателей, до уровня 2252 долларов США за тонну. При этом минимальный ценовой показатель был зафиксирован в августе 2023 года на отметке 2069 долларов США за тонну. В течение 2024–2025 годов цены на алюминий оставались низкими, региональные премии к ценам также находятся на многолетних минимумах. Тенденция к росту цен на алюминий наметилась только в начале 2026 года, во многом на фоне кризиса, вызванного событиями на Ближнем Востоке.

В мировой алюминиевой промышленности наблюдается устойчивый рост себестоимости производства алюминия и получения глинозема, обусловленный преимущественно

Хакасский алюминиевый завод
Источник: ZAVODFOTO.RU





Богучанский алюминиевый завод Источник: npcmgd.com

не контролируемыми отраслью факторами, включающими увеличение цен на сырье и материалы, в том числе на более дорогой китайский глинозем, а также рост стоимости электроэнергии. Российские предприятия характеризуются существенной зависимостью от иностранных поставщиков сырья, доля закупок у которых составляет 55–60 %, при этом практически все виды сырья и материалов для обеспечения производства демонстрируют опережающий рост цен: для анодов — 90 %, нефтяного кокса — 89 %, пека — 93 %, прокаленного кокса — 68 %. Значительное удорожание электроэнергии, составляющей 24–28 % себестоимости, обусловленное ростом цен на природный газ и в некоторых регионах на уголь, за период с 2020 по 2025 год оценивается в 50 %. Отрасль также сталкивается с постоянным увеличением объема необходимых инвестиций в масштабные проекты экологической модернизации производств и программу обеспечения сырьевой безопасности, в частности в проект РУСАЛа по строительству нового глиноземного завода в Ленинградской области (около 400 млрд руб.) и экологическую модернизацию предприятий в рамках президентской национальной программы «Чистый воздух».

Даже до введения пошлин отрасль характеризовалась низкой доходностью с показателем по итогам 2023 года около 6 %. Ряд производств на фоне низких цен на алюминий могут стать убыточными, в том числе Кандалакшский, Волгоградский и Новокузнецкий алюминиевые заводы с издержками выше средних по отрасли (суммарной мощностью около 500 тыс. тонн). При этом уровень долговой нагрузки в отрасли достиг в последние годы высоких значений, а операционный денежный поток не покрывает капитальные затраты и проценты по существующим кредитам, что приводит к росту чистого долга и необходимости в дополнительном кредитовании[25]. В 2024 году показатели операционной эффективности отрасли улучшились, но продолжавшиеся перебои в поставках бокситов и импортного глинозема способствовали росту цен на это сырье, в то время как цены на алюминий оставались на уровнях 2023 года, а значит, существенное давление на рентабельность производства сохранялось. Несмотря на приобретение доли в китайском производителе глинозема в 2024 году, РУСАЛ был вынужден объявить о сокращении производственной и инвестиционной программ[26]. Таким образом, в текущих экономических условиях, при столь высокой стоимости капитала, привлечение дополнительного финансирования в отрасль крайне осложнено. Соотношение чистого долга к EBITDA РУСАЛа остается высоким и по итогам 2025 года. Таким образом, без своевремен-

[25] РУСАЛ (2024). Годовой отчет за 2023 год. URL: https://rusal.ru/upload/iblock/a24/3obdigf1a9w9rbkhoavc65h2d494wdnp/Rusal_Annual_Report_2023_RU.pdf.

[26] РУСАЛ (2025). Годовой отчет за 2024 год. URL: https://rusal.ru/upload/iblock/37d/hvwjjuakftp7usne7qwtaw8gt36wdqda/RUSAL_AR_2024_RU_r101.pdf.



Месторождения лития, соды и поташа в Аргентине

ного принятия мер по поддержке и нормализации положения в индустрии сложившаяся ситуация может привести к мультипликации кризисных рисков в российской алюминиевой отрасли.

Основным вызовом для российской алюминиевой отрасли остается обеспечение сырьевой безопасности — производства и поставок глинозема. Опыт последних лет показывает, что рассчитывать на надежность импорта стратегически значимого сырья нельзя и жизненно необходимо формировать внутри России производственную цепочку, основанную на собственном сырье. Это сложный технологический вызов, требующий создания и развития технологий по переработке нефелиновых руд Кольского полуострова, которые на сегодняшний день не могут использоваться алюминиевой промышленностью.

Дискуссия, выводы, предложения

Управление стратегическим сырьем играет ключевую роль в будущем устойчивом развитии России и формировании самодостаточного промышленного комплекса. Как мы отметили, большинство крупных стран и национальных объединений (США, ЕС, Китай) в достаточно глубокой степени проработали вопросы классификации, а также управления стратегическим развитием обеспечения национальных экономик критическими металлами и элементами. Очевидно, что в текущих условиях формирующегося многополярного миропорядка государства укрепляют свои внутренние экономические и политические структуры, меняют приоритеты в использовании сырья с целью снизить уязвимость к внешнему вмешательству. В Российской Федерации данная работа также ведется, однако массив документов государственного стратегического планирования в этой области пока еще проработан недостаточно.

В части терминологии мы видим целесообразным уйти от калькирования иностранного термина «критические металлы и минералы», поскольку данный термин и его определение не отражают, на наш взгляд, основную суть проблематики, связанной с медью, алюминием, редкими и редкоземельными металлами, а также рядом других металлов и элементов. В современных условиях главным фактором является их незаменимость, высокая значимость для создания и дальнейшего развития современной электроэнергетической, информационно-технологической и коммуникационной инфраструктуры. По этой причине мы предлагаем ввести в обо-



Источник: Shutterstock.com

рот и закрепить термин «инфраструктурно значимые металлы и минералы».

Данный термин может быть применен в разрабатываемых в настоящее время и будущих документах государственного стратегического планирования по развитию горнодобывающей и металлургической отрасли. Определение Перечня дефицитных видов твердых полезных ископаемых в 2023–2024 годах стало первым и важным шагом в разработке комплекса соответствующих документов. В качестве следующих шагов в данной области мы видим проведение аудита запасов по каждому из элементов, проработку производственно-стоимостных цепочек по каждому из элементов перечня для условий российской экономики, определение слабых звеньев в этих цепочках и формирование отраслевых стратегий развития соответствующих производств с определением конкретных мер государственной поддержки для развития проектов по добыче, переработке и использованию данных элементов. Подобная работа была успешно проделана Китаем в течение прошедших 15–20 лет и принесла колоссальные результаты, сделав КНР мировым лидером в области РМ и РЗМ[27]. Кроме того, в настоящее время аналогичную деятельность активно ведут американские органы государственного стратегического управления.

Отдельно необходимо остановиться на медной и алюминиевой промышленности России. Значимость именно этих двух металлов в условиях новых волн электрификации и противоречивых, но продолжающихся процессов энергетического перехода продолжает расти. Отраслевой консенсус заключается в том, что на горизонте 2030–2035 годов мир столкнется с дефицитом меди и алюминия в объеме до 8–10 % от доступного предложения по причине бурного роста масштабов и сложности электросетей, региональной электромобилизации и дальнейшего регионального развития ВИЭ. Эта пока еще свободная ниша будет премиальной на рынке и, с учетом доступности ресурсов и налаженного производственного цикла в части меди, может быть эффективно занята российскими компаниями.

Развитие российской алюминиевой промышленности требует решения двух ключевых проблем: доступа к большим объемам сырья с приемлемым уровнем затрат и сокращения затрат на электроэнергию для российской алюминиевой от-

[27] «Китаю нужно – он субсидирует, тебе не нужно – ты не субсидируешь, а значит, не играешь на этом рынке» // Kept Mustread. URL: https://mustread.kept.ru/interviews/industry/metallurgiya/kitayu-nuzhno-on-subsidiruet-tebe-ne-nuzhno-ty-ne-subsidiruesh-a-znachit-ne-igraesh-na-etom-rynke/.

расли. Ресурсная проблема может быть решена различными способами. Первый — за счет внутренних ресурсов: обнаружения запасов бокситов (геологически маловероятно) или разработки новых глиноземных залежей на территории России (возможно, но экономическая эффективность таких проектов находится на грани рентабельности). Отдельным вектором данной работы должно стать создание технологий эффективного использования нефелиновых руд Арктического региона, в первую очередь Кольского полуострова, для использования в алюминиевой промышленности. Второй способ — поиск и разработка запасов бокситов в дружественных странах и регионах мира, в первую очередь в Африке, которая характеризуется наличием таких ресурсов, а также достаточно доступной рабочей силой. На этом пути предстоит решить множество проблем: от конкуренции с дружественными (Китай, Индия, Центральная Азия) и недружественными странами до обеспечения безопасности производственных объектов и логистики сырья. Потребуется создание новых, полностью независимых от внешних участников собственных производственно-логистических цепочек. Это сложная стратегическая задача, которая может быть решена только при проведении проактивной государственной политики и при весомой государственной поддержке, прежде всего в информационно-политическом и геополитическом пространстве. Начинать эти процессы следует с ближайших к России (и богатых ресурсами и дешевой рабочей силой) государств Центральной Азии, а также дружественных стран Африки. Но даже успешное решение этой задачи не гарантирует абсолютной надежности и устойчивости таких поставок в долгосрочной перспективе из-за высоких рисков геополитической нестабильности. По этой причине именно разработка горнорудных запасов металлов Арктической зоны является единственным стратегически верным решением данной проблемы.

Безусловно, потребности отечественной электроэнергетики и электросетей в меди и алюминии также будут расти, и их необходимо будет обеспечить. В России (и на территории всех стран бывшего СССР) сохранилась самая протяженная и разветвленная энергосистема планеты, однако средний возраст генерирующих и передающих мощностей приближается к 40 годам, а в ряде регионов энергосистема подходит к пределу своих возможностей, с трудом справляясь с ростом спроса и передающей нагрузки. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики[28], Схема и Программа развития электроэнергетики[29], равно как и новая Энергостратегия-2050[30], дают лишь частичные ответы на эти вызовы.

В современных экономических условиях представляется целесообразным осуществить интеграцию отечественного электроэнергетического комплекса, машиностроительной отрасли и горнодобывающей промышленности в рамках перспективного национального проекта, направленного на модернизацию электроэнергетической инфраструктуры с использованием оборудования отечественного производства. Предлагаемый национальный проект может быть обозначен как ГОЭЛРО 2.0, что отражает историческую преемственность с первым планом постреволюционного экономического развития, в котором приоритетным направлением была выбрана ускоренная электрификация промышленных отраслей. С учетом процессов евразийской интеграции и целей по формированию общих энергетических рынков Евразийского экономического союза, данный проект может также охватить периметр стран ЕАЭС и Центральной Азии, формируя вклад в континентальную энергостратегию России. Следует отметить, что именно успешная имплементация плана ГОЭЛРО в период 1920–1930-х годов создала фундаментальную основу технического развития СССР, достижения которого сохраняют свою актуальность в настоящее время и до сих пор определяют технологический потенциал современной российской промышленности.

[28] Правительство утвердило Генеральную схему размещения объектов электроэнергетики до 2042 года // Системный оператор Единой энергетической системы. URL: https://www.so-ups.ru/news/energy-news/energy-news-view/news/26511/.

[29] Приказ Минэнерго России от 29.11.2024 № 2328 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 годы». Доступ из справочно-правовой системы.

[30] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 года № 908-р. URL: http://government.ru/docs/54754/.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. *Череповицын А. Е., Иллерицкий Н. И. Российские ресурсы стратегических металлов как фактор управления мировой энергетической повесткой // Научные труды Вольного экономического общества России. 2024. № 249(5). С. 180–208. http://doi.org/10.38197/2072-2060-2024-249-5-180-208.*
2. *Bridge G., & Faigen, E. (2022). Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains. Energy Research & Social Science, 89, 102659 https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102659.*
3. *Barandiarán J. (2019). Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia. World Development, 113, 381–391. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.019.*
4. *Cheilas P., et al. (2025). Rare earth elements and the US renewable economy: A causality exploration between critical materials and clean energy. Resources Policy, 101, 105491.*
5. *Rachid S., Taha Y., & Benzaazoua M. (2023). Environmental evaluation of metals and minerals production based on a life cycle assessment approach: A systematic review. Minerals Engineering, 198, 108076. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108076.*
6. *Carr-Wilson S., Pattanayak S. K., & Weinthal E. (2024). Critical mineral mining in the energy transition: A systematic review of environmental, social, and governance risks and opportunities. Energy Research & Social Science, 116, 103672. https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103672.*
7. *Depraiter L., & Goutte S. (2023). The role and challenges of rare earths in the energy transition. Resources Policy, 86, 104137.*
8. *Wolters L., & Brusselaers J. (2024). The energy transition paradox: How lithium extraction puts pressure on environment, society, and politics. The Extractive Industries and Society, 19, 101498. https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101498.*
9. *Overland I. (2021). Central Asia is a missing link in analyses of critical materials for the global clean energy transition. One Earth, 4(12), 1678–1692. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.11.012.*
10. *Middleton A. Geopolitics of Rare Earth Elements (REE) in the Arctic: Study of evolving strategic, scholar, and media discourse. Polar Record. 2026;62:e3. https://doi.org/10.1017/S0032247425100193.*
11. *Anas M., Zhang W., Alsabhan T. H., et al. Advancing energy-related climate mitigation technologies in arctic region: the impact of green finance and critical mineral resources. Climatic Change 178, 184 (2025). https://doi.org/10.1007/s10584-025-04031-1.*
12. *Islam M. M. (2026). Russian and Chinese rare earth elements supply and US energy transition: Governance vs. geo-political and geo-economic tensions. Chinese Political Science Review. https://doi.org/10.1007/s41111-025-00328-9.*
13. *Chen W. Q., et al. (2024). Interdependence in rare earth element supply between China and the United States helps stabilize global supply chains. One Earth, 7(2), 242–252.*
14. *Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л., Аникина Е. Ю., Савчук Ю. С., Прокофьев В. Ю., Соловьев С. Г., Аристов В. В., Гореликова Н. В., Викентьева О. В., Мурашов К. Ю., Сидорова Н. В. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов востока России: закономерности размещения и условия формирования; фундаментальные основы для разработки технологии прогноза и поисков // Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения. Москва: ИГЕМ РАН, 2020. С. 11–42.*
15. *Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В. и др. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. № 57(6). С. 479–500.*
16. *Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. № 58(2). С. 97–122. http://doi.org/10.7868/S0016777016020027.*
17. *Пашкевич Н. В., Хлопонина В. С., Поздняков Н. А., Аверичева А. А. Анализ проблем воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных стратегических полезных ископаемых // Записки Горного института. 2024. № 270. С. 1004–1023.*
18. *Mochalova L. A., & Podkorytov V. N. (2025). Current trends and prospects in Russia's rare earth metals industry. R-Economy, 11(3), 296–312. http://doi.org/10.15826/recon.2025.11.3.016.*
19. *Cherepovitsyn A., & Solovyova V. (2022). Prospects for the development of the Russian rare-earth metal industry in view of the global energy transition. A review. Energies, 15, 387. https://doi.org/10.3390/en15010387.*
20. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2008). Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12034.*

УДК 620.91 DOI 10.46920/2409-5516_2026_6221_66 EDN SNBWSB

Транспортировка водорода в глобальных цепочках поставок: роль жидкого водорода

Hydrogen Transportation in Global Supply Chains: The Role of Liquid Hydrogen

Юлия ЛЯШИК
Аналитик ООО Н2 Инвест
Y.lyashik@h2invest.ru

Yulia Lyashik
Analyst, H2 Invest LLC
Y.lyashik@h2invest.ru

Виктор МЕДВЕДЕВ
Генеральный директор ООО Н2 Инвест
V.medvedev@h2invest.ru

Victor Medvedev
CEO, H2 Invest LLC
V.medvedev@h2invest.ru



Жидкий водород Источник: Shutterstock.com

Аннотация. Спрос на низкоуглеродный водород продолжает расти, при этом конкурентоспособные зоны его производства во многих случаях географически удалены от центров потребления. Это повышает значимость надежной логистики на фоне совокупности вызовов, в том числе инфраструктурного дефицита, высокой капиталоемкости терминалов и трубопроводных проектов, операционных ограничений на участках первой и последней мили (от производственной площадки до доставки потребителю) и тенденции перехода к энергоемким формам водорода в тяжелом и дальнемагистральном транспорте.
Сопоставление различных подходов к транспортировке водорода подтверждает отсутствие универсального решения: выбор зависит от масштаба спроса, требований к конечному продукту, наличия инфраструктуры, сроков развертывания и пр. В условиях формирующегося рынка и распределенного спроса, где важна поставка именно чистой формы водорода, логистика жидкого водорода в танк-контейнерах способна обеспечить высокую адаптивность: модульное развертывание, обеспечение сквозной логистики с использованием нескольких видов транспорта и доставку в резервуаре без сброса паров в атмосферу на всем транспортном плече, закрывая коридор поставки целиком.
В рамках сопоставимых границ системы сценарного расчетного кейса полученные оценки указывают, что транспортировка жидкого водорода в танк-контейнерах обеспечивает более низкую стоимость доставки при заданных условиях относительно цепочки поставок аммиака, прежде всего за счет отсутствия энергоемкой стадии реконверсии на стороне потребления и более эффективного распределения.
Ключевые слова: водород, транспортировка, аммиак, газопровод, контейнер

Demand for low-emission hydrogen is on the rise, yet competitive production zones are often geographically detached from demand centres. This spatial mismatch underscores the significance of reliable logistics amid multiple challenges, including infrastructure deficits, the high capital intensity of terminal and pipeline projects, operational constraints on the first and last mile – from the production site to consumer delivery – and the trend towards transitioning to energy-dense forms of hydrogen in heavy-duty and long-haul transport.
A comparison of various hydrogen transport approaches uncovers the lack of a one-size-fits-all solution: the choice depends on the scale of demand, final product requirements, infrastructure availability, deployment timelines, and other factors. In the context of a nascent market and distributed demand, where the supply of pure hydrogen is essential, liquid hydrogen logistics in ISO tank containers can offer high adaptability. This includes modular deployment, end-to-end logistics using intermodal transport, and delivery in the tank without venting vapours into the atmosphere along the entire transport leg, covering the supply corridor entirely.
On the 2025–2035 horizon, a cross-border trade system is emerging in the face of a deficit of available infrastructure, which adds value to scalable solutions that can be rapidly rolled out without major initial investments.
Within comparable system boundaries of the estimated scenario case, findings show that transporting liquefied hydrogen (LH_2) in ISO tank containers ensures a lower delivery cost under the assumed conditions relative to the ammonia supply chain. This is primarily due to the absence of an energy-intensive reconversion stage on the consumption side and more efficient distribution.
Keywords: hydrogen, transportation, ammonia, gas pipeline, container

Введение

Несмотря на сохраняющиеся барьеры и турбулентность, водородный сектор продолжает развиваться, что отражает важность водорода в поддержании стремления государств к достижению климатической нейтральности, энергетической безопасности и конкурентоспособности промышленности. По данным IEA [1], спрос на водород демонстрирует устойчивую восходящую динамику: в 2024 году достиг порядка 100 млн тонн в год, в 2025-м, по оценкам, превысит 100 млн тонн в год. При этом низкоуглеродное производство по портфелю проектов, достигших инвестиционного решения (FID) либо находящихся в строительстве, оценивается к 2030 году в 4,2 млн тонн водорода в год, при учете реалистичного потенциала до 10 млн тонн в год, а совокупный потенциал объявленных инициатив — порядка 37 млн тонн водорода в год. Ожидается, что ключевыми драйверами останутся промышленность и нефтепереработка, а роль транспортного сектора будет постепенно усиливаться, занимая значительную долю спроса в долгосрочной перспективе [2].

Эти тенденции подчеркивают, что глобальная трансформация энергетических систем потребует масштабного импорта и экспорта низкоуглеродного[1] водорода, а значит, и создания надежной и гибкой логистической инфраструктуры. В ключевых стратегических документах Европейского союза, включая Водородную стратегию ЕС и инициативу REPowerEU, транспортировка водорода и создание соответствующей инфраструктуры обозначены как критически важные элементы становления водородной экономики. Начиная с 2025 года ожидается последовательное развитие трансграничных маршрутов поставок, сети водородных заправочных станций (ВЗС) и частичное перепрофилирование существующей газотранспортной системы под водород [3]. В 2024–2025 годах это подкреплено принятием нормативной базы и началом реализации таких проектов. Отдельно внимание уделяется созданию крупных «водородных коридоров» импорта: через Средиземноморье, район Северного моря и восточноевропейское направление [4]. При



Водородная промышленность
Источник: sq-innovation.com

этом, как подчеркивается в позиционном документе H2Global [5], необходимо заранее формировать всю цепочку — от трубопроводов и портов до хранилищ, — чтобы избежать инфраструктурных «бутылочных горлышек» и рассинхронизации спроса и предложения во времени и пространстве.

Эта политическая ориентация отражает более широкую структурную особенность формирующегося водородного рынка: регионы с благоприятными условиями для дешевого производства низкоуглеродного водорода — Ближний Восток, Северная Африка, Австралия, Латинская Америка, — как правило, территориально удалены от индустриальных стран с высоким спросом, таких как Германия, Япония, Южная Корея. Эти страны сталкиваются с ограничениями локального производства из-за высокой стоимости электроэнергии, дефицита земельных и водных ресурсов и перегружен-

[1] В настоящем исследовании, исходя из принципа технологической нейтральности, под «низкоуглеродным водородом» понимаются любые технологические маршруты с низкой удельной интенсивностью выбросов по жизненному циклу, такие как электролиз на основе ВИЭ, паровая конверсия метана с применением CCUS и др.

ности электросетей. Например, по оценке Roland Berger [6], только переход европейской сталелитейной промышленности на водород потребует порядка 60 ГВт электролизных мощностей и 120–180 ГВт мощностей ВИЭ, что сопоставимо с установленной мощностью всех действующих ветряных электростанций в Германии. При этом расширение высоковольтных электросетей, необходимых для транспортировки возобновляемой энергии, остается сложным и затяжным процессом: многие текущие проекты сталкиваются с задержками, ограничивая темпы развертывания ВИЭ и, соответственно, наращивания производства низкоуглеродного водорода внутри страны. В отличие от электроэнергии, водород может производиться там, где доступна низкоуглеродная энергия по низкой цене, и перевозиться в другие регионы с высоким спросом, что делает его гибким элементом глобального энергобаланса. Это в свою очередь потребует создания новых надежных логистических цепочек и международных маршрутов поставок.

В итоге значительная часть низкоуглеродного водорода в будущем будет производиться вдали от ключевых рынков потребления, что формирует устойчивый инфраструктурный вызов: необходимость

Ключевым вызовом развития водородной логистики остается проблема первой и последней мили — доставки водорода от производственных установок до конечных потребителей

выстраивания гибких цепочек поставок для безопасной и экономически эффективной доставки водорода на дальние расстояния. При этом инфраструктура транспортировки водорода остается наименее зрелым звеном всей цепочки создания стоимости и одним из ключевых барьеров масштабирования. По состоянию на 2024 год фиксировался инвестиционный разрыв по отношению к потребностям до 2030 года в рамках сценария достижения углеродной нейтральности. Хотя в 2025 году наблюдается увеличение вложений в водородную инфраструктуру примерно на 130 % г/г (совокупный объем инвестицион-



Комплекс Linde по производству и сжижению водорода в Лойне (Германия)

Источник: membrane-separation.com

ного портфеля оценивается примерно в 695 млрд долл.), общий разрыв потребностей остается неустраненным, и дальнейшая динамика будет определяться закреплением спроса и формированием якорных производственно-сбытовых узлов [7, 8].

Одним из ключевых вызовов развития трансграничной водородной логистики остается проблема так называемой первой и последней мили — доставки водорода от производственных установок до экспортных хабов и далее от импортных терминалов до конечных потребителей. Даже при наличии водородных коридоров и магистральных трубопроводов именно эти участки требуют гибких и адаптивных логистических решений, способных работать в условиях разнородной инфраструктуры и переменного спроса. Трубопроводная логистика изначально ориентирована на фиксированные маршруты, охватывающие преимущественно индустриальные кластеры и густонаселенные регионы, тогда как распределенные потребители — транспортные узлы, морские порты, удаленные сбытовые контрагенты — могут остаться вне зоны покрытия. Как отмечается в ряде аналитических исследований [9, 10, 11], именно на начальных и конечных этапах транспортировки возникают дополнительные затраты, потери и технологические сложности, особенно при использовании химических носителей, требующих реконверсии. По данным McKinsey Hydrogen Insights [12], для децентрализованных потребителей распределение на этапе последней мили может составлять более 50 % от полной стоимости водорода. Это подчеркивает необходимость развития распределенной мультимодальной логистики, способной сочетать морские, железнодорожные и автомобильные перевозки и адаптироваться к географической разобщенности производственных хабов и потребительских кластеров.

Наряду с этим водородная логистика сталкивается с крайне высокой капиталоемкостью инфраструктурных решений. Согласно оценкам IEA [1], к 2035 году совокупная протяженность объявленных проектов водородных трубопроводов, включая новые и перепрофилированные

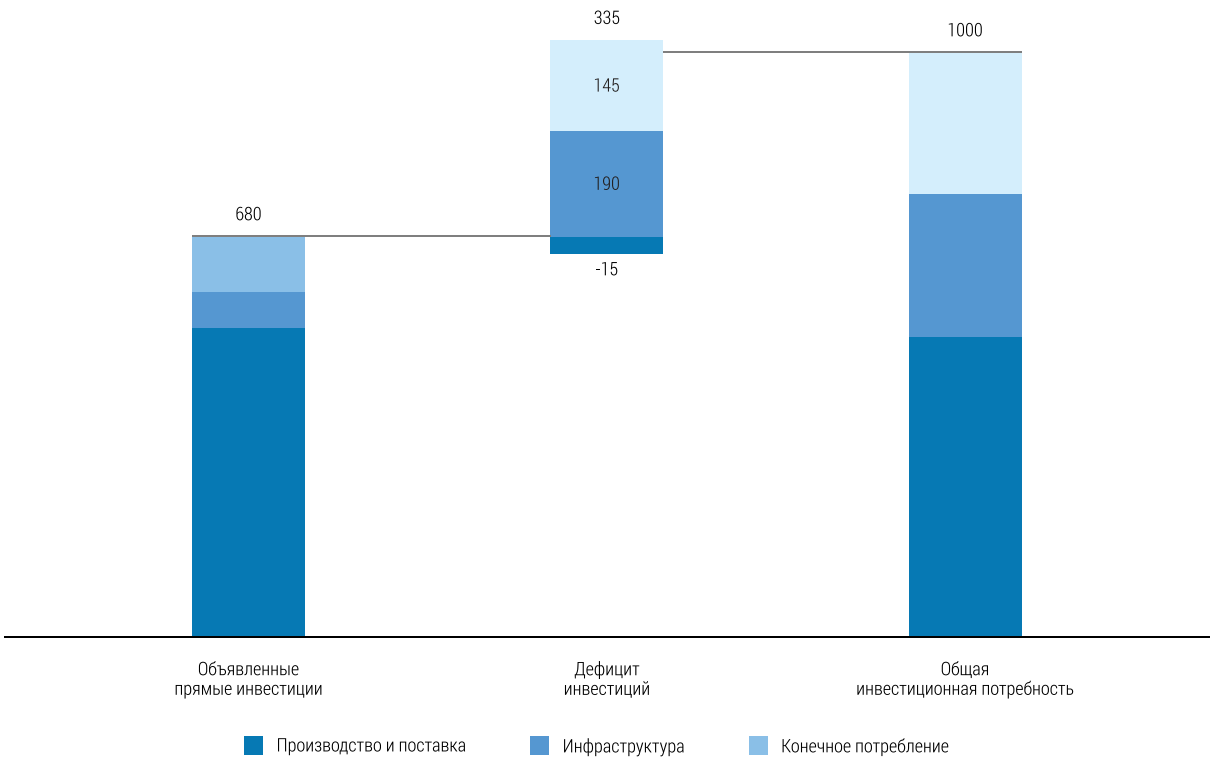


Рис.1. Объявленные и необходимые прямые инвестиции в водородную отрасль до 2030 года, млрд долл. США

Источник: Hydrogen Council, McKinsey & Company, «Hydrogen Insights 2024», 2024



Омский НПЗ, установка по производству водорода Источник: Газпром нефть

(около 1/3 от общей длины), может достичь порядка 37 тыс. км. Однако на сегодня менее 6 % этой длины достигли стадии FID, что может свидетельствовать о высоком уровне проектных, регуляторных или экономических неопределенностей. Кроме того, на основе анонсированных инициатив до конца десятилетия могут быть реализованы планы по строительству около 120 новых портовых терминалов и инфраструктуры для водорода и его производных на разных континентах, при этом большая часть из них — это новые терминалы для экспорта аммиака (NH_3). Эти данные указывают на то, что темпы развития транспортной инфраструктуры могут отставать от роста производства и спроса на водород, что создает риск формирования узких мест в логистике. Высокая капиталоемкость и длительный цикл реализации проектов, включая трубопроводы и портовые терминалы, задают долгий инвестиционный горизонт и требуют заблаговременного планирования.

Ускоренное развитие глобальной водородной экономики может быть достигнуто только при одновременном расширении трансконтинентальных производственных и транспортных цепочек

В дополнение к инфраструктурным и логистическим вызовам в последние годы в транспортном секторе прослеживается отчетливая технологическая тенденция смещения фокуса от использования газообразного водорода (CGH_2) к более энергоемким и компактным формам хранения, в частности сжиженному водороду (LH_2). Эта динамика наиболее заметна в сегменте тяжелого и дальнемагистрального транспорта, для которого критически важны высокая плотность энергии, сокращение времени заправки и достижение значительной автономности, превышающей 1000 км. По данным IEA [1], тяжелые грузовые автомобили остаются единственным быстрорастущим сегментом рынка FCEV в дорожном транспорте. Крупные производители, такие как Daimler Truck, FAW и Foton Motor, продвигают решения на основе LH_2 [13-15]. Параллельно прорабатываются гибридные

подходы к использованию водорода в составе бортовых систем транспортных средств, в том числе концепция криосжатого водорода (CcH_2), сочетающая криогенную температуру с повышенным давлением. Таким образом, на фоне растущего спроса на водород в транспортном секторе и ограничений традиционных решений сжиженный водород постепенно закрепляется в качестве перспективного энергоносителя для указанных сегментов транспорта, тогда как CcH_2 рассматривается как перспективная конфигурация, находящаяся в стадии технологической проработки.

Все вышесказанное формирует устойчивый запрос на универсальные, масштабируемые и адаптивные решения, способные обеспечить надежные поставки водорода без необходимости немедленного развертывания капиталоемкой инфраструктуры. С учетом высокой степени неопределенности в темпах развития магистральных трубопроводов, терминалов реконверсии химических носителей и нормативного оформления подземных хранилищ, особую актуальность приобретают решения, которые можно внедрять модульно, в сжатые сроки и независимо от степени готовности отдельных звеньев цепочки. Одним из таких инструментов выступает технология транспортировки сжиженного водорода в специализированных танк-контейнерах, адаптированных для мультимодальных маршрутов и способных органично интегрироваться в существующие транспортные системы.



Установка по производству водорода, «Ярославнефтеоргсинтез»
Источник: yanos.slavneft.ru

Цель настоящего исследования заключается в комплексном анализе потенциала контейнерной модели транспортировки сжиженного водорода как масштабируемого и гибкого логистического решения, способного отвечать на инфраструктурные и технологические вызовы развивающегося глобального водородного рынка. При этом контейнерная логистика рассматривается не как альтернатива, а как важный элемент, дополняющий другие крупнотоннажные подходы, с акцентом на выявление условий,



Первая демонстрационная установка по производство водорода на АЭС «Найн-Майл-Пойнт», США
Источник: atomic-energy.ru

при которых подобные решения могут обеспечивать конкурентоспособность по совокупным затратам, срокам развертывания и уровню операционной гибкости.

Карта технологий водородной логистики: сравнение подходов

Современная водородная логистика базируется преимущественно на локальных моделях, в которых водород производится и потребляется в пределах одного промышленного узла или региона. В таких сценариях доставка осуществляется преимущественно в сжатом или сжиженном виде наземным транспортом. Эти технологии, используемые на протяжении десятилетий, доказали свою эффективность в условиях ограниченных объемов и кратких расстояний и сохранят свою актуальность в нишевых применениях и распределенных сценариях.

Однако прогнозируемый рост спроса на водород и формирование трансграничной торговли требуют выхода за пределы локальных решений. Переход к крупнотоннажным, межрегиональным и межконтинентальным маршрутам доставки водорода ставит на первый план вопрос выбора наиболее подходящих логистических решений, способных обеспечить безопасность, экономическую эффективность и масштабируемость при перемещении больших объемов на дальние расстояния. При этом ключевой особенностью водородной логистики остается наличие нескольких технологически обоснованных подходов, каждый из которых имеет свои преимущества, ограничения и области применения в зависимости от конфигурации цепочки поставок, удаленности рынков, условий производства, требований к чистоте и форме водорода. Тем не менее ускоренное развитие глобальной водородной экономики может быть достигнуто



Цистерны с хранением водорода
Источник: capcomespace.net



Резервуары для хранения водорода
Источник: Shutterstock.com

только при одновременном расширении трансконтинентальных производственных и транспортных цепочек, а также региональных распределительных сетей, адаптированных к местным условиям.

Транспортировка газообразного водорода по трубопроводам

Транспортировка водорода в газообразной форме по трубопроводам представляет собой одно из наиболее зрелых и апробированных решений благодаря опыту применения в промышленных целях. Однако производительность таких трубопроводов остается недостаточной для масштабного использования. Рассматривается развитие трубопроводной транспортировки водорода путем как строительства специализированных водородных трубопроводов, так и переоборудования магистралей, изначально предназначенных для природного газа, что может создать возможности сокращения капитальных затрат и сроков строительства [16, 17].

К ключевым преимуществам трубопроводного транспорта относят низкие операционные издержки, длительный срок службы и способность обеспечивать стабильные и непрерывные поставки водорода. Для коротких и средних расстояний трубопроводная логистика газообразного водорода может демонстрировать высокую энергоэффективность, поскольку энергозатраты требуются лишь на компрессию и предварительную очистку [18]. Кроме того, трубопроводы могут выполнять дополнительную функцию буферного хранения за счет адаптации давления к колебанию объемов, что особенно важно для крупных потребителей [19].

Вместе с тем трубопроводная логистика водорода характеризуется рядом фундаментальных ограничений. Существенным барьером остается высокая капиталоемкость: как строительство новых, так и переоборудование существующих газопроводов требует значительных инвестиций и



Проект-визуализация транспортировки водорода по трубопроводам Источник: Shutterstock.com



Резервуары для хранения сжиженного водорода в Космическом центре Танегасима, Япония

Источник: dishcuss.com

оправдано только при прогнозируемых крупных объемах потребления [17]. Для наземных магистралей капитальные затраты на линейную часть составляют 1,4–3,4 млн евро/км для новых водородных трубопроводов и 0,2–0,6 млн евро/км при переоборудовании существующих газопроводов (для диаметров 20, 36 и 48 дюймов). Для новых морских трубопроводов тех же диаметров стоимость оценивается примерно в 1,7 раза выше по сравнению с наземными, а для переоборудованных принимается на уровне 10 % от CAPEX новых. Указанные значения не учитывают капитальные затраты на компрессорные станции, которые составляют 2,2–6,7 млн евро/МВт [20]. Тем не менее при переоборудовании магистральных газопроводов под транспортировку водорода узкими местами являются: склонность металла труб высоких классов прочности и технологического оборудования к водородному охрупчиванию, приводящему к деградации свойств сталей (снижению пластичности и сопротивляемости развитию трещины), вызывающей снижение надежности и долговечности газотранспортной системы, что подтверждено на примере стандартных труб класса прочности К60 [16], а также необходимость замены или глубокой модернизации компрессоров из-за повышенной степени сжатия. Дополнительно широкий диапазон воспламенения и высокая диффузионная способность водорода создают специфические вызовы по сравнению с природным газом, что обусловливает возрастание рисков безопасности (утечки через различные соединения труб и элементов оборудования компрессорных станций, сложность их идентификации и пр.). Эти технологические риски потребуют изменения программы управ-

Для коротких и средних расстояний трубопроводная логистика газообразного водорода может демонстрировать высокую энергоэффективность, поскольку энергозатраты требуются лишь на компрессию и очистку

ления целостностью системы трубопроводов, что оценочно увеличит затраты на эксплуатацию при переоборудовании на уровне 10 % [16].

Еще одной характерной особенностью остается сравнительно низкая объемная энергетическая плотность газообразного водорода, что увеличивает энергозатраты на его транспортировку в сопоставлении с транспортировкой по морю при сопоставимых объемах [18]. Это ограничивает эффективность трубопроводных решений на больших дистанциях. Так, по данным системного анализа TransHyDE [21], при расстояниях свыше ~1600 км морской транспорт может быть более экономически целесообразным.

Кроме того, фиксированный характер маршрутов трубопроводной сети снижает универсальность технологии: значительная часть будущих потребителей может находиться вне зоны покрытия магистральных сетей, особенно при развертывании новых или распределенных рынков. Решение задач как первой, так и последней мили — от доставки водорода до точки подключения к магистрали и последующего распределения до конечных потребителей — потребует создания дополнительной инфраструктуры, что может привести к росту совокупных затрат [6].

Дополнительные сложности создают длительные сроки реализации и высокая зависимость от межправительственной координации, особенно в случае трансграничных маршрутов, что может растягивать сроки реализации на десятилетие и более [19]. Например, несмотря на активное продвижение политики по развитию водород-



Концепт трубопровода для транспортировки водорода

ной инфраструктуры в ЕС, реализация проектов таких масштабов сопряжена с высокими рисками задержек. Практика показывает, что проекты могут сталкиваться с переносом сроков и отменой, в том числе из-за низкого спроса и неопределенности законодательной базы [1, 22]. При этом заявленные планы строительства водородных трубопроводов в Европе можно охарактеризовать как амбициозные по темпам: по данным IEA [1], в Нидерландах протяженность планируемых водородных трубопроводов сопоставима с более 10 % существующей газовой сети, в Германии и Испании — более 20 %, но проекты предполагаются к реализации менее чем за десятилетие (против более 45 лет формирования текущих газовых сетей).

Наконец, строительство трансграничных трубопроводов сопряжено не только с техническими, но и с геополитическими рисками. Более того, остаются нерешенными вопросы регулирования: от распределения затрат между участниками до правового статуса водородной инфраструктуры, в том числе в отношении отделения от газовой сети и статуса естественных монополий [6].

Таким образом, трубопроводная логистика газообразного водорода способна сохранять значимость в обеспечении стабильных поставок крупным индустриальным потребителям. Однако в кратко- и средне-

При переоборудовании газопроводов под транспортировку водорода узким местом является склонность металла труб высоких классов прочности к водородному охрупчиванию



Источник: Shutterstock.com

срочной перспективе ее применение в качестве универсального инструмента формирования глобальной водородной торговли ограничено как пространственной фиксированностью маршрутов, так и высокой зависимостью от стабильности ключевых потребителей. Прекращение или сокращение их деятельности может привести к неэффективному использованию капиталоемкой инфраструктуры, поскольку перенаправление трубопровода в иную локацию невозможно. При этом текущая конфигурация спроса характеризуется преобладанием децентрализованных точек малого и среднего потребления, что дополнительно снижает потенциал трубопроводной модели и усиливает потребность в более гибких логистических решениях, способных адаптироваться к изменению географии поставок.

Транспортировка водорода в форме аммиака

Использование аммиака в качестве водородного носителя рассматривается как один из технологически освоенных и потенциально масштабируемых вариантов организации международных цепочек поставок, особенно на этапе формирования глобального водородного рынка. Благодаря широкому применению в химической промышленности, это сырье обладает развитой инфраструктурой. Почти в 60 странах имеются терминалы, осуществляющие перевалку аммиака, а объем международной торговли составляет порядка 20 млн тонн в год (эквивалентно примерно 3,5 млн тонн водорода ежегодно)[2] [1].

Производство аммиака на предприятии ПАО «Акрон» в Великом Новгороде Источник: acron.ru



[2] Это составляет 10 % мирового рынка производства аммиака (около 200 млн тонн в год). При этом большая часть производится непосредственно на месте его дальнейшего использования.



Автоцистерна для перевозки сжиженного аммиака Источник: ammiak-yg.com

Процесс его синтеза основан на классической технологии Габера — Боша, предполагающей соединение водорода с азотом при высоких температурах и давлениях. Переход на производство низкоуглеродного аммиака потребует адаптации этого процесса, поскольку эффективная работа установки предполагает стабильную подачу низкоуглеродного водорода [6], что в условиях переменной генерации из ВИЭ может потребовать интеграции дополнительных буферных решений. Дополнительная технологическая задача возникает при переходе на производство низкоуглеродного аммиака (на водороде, полученном электролизом на базе ВИЭ) в цепочке выпуска удобрений, где необходим доступный источник CO_2, который в традиционном процессе получают из природного газа. Для поддержания полного цикла производства в таком случае потребуются дополнительные меры по обеспечению стабильного источника углекислого газа [23].

Высвобождение водорода осуществляется посредством эндотермического крекинга, который в настоящее время не является зрелой технологией для крупнотоннажного применения и требует значительных усилий по интенсификации процесса и повышению энергетической эффективности установок. Промышленное оборудование на основе никелевых катализаторов (TRL 8–9) имеет коммерческое применение преимущественно в маломасштабных процессах, тогда как для крупного масштаба полностью коммерциализированные высокоэффективные катализаторы пока отсутствуют: наиболее активные Ru-системы отличаются высокой стоимостью, а доступные Ni-катализаторы требуют более высоких температур. Альтернативные подходы (амид-имидные катализаторы, электролиз и др.) находятся на низком уровне технологической готовности (TRL 3–4) и требуют решения проблем масштабируемости, стабильности и себестоимости [24]. Процесс крекинга осуществляется в точке конечного потребления, что, как правило, сопряжено с более высокой стоимостью энергии по сравнению с местом производства, что в свою очередь увеличивает совокупную стоимость поставки. Кумулятивные энергетические потери в цикле «синтез-крекинг», по данным ряда аналитиче-

Почти в 60 странах имеются терминалы, осуществляющие перевалку аммиака, а объем международной торговли составляет порядка 20 млн тонн в год (эквивалент 3,5 млн тонн водорода ежегодно)



Цистерны для перевозки аммиака Источник: toaz.ru

ских работ, могут достигать 25–60 %[3] содержащейся в водороде энергии. Стадия крекинга с последующей очисткой и сжатием формирует значимый вклад в уровень LCOH, увеличивая итоговую стоимость доставленного водорода [25]. Эти дополнительные потери и издержки особенно критичны в сценариях, ориентированных на потребление водорода как конечного продукта, где транспортировка водорода в форме аммиака может уступать другим технологиям доставки с меньшими потерями на стадии реконверсии.

Среди преимуществ аммиака как логистического решения выделяют высокую объемную плотность энергии (около 4 кВт•ч/л при гравиметрической плотности около 18 масс. %[4]) и относительно умеренные требования к условиям хранения и транспортировки: сжижение аммиака происходит при минус 33 °C при атмосферном давлении, что позволяет использовать стандартные резервуары [10]. Кроме того, есть возможность использования существующего танкерного флота и портовой инфраструктуры, уже применяемых в химической и нефтяной промышленности, что может снизить капитальные издержки и упростить масштабирование объемов транспортировки. При этом, хотя первые проекты импорта могут использовать существующую инфраструктуру, по данным IEA [1], более 20 стран планируют строительство новой портовой инфраструктуры для экспорта аммиака, поскольку почти 60 % ожидаемых к 2030 году проектов низкоуглеродного водорода, нацеленных на внешнюю торговлю, приходятся на страны с формирующимся рынком и развивающиеся экономики, где подходящая портовая инфраструктура может быть недоступна. При этом капитальные затраты на соответствующую портово-терминальную инфраструктуру могут варьироваться от 90 млн до 1,1 млрд долл. На практике экономическая эффективность таких проектов чувствительна к типу площадки и степени

[3] Согласно данным [17, 26], энергетические потери в процессе синтеза аммиака составляют 12–26 %, в процессе крекинга – 13–34 % содержащейся в водороде энергии.
[4] Согласно данным [29], объемная плотность энергии сжатого водорода (20 °C, 700 бар) составляет около 1,3 кВт•ч/л, LOHC (толуол/метилциклогексан, 20 °C, 1 бар) – около 1,6 кВт•ч/л, сжиженного водорода (минус 253 °C, 1 бар) – около 2,4 кВт•ч/л, аммиака (минус 33 °C, 1 бар) – около 4 кВт•ч/л; гравиметрическая плотность энергии водорода равна 100 масс. %, аммиака – 18 масс. %, LOHC – 6 масс. %.

загрузки: защищенные участки действующих портов при высоком коэффициенте использования обеспечивают минимальную приведенную стоимость терминальной инфраструктуры; напротив, открытые побережья, требующие строительства дорогостоящих волноломов и работающие на небольших объемах, повышают приведенные издержки терминала вплоть до 0,5 долл. за кг H_2-экв., что может существенно ограничивать экономическую целесообразность экспорта аммиака.

Масштаб потенциальных инфраструктурных требований подтверждается и более широкими отраслевыми оценками. По данным Deloitte [26], на строительство морской инфраструктуры для глобальной водородной цепочки поставок может потребоваться до 100 млрд долл. Прогнозируется, что к 2030 году может потребоваться около 100 крупнотоннажных аммиачных танкеров, а к 2050 году — примерно 250 единиц. Одновременно на строительство установок для конверсии и реконверсии (в том числе для крекинга аммиака) может потребоваться порядка 500 млрд долл.[5].



Резервуары для жидкого аммиака, «Щекиноазот» в Тульской области
Источник: schekino.su

Ограничения масштабного использования такого водородного носителя связаны прежде всего с токсичностью аммиака и

Производство аммиака, ПАО «Акрон» в Великом Новгороде Источник: холдинги.рф



[5] На данный момент в постоянной эксплуатации находятся около 40 танкеров средней вместимости.

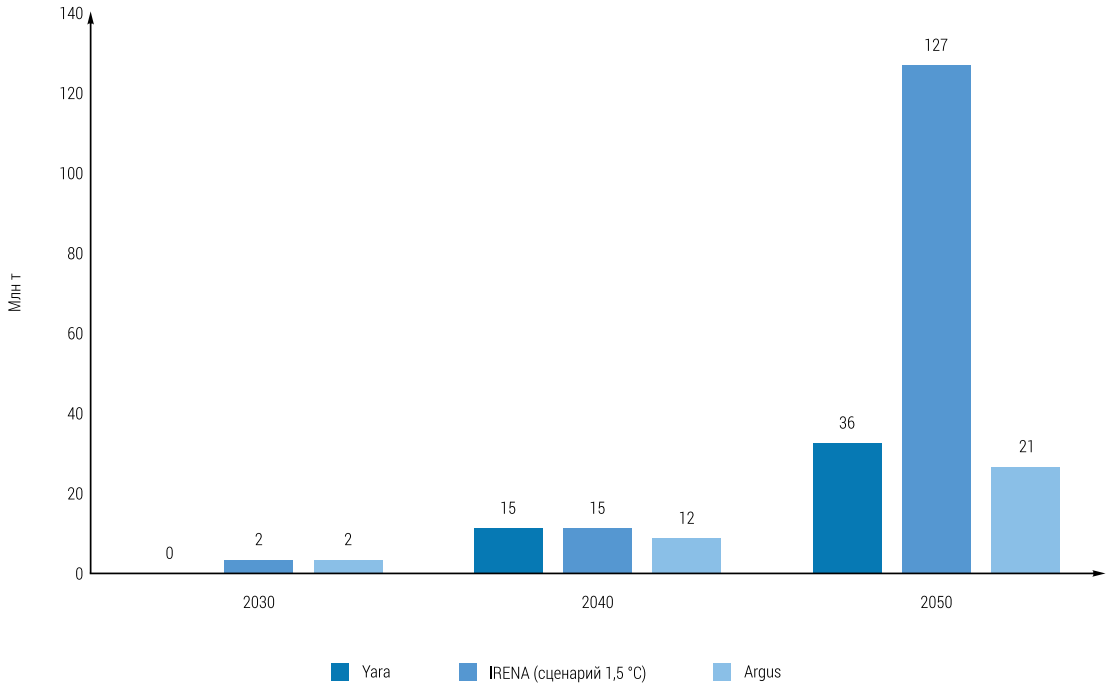


Рис. 2. Спрос на аммиак в качестве носителя водорода, млн т

Источник: составлено авторами по данным Deloitte, «Market Study & Location Assessment for Green Ammonia Production in India», 2023

высокой степенью риска в случае утечек, что создает нормативные и социальные барьеры для применения вблизи густонаселенных районов и вне промышленных зон [6]. Для портовой инфраструктуры и судов это обусловливает необходимость применения коррозионностойких материалов, интеграции систем газодетекции, а также соблюдения расширенных протоколов безопасности и обеспечения соответствующих зон при хранении и обращении, особенно при ограниченном пространстве. Эти требования приводят к увеличению капитальных затрат: так, дополнительная стоимость оснащения крупнотоннажного газовоза оборудованием, обеспечивающим возможность перевозки аммиака, составляет порядка 1–1,5 млн долл. по сравнению с типовым судном класса VLGC [1, 27].

Среди преимуществ аммиака как логистического решения выделяют высокую объемную плотность энергии (около 4 кВт•ч/л) при гравиметрической плотности около 18 масс. % и низкие требования к хранению

Наконец, несмотря на высокий потенциал, роль аммиака как водородного носителя в структуре глобальной торговли может оказаться ограниченной. По различным прогнозам, глобальный спрос к 2040 году оценивается на уровне около 15 млн тонн, а к 2050 году может достигать 21–127 млн тонн в зависимости от реализации климатических амбиций стран. При этом, по данным Deloitte, развертывание крупных импортных терминалов с крекинг-установками ожидается не ранее 2030 года, с выходом на коммерциализацию после 2035 года (Рис.2) [25]. Это подчеркивает роль аммиака как важного, но не единственного звена в цепочке крупнотоннажной водородной логистики, что сохраняет актуальность поиска и развития дополняющих решений, способных повысить гибкость и надежность поставок в разных сценариях.



Проект перевозки жидкого водорода

Транспортировка водорода в форме LOHC

Одним из альтернативных подходов к хранению и транспортировке водорода является использование жидких органических носителей водорода. Технология основана на обратимой химической реакции: водород присоединяется к органическому соединению (гидрирование в ходе экзотермической реакции), образуя жидкую форму, пригодную для транспортировки при атмосферном давлении. В точке назначения водород высвобождается посредством эндотермической реакции дегидрирования, после чего носитель возвращается к месту исходной загрузки для повторного цикла. Наиболее исследованные соединения-носители включают толуол/метилциклогексан (MCH), дибензилтолуол (DBT) и бензилтолуол.

LOHC-системы обладают рядом логистических и эксплуатационных преимуществ. Благодаря физико-химическим свойствам, сходным с нефтепродуктами, LOHC могут использовать существующую транспортную инфраструктуру от автоплатформ до трубопроводов. Для некоторых соединений, например дибензилтолуола, характерна стабильная вязкость даже при низких температурах, что облегчает перекачку и хранение. Гидрированные LOHC не подвержены испарению водорода и обеспечивают длительное безопасное хранение водорода без значительных потерь, при этом высвобождение водорода контролируется термическим способом и требует катализатора, что повышает уровень искробезопасности [6, 9].

Использование LOHC довольно ограничено. В настоящее время крупномасштабное производство LOHC для транспорта водорода отсутствует: мощности реализуемых установок находятся на уровне десятков тонн водорода в сутки

В то же время использование LOHC сопровождается рядом существенных ограничений. В настоящее время крупномасштабное производство LOHC для транспорта водорода отсутствует: мощности реализуемых установок находятся на уровне десятков тонн водорода в сутки, что существенно ниже типичных аммиачных производств (сотни тонн в сутки)[6]. Для обеспечения объемов международной тор-

[6] Например, по данным IRENA на 2022 год, крупнейшая в мире установка (Chempark Dormagen, Германия) имеет проектную мощность около 5 т/сут, а финансирование получено на проект мощностью 24 т/сут.



Источник: 3Scharfsinn, depositphotos.com

говли потребуется многократное наращивание производственной базы. Например, согласно оценкам IRENA [17], транспортировка 10 млн тонн водорода в год на расстояние 20 тыс. км потребует более 300 специализированных судов с совокупным объемом около 35 млн тонн толуола, что сопоставимо с мировым производством толуола в 2020 году (порядка 30 млн тонн). Поскольку LOHC, как правило, являются компонентами товарных химических смесей, их массовое производство может привести к росту предложения сопутствующих продуктов на рынках, что способно вызвать падение цен и ослабление стимулов для наращивания мощностей. Альтернативой станет повышение цены самого LOHC, что в свою очередь увеличит суммарные затраты на транспортировку водорода. Кроме того, существует необходимость в разработке и масштабировании мощностей по дегидрированию: соответствующие установки функционируют преимущественно в формате опытно-промышленных и исследовательских объектов.

Ключевым технологическим барьером остаются высокие энергетические затраты на этапе дегидрирования, требующем значительных тепловых ресурсов и очистки выделенного водорода. Согласно оценкам Deloitte [26], энергетические потери при дегидрировании составляют порядка 25–35 % содержащейся в водороде энергии. При этом, поскольку дегидрирование осуществляется на стороне страны-импортера, эти затраты ложатся на ее энергетическую инфраструктуру, что усиливает зависимость эффективности цепочки от местной стоимости и доступности энергии [17]. Дополнительные ограничения связаны с необходимостью использования дорогостоящих катализаторов на основе рутения и платины, а также с деградацией органического носителя: так, в системах на основе толуола потери вещества в одном цикле могут достигать 2,5 % [9]. Эти потери ведут к выбросу углеродсодержащих соединений в окружающую среду и повышают эксплуатационные расходы. По данным IRENA, даже при использовании относительно недорогого носителя потери могут увеличивать стоимость доставки водорода до 0,05 долл. / кг H_2 [17, 18]. Кроме того, следует учитывать углеродный след потерь и производ-

Транспортировка 10 млн тонн водорода в год на расстояние 20 тыс. км потребует более 300 специализированных судов с совокупным объемом около 35 млн тонн толуола, что сопоставимо с мировым производством толуола в 2020 году



Перевозка сжиженного водорода

Источник: Loady Youtube.com

ства самих носителей, который зависит от количества циклов их использования [6].

Еще одним ограничением является относительно низкая гравиметрическая плотность LOHC — в среднем около 6,1 масс. % для распространенных систем (MCH и DBT) [9]. Это означает, что существенная часть логистических ресурсов расходуется на транспортировку самого носителя, а не водорода, что снижает эффективность поставок. После извлечения водорода дегидрированный носитель подлежит возврату на место гидрирования, что может фактически удвоить транспортные объемы и увеличивает общие затраты [10]. В случае трубопроводной транспортировки дополнительно усложняет задачу повышенная вязкость дегидрированных соединений, что может потребовать мощного насосного оборудования или увеличенного диаметра трубопровода [9]. Кроме того, при нарушении условий обращения некоторые дегидрированные соединения могут представлять угрозу безопасности (токсичность, легкая воспламеняемость, коррозийность).

С учетом текущего уровня технологической зрелости, широкомасштабное применение LOHC в ближайшие годы маловероятно. TRL для LOHC в целом находится в диапазоне 5–9, однако ключевой процесс дегидрирования — на уровне TRL 5–6, что указывает на недостаточную готовность к крупнотоннажной эксплуатации. Кроме того, носители с высоким TRL доступны только в небольших масштабах. При существующих темпах развития вывод промышленных установок дегидрирования на уровень крупного масштаба ожидается не ранее 2030–2035 годов [28]. В долгосрочной перспективе LOHC могут занять дополняющую нишу в структуре глобальной водородной логистики при условии технологического совершенствования, снижения удельных энергозатрат и увеличения эффективности ключевых процессов.

Использование стандартизованных танк-контейнеров, как правило, повышает операционную гибкость и перераспределяемость между маршрутами и узлами, что способно смягчать колебания спроса

Транспортировка водорода в сжиженной форме

Сжиженный водород представляет собой водород в жидкой фазе, получаемой при охлаждении газа ниже точки кипения минус 253 °C при атмосферном давлении. Хотя по объемной плотности энергии на

Контейнерная логистика рассматривается не как альтернатива, а как важный элемент, дополняющий другие крупнотоннажные подходы, с акцентом на условиях конкурентоспособности

уровне продукта сжиженный водород уступает аммиаку, он превосходит сжатый водород и LOHC. При этом с учетом тары системы транспортировки на основе LH_2 обеспечивают объемную плотность энергии, не уступающую, а превосходящую системы на основе аммиака. LH_2 сохраняет абсолютное преимущество по гравиметрической плотности как чистая форма водорода, превосходя как углеводороды, так и водородные производные (включая аммиак и LOHC) [29]. Эти свойства делают LH_2 особенно привлекательным для применения в сегментах, где критична массовая энергоемкость, ограничен допустимый вес и требуется чистый водород без необходимости реконверсии: например, в магистральном транспорте и тяжелой технике, авиационной и аэрокосмической отрасли.

Процесс сжижения водорода, несмотря на значительные удельные энергетические потери (порядка 30–36 % содержащейся в водороде энергии [26]), может быть экономически оправдан при организации производства в регионах с низкой стоимостью электроэнергии. В перспективе основу экспортоориентированных поставок низкоуглеродного водорода будут формировать именно такие регионы — с преобладанием ВИЭ либо газовой генерации с применением CCUS. Согласно исследованию [29], в отличие от химических носителей водорода, сжиженный водород не требует энергозатратной реконверсии или очистки на месте конечного потребления: для использования достаточно температуры окружающей

Установка очистки водорода

Источник: bing.com



среды, а после регазификации его чистота может достигать 99,9999 % (класс 6.0). Более того, сжиженный водород является единственным вариантом поставки водорода в жидком виде, при котором необходимая энергия закладывается на стороне производителя. На этапе конечного использования требуется существенно меньше дополнительной энергии по сравнению с цепочками, предполагающими химическую реконверсию, при этом низкотемпературный потенциал может быть рекуперирован с помощью регазификационных установок, например

жет быть снижено до 50 % не только за счет эффекта масштаба, но и за счет технологического и эксплуатационного совершенствования оборудования. Потенциальную экономичность технологии в среднесрочной перспективе подтверждают темпы расширения глобальных мощностей по сжижению водорода. По данным исследования [29], только в 2022–2025 годах были законтрактованы проекты на ввод не менее 135 т/сут в США и 120 т/сут в странах Дальнего Востока, что соответствует приросту мощностей на 46 и 360 % соответственно. Эти



Проект хранения водорода

Источник: Shutterstock.com

преобразован в механическую или электрическую энергию.

Технология сжижения водорода является относительно отработанной для установок малой мощности, с уровнем технологической готовности от 7 до 9. Она широко применяется в аэрокосмической отрасли и постепенно масштабируется в ряде наземных проектов, включая автозаправочные станции [6]. Согласно данным JRC [9], по мере масштабирования установок (свыше 50 тн/сут[7]) энергопотребление мо-

темпы роста отражают высокий уровень промышленного интереса к технологии сжижения водорода и подтверждают ее значение в системе международной водородной логистики.

С точки зрения логистики крупнотоннажная транспортировка сжиженного водорода может осуществляться двумя основными способами: в специализированных морских танкерах или с использованием контейнерных решений. От выбора транспорта существенно зависят требования к инфра-

[7] Сегодня мощность традиционного завода по сжижению водорода в Европе составляет от 4,4 до 10 т/сут, в то время как в США – до 32 т/сут.



Железнодорожная криогенная цистерна для транспортировки жидкого водорода
Источник: profitsteel.ru

структуре, способ хранения и организация перевозок. В настоящее время наиболее распространенным способом перевозки жидкого водорода остаются автомобильные полуприцепы-цистерны, обеспечивающие распределение или доставку на короткие расстояния. Наблюдаемая испаряемость таких систем, достигающая 1 % объема в сутки [9], ограничивает радиус и существенно снижает продолжительность допустимой транспортировки.

Судовая транспортировка осуществляется с помощью специализированных криогенных танкеров, оснащенных резервуарами с двухслойной оболочкой и вакуумной теплоизоляцией. Техническая осуществимость данного формата была подтверждена в рамках демонстрационного проекта Kawasaki Heavy Industries (танкер Suiso Frontier), выполнившего первую международную поставку LH_2 из Австралии в Японию [30]. Kawasaki также представила решение, ориентированное на переход к более крупному коммерческому масштабу, включая разработку и валидацию крупнотоннажной системы хранения для судов вместимостью до 160 тыс. $м^3$ [31]. Это свидетельствует о заметном технологическом продвижении в развитии морской логистики жидкого водорода. Вместе с тем широкое внедрение данного формата сопряжено с потребностью дальнейшего развития капиталоемкой инфраструктуры, включая специализированный флот, портовые мощности, криогенные трубопроводы и др. Кроме того, фиксированность маршрута между экспортным и импортным терминалами обусловливает необходимость дополнительных транспортно-логистических решений на первой и последней миле. К числу ключевых инженерных задач относятся поддержание криогенной температуры и минимизация потерь на испарение во время транспортировки и погрузочно-разгрузочных операций [10].

Решения на основе ISO-контейнеров демонстрируют ряд логистических и эксплуа-



Научно-исследовательская база по водородной энергетике в Фукусиме, Япония
Источник: TOSHIBA

тационных преимуществ. По данным JRC [9], такие системы (например, HYLICS от Linde) обеспечивают низкие уровни испарения (до ≤1 % в сутки), подходят для мультимодальных перевозок, включая также внутренние водные пути в качестве дополняющего морскую транспортировку специализированными танкерами решения. Это делает их особенно перспективными для создания распределенных и адаптивных цепочек поставок водорода.

Сжиженный водород остается высокоэнергетическим и чистым энергоносителем, пригодным для масштабной логистики в сценариях, где невозможна или экономически нецелесообразна прокладка трубопроводов или использование водородных носителей. Контейнерные решения на основе LH_2 демонстрируют высокую адаптивность, позволяя поэтапно масштабировать поставки от пилотных маршрутов до системной доставки в инфраструктурно ограниченные регионы. Принимая во внимание указанные особенности, контейнерная логистика LH_2 представляет собой эффективный инструмент для развертывания водородных поставок в условиях формирующегося рынка. В качестве одного из перспективных решений в данном сегменте рассматривается мультимодальный криогенный танк-контейнер CryoSafe-42, предназначенный для транспортировки сжиженного водорода на большие расстояния без сброса газа в атмосферу (бездренажная транспортировка). Его характеристики и потенциал рассматриваются далее в рамках настоящего исследования.

Водородная логистика в 2025–2035 годах

Развитие водородной экономики ведет к формированию системы трансграничной логистики. По данным IEA, торговля является ключевым драйвером анонсов: к 2030 году почти 45 % низкоуглеродного водорода из объявленных производственных проектов ориентировано на экспорт (более 16 млн тонн H_2-экв. в год; большая часть

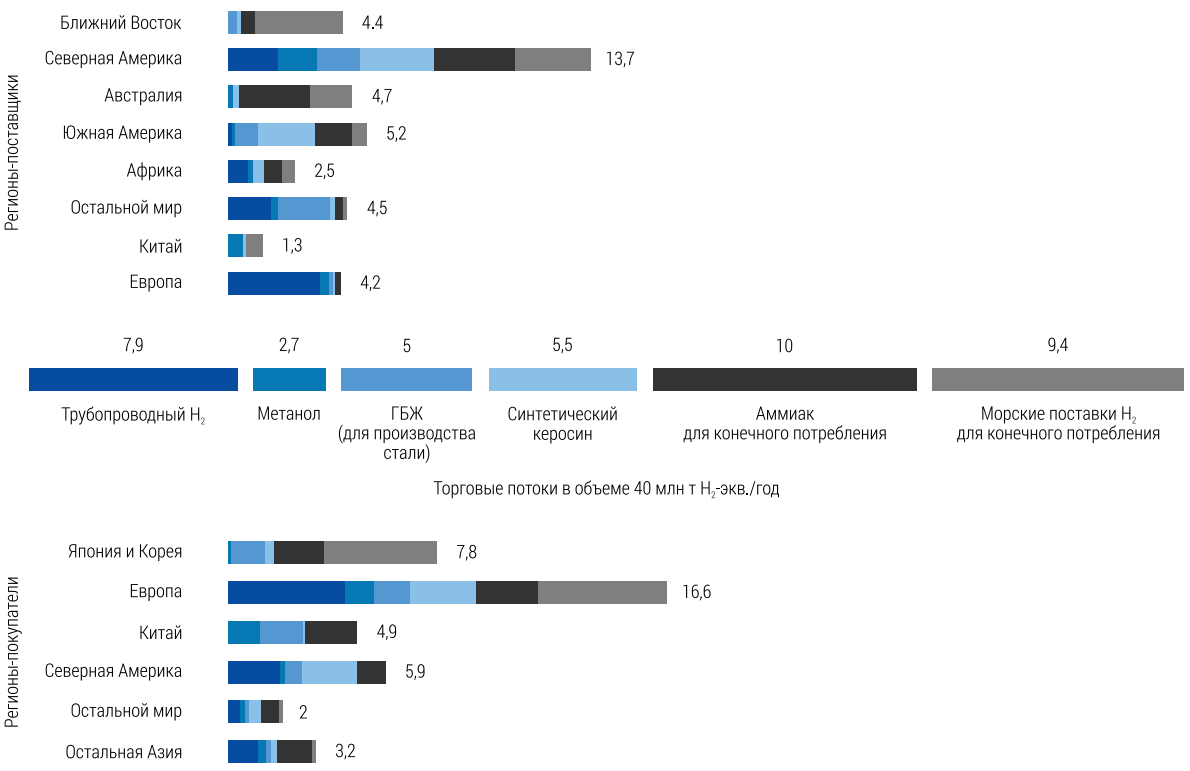


Рис. 3. Глобальные потоки низкоуглеродного водорода и его производных на большие расстояния в 2035 году, млн т H_2-экв. в год

Источник: Hydrogen Council, McKinsey & Company, «Global industry status and outlook for cross-border trade in hydrogen and its derivatives», 2024

планирует поставки в виде аммиака), однако у таких инициатив пока низкая доля FID [1]. На горизонте 2035 года, согласно модельной оценке Hydrogen Council и McKinsey [32], объемы международной транспортировки водорода и его производных могут достичь 40 млн тонн H_2-экв. в год, где около 9,4 млн тонн из общего объема может поставляться в виде форм, предназначенных для конечного использования (включая LH_2, NH_3 и LOHC) (рис. 3). Причем экономическая целесообразность международной торговли водородом определяется не только доступом к дешевым источникам энергии, но и потенциалом оптимизации глобального распределения ресурсов. Анализ показывает, что в долгосрочной перспективе такая торговля способна сократить совокупные инвестиционные затраты на 3,7 трлн долл. по сравнению со сценарием локального производства.

Для достижения моделируемых объемов дальнемагистральной торговли потребуется более 30 активных трансгранич

Текущая мировая торговля аммиаком эквивалентна 3,5 млн тонн H_2 в год, тогда как к 2030 году поставки водорода в форме аммиака могут достичь примерно 13,7 млн тонн H_2-экв. в год

ных коридоров уже к 2035 году [32] (рис. 4). Однако практическая реализация этих маршрутов сопряжена с рядом ограничений: отсутствием глобальных стандартов, недостаточной развитостью инфраструктуры и др. Как подчеркивается в докладе H2-Diplo [33], в ближайшие годы торговля будет основываться преимущественно на

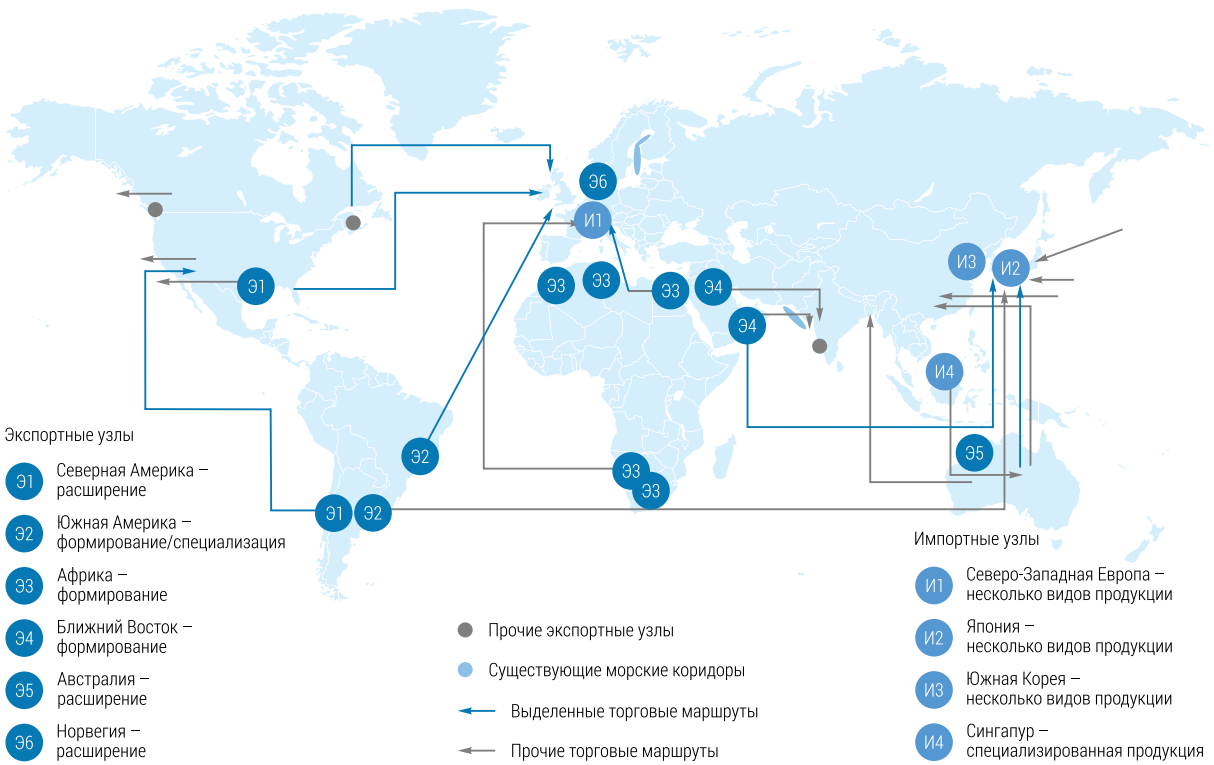


Рис. 4. Примеры торговых маршрутов между экспертными и импортными хабами в 2035 году

Источник: Hydrogen Council & McKinsey & Company. Emerging trade corridors for hydrogen and its derivatives, 2024

двусторонних контрактах продолжительностью 10–12 лет, нередко в рамках формирующихся «водородных долин». В такой ситуации особое значение приобретают логистические модели, способные адаптироваться к инфраструктурным ограничениям.

С точки зрения экспортной инфраструктуры, включая судоходную и трубопроводную, в ряде ключевых регионов она все еще находится на стадии проектирования или строительства [32], что подчеркивает необходимость доступного капитала и институциональной поддержки на ранних этапах. По оценке Hydrogen Council [34], для обеспечения трансграничной торговли водородом и его производными в объеме свыше 200 млн тонн H_2-экв. в год к 2050 году потребуются ежегодные инвестиции порядка 70–140 млрд долл. (в зависимости от сценария) в мощности по конверсии и реконверсии, а также транспортную инфраструктуру, включая строительство от 500 до более 1100 судов, портовых мощностей и трубопроводов. Хотя речь идет о долгосрочных сценарных ориентирах, именно в период с 2025 по 2035 год должны быть заложены основы будущей торговой системы.

Масштаб требуемого наращивания портовой инфраструктуры можно проследить в сегменте торговли аммиаком. По оценке IEA [1], текущая мировая торговля аммиаком эквивалентна лишь порядка 3,5 млн тонн H_2 в год, тогда как при полной реализации объявленных экспортных проектов к 2030 году поставки водорода в форме аммиака могут достичь примерно 13,7 млн тонн H_2-экв. в год (то есть более 75 млн тонн NH_3 в год). Это почти в четыре раза больше нынешних объемов, следовательно, для таких масштабов потребуется быстрое и капиталоемкое расширение портовой логистики и мощностей крекинга, причем технология крекинга все еще находится на ранней стадии коммерческой валидации. Дополнительно менее 5 % проектов имеют FID и лишь около четверти обеспечены долгосрочными договорами поставки, что может указывать на высокий риск недореализации заявленных объемов (рис. 5). Это усиливает значимость гибких модульных логистических решений, вклю-

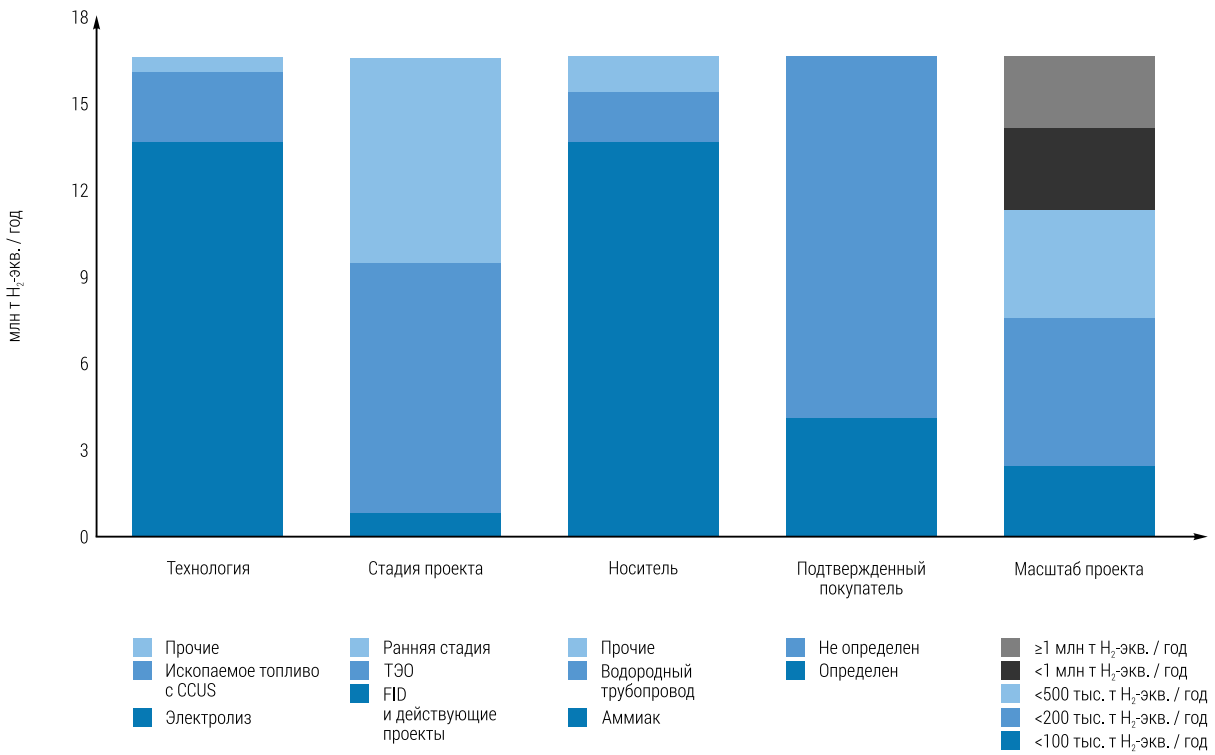


Рис. 5. Объявленные проекты по производству низкоуглеродного водорода и его производных, предназначенных для экспорта, 2030 год

Источник: IEA, «Global Hydrogen Review 2025», 2025



Первый терминал Kawasaki по приему сжиженного водорода в Кобе, Япония

Источник: portnews.ru

чая контейнерные цепочки, в период с 2025 по 2035 год.

В странах-импортерах фиксируется значительный инвестиционный разрыв между заявленными целями и фактическими мерами государственной поддержки. При установленной целевой планке порядка 25 млн тонн в год водорода и его производных к 2030 году, действующая поддержка со стороны механизмов стимулирования спроса охватывает лишь 3–7 млн тонн в год, по оценке Hydrogen Council & McKinsey [32]. По состоянию на 2025 год [8] подтверждено около 3,6 млн тонн в год по обязательным контрактам на поставку, и при полном введении в действие уже принятых мер в ЕС, США, Японии и Республике Корея к 2030 году может сформироваться спрос порядка около 8 млн тонн в год, обеспечивающий положительную экономику проектов. Совокупно это подтверждает ранний этап формирования цепочек поставок и сохраняющуюся неопределенность.

Для обеспечения трансграничной торговли водородом в объеме свыше 200 млн тонн H_2-экв. в год к 2050 году потребуются ежегодные инвестиции порядка 70–140 млрд долл. в мощности по конверсии и реконверсии

Прогнозируется стремительное расширение объемов дальнемагистральных потоков низкоуглеродного водорода и его производных — от порядка 18 к 2030 году до 100 млн тонн H_2-экв. в год к 2040-му согласно сценарию Further Acceleration (FA) Hydrogen Council & McKinsey [34]. Это подчеркивает значимость текущего десятилетия как фазы становления глобальной водородной логистики. Учитывая сохраняющуюся неопределенность спроса, институциональные и инфраструктурные барьеры, ключевое значение в период с 2025 по 2035 год приобретают логистические решения, способные обеспечивать поставки при частичной готовности инфраструктуры и в рамках демонстрационных этапов.

Что касается торговли сжиженным водородом, по данным IEA [1], хотя на текущий момент отсутствуют твердые инвестиционные обязательства по строительству крупномасштабной инфраструктуры, в 2024–2025 годах зафиксирован ряд пред-

варительных инициатив, отражающих интерес к формированию коридоров поставок сжиженного водорода: (i) условный долгосрочный договор между Keppel (Сингапур) и Woodside (Австралия) на поставки LH_2 из Австралии; (ii) соглашение о совместной разработке (Joint Development Agreement) между портом Дукм (Оман), портом Амстердама (Нидерланды) и портом Дуйсбурга (Германия) по созданию коридора LH_2; (iii) соглашение между Ecolog и Tata Steel об изучении поставок LH_2 из Норвегии в порт Амстердама.

Водородный рынок ЕС: импортные сценарии и инфраструктурные условия

Что касается прогнозов формирующегося водородного рынка в Европейском союзе, то, согласно плану REPowerEU, ЕС предусматривает существенный импорт водорода и его производных. Внутреннее производство неспособно полностью покрыть растущий спрос: согласно целевым сценариям, для достижения климатических и энергетических целей потребуется импортировать до 10 млн тонн водорода к 2030 году. В то время как импорт водорода с помощью трубопроводного транспорта предполагается в основном из соседних регионов и между странами — членами ЕС, использование судоходного транспорта открывает доступ к экспортерам из любой точки мира, включая регионы с низкой стоимостью электроэнергии, в том числе из ВИЭ. Такой формат не только обеспечивает гибкость цепочек поставок, диверсификацию источников и повышение энергетической безопасности Европы [35], но и в ряде случаев может быть экономически предпочтительнее, чем производство водорода внутри ЕС или его импорт у соседних стран с высокой стоимостью электроэнергии.

Транспортировка сжиженного водорода в контейнерах-цистернах формирует самостоятельную логистическую платформу: позволяет поставлять чистую форму водорода без энергоемкой химической реконверсии

Прогнозируется, что к 2030 году может потребоваться около 100 крупнотоннажных аммиачных танкеров, а к 2050 году – примерно 250 единиц

В ЕС действует комплекс политических мер, направленных на устойчивое развитие спроса на низкоуглеродные топлива и повышение предсказуемости потребления водорода и его производных [1]: например, регламент FuelEU Maritime, распространение EU ETS на морские перевозки с 2024 года, регламент Alternative Fuels Infrastructure Regulation, директива RED III и др. Их совокупное действие повышает вероятность загрузки импортной водородной инфраструктуры в 2025–2035 годах.

Для эффективной интеграции водорода и его производных в европейскую энергетическую систему необходима масштабная инфраструктура импорта, при этом в качестве основных вариантов рассматриваются трубопроводные и морские маршруты. Развертывание такой инфраструктуры, включая терминалы для приема, хранения и перегрузки водородных носителей, порты, трубопроводы и специализированный флот, потребует значительных объемов финансирования. При этом импортных мощностей трубопроводов может оказаться недостаточно для удовлетворения будущего спроса ЕС на водород. В морском импорте основную роль играют водородные терминалы и порты. В зависимости от используемого носителя водорода, они требуют различной технологической конфигурации. Речь идет как о строительстве новых объектов, так и о переоборудовании существующих терминалов, в частности суще-



Установка риформинга метанола для производства водорода Источник: alibaba.com

ствующих во многих портах ЕС СПГ-терминалов, под нужды водородной логистики. Ускоренное развитие портовой инфраструктуры становится необходимым условием обеспечения рынка ЕС водородом, особенно в контексте реализации плана REPowerEU и пакета Fit for 55, поскольку европейские порты являются естественными перевалочными пунктами для потоков низкоуглеродного водорода и его производных [35].

Характерным примером усилий по подготовке портовой инфраструктуры является порт Гамбург, рассматриваемый как один из будущих водородных хабов Европы. Согласно исследованию Fraunhofer Center for Maritime Logistics and Services (CML) [36], к 2045 году объемы импорта сжиженного водорода через порт Гамбург могут достичь 600 тыс. тонн в год. Однако лишь часть существующих мощностей порта подлежит модернизации, поэтому для приема и хранения жидкого водорода и аммиака потребуется строительство новой инфраструктуры. При этом прогноз учитывает ожидаемый рост производства и ввода в эксплуатацию судов для транспортировки водорода, что ставит вопрос об организации внутриконтинентальной логистики. Поскольку действующее законодательство запрещает использование внутренних танкеров для транспортировки водорода, доставка по внутренним водным путям может осуществляться в формате перевозки в специализированных емкостях, например, в ISO-контейнерах.

Кроме того, масштабное развитие инфраструктуры импорта потребует интеграции внешних поставок с внутренней системой распределения водорода в ЕС. С

учетом географической разбросанности потенциальных экспортеров важное значение приобретает не только диверсификация маршрутов доставки, но и формирование трансъевропейских водородных коридоров, связывающих морские порты и терминалы с основными промышленными регионами. Такие коридоры, обозначенные в стратегии REPowerEU, должны обеспечить эффективную доставку водорода от точек импорта к центрам спроса. Это подчеркивает необходимость внедрения гибких технологических моделей логистики, способных адаптироваться к поэтапному развертыванию инфраструктуры и сопровождать рост поставок на горизонте до 2035 года.

Потребительский профиль

Помимо традиционного применения водорода в промышленности (нефтехимия и производство удобрений), все большее внимание уделяется его потенциалу в транспортном секторе. Особенно это актуально в сегменте тяжелого и дальнемагистрального транспорта: ограничения по плотности энергии, времени заправки и массогабаритным характеристикам снижают эффективность альтернативных решений. По данным IEA, в дорожном транспорте единственным быстрорастущим сегментом рынка FCEV остаются тяжелые грузовые автомобили, несмотря на по-прежнему более высокую совокупную стоимость владения по сравнению с аналогами на аккумуляторных батареях или дизельных ДВС [1].

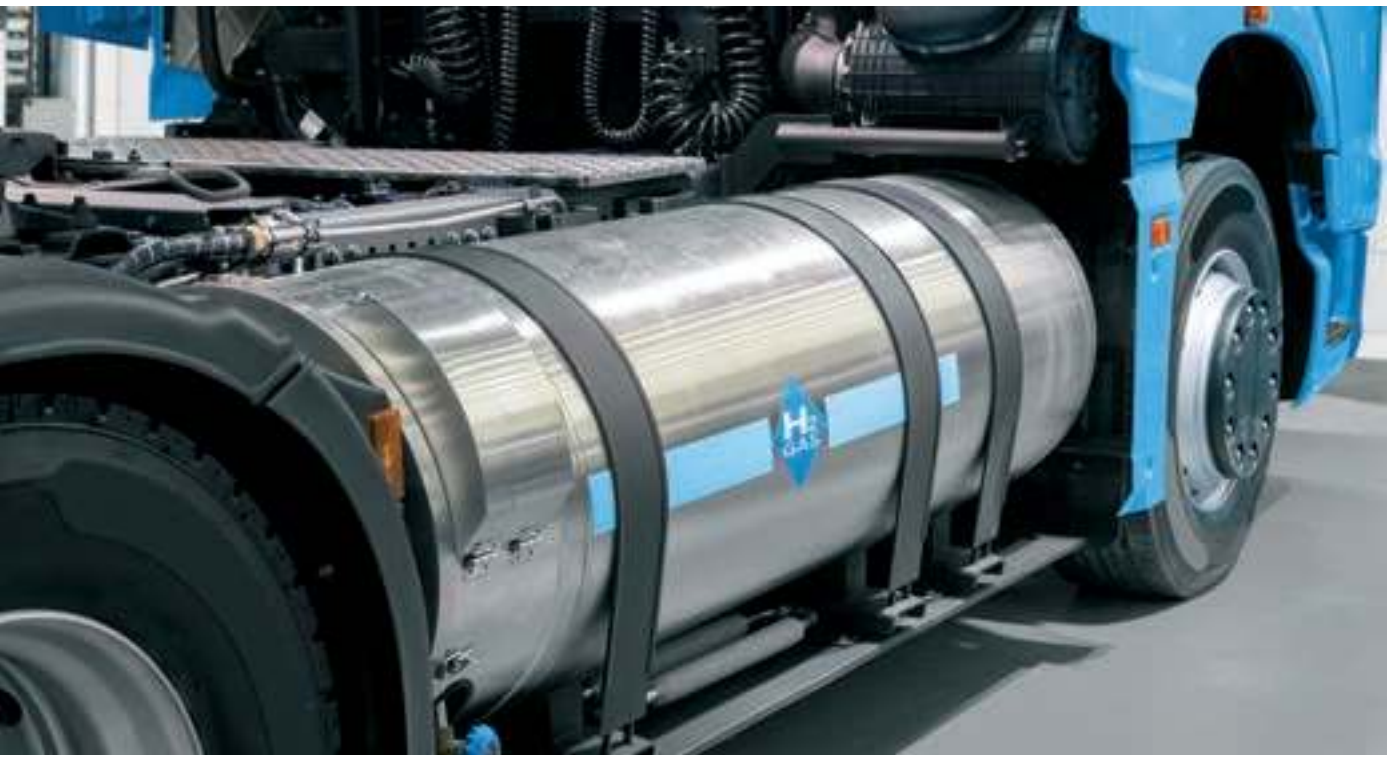
Согласно оценкам National Hydrogen Council of Germany (NWR) [37], уже в среднесрочной перспективе водород и водородные топлива могут стать одними из важнейших энергоносителей в грузовом автотранспорте, железнодорожной логистике, судоходстве и авиации. Их применение особенно оправдано при транспортировке тяжелых грузов (или большого количества пассажиров) на значительные расстояния, где прямое использование возобновляемого электричества ограничено.

В рамках планирования декарбонизации сектора тяжелого транспорта предполагается использование комбинации технологий, в которой водород играет ключевую роль. Аккумуляторные электромобили, как ожидается, займут большую долю в сегменте малых и коротких перевозок, тогда как топливные элементы — в магистральных перевозках. Более 56 % грузоперевозок в ЕС в тонно-километрах осуществляется на расстояния свыше 300 км, что требует высокой плотности энергии и быстрой заправки. В этом контексте жидкий водород рассматривается как конкурентоспособное решение для дальнемагистрального транспорта [38].

Сжатый водород, несмотря на зрелость технологии и широкое распространение, ха-



Проект круизного лайнера на на водородных топливных элементах Источник: Shutterstock.com



Водородное топливо в автотранспорте Источник: Shutterstock.com

рактеризуется сравнительно низкой объемной плотностью, что ограничивает его эффективность при использовании в сегменте дальнемагистральных перевозок. В этой связи возрастающий интерес вызывают криогенные технологии хранения, включая как сжиженный, так и криосжатый водород. Согласно ряду публикаций, такие технологии обеспечивают существенные преимущества [39]:

- увеличение автономности транспортных средств за счет более высокой плотности водорода;
- повышение полезной нагрузки за счет уменьшения массы и габаритов топливных систем;
- снижение капитальных затрат благодаря более компактным резервуарам и уменьшению потребности в дорогостоящих композиционных материалах;
- улучшение показателей безопасности в аварийных сценариях за счет меньшей энергии расширения.

Дополнительным преимуществом сжиженного водорода выступает возможность его использования в качестве встроенного охлаждающего агента (free cooling), что позволяет повысить эффективность всей энергетической цепочки. По данным исследования [29], применение LH_2 в этой роли может увеличить совокупный КПД цепи «от источника до колеса» до 32 % по сравнению с около 29 % при использовании без охлаждающего эффекта. Также отмечается, что LH_2 создает благоприятные условия для использования высокотемпературных сверхпроводников (HTS), которые при такой конфигурации не требуют дополнительных систем охлаждения и обеспечивают высокую плотность тока без потерь, что способствует росту

Прогнозируется стремительное расширение объемов дальнемагистральных потоков водорода — от порядка 18 к 2030 году до 100 млн тонн H2-экв. в год к 2040-му

эффективности и удельной мощности тяговой электромашины в транспортных средствах на LH_2.

Более того, при переходе с дизельного топлива на водород в таких энергоемких сегментах, как локомотивы, авиация и тяжелая строительная техника, только использование LH_2 позволяет обеспечить необходимый энергетический объем при разумных массогабаритных характеристиках [29].

История применения жидкого водорода в транспорте насчитывает уже несколько десятилетий. Еще в конце XX века BMW разработала серию автомобилей, использующих криогенные баки, обеспечивающие запас хода, сопоставимый с бензиновыми аналогами. Это позволило оценить возможности масштабного производства: было построено около 100 таких автомобилей [40].

В настоящее время интерес к использованию LH_2 в транспортном секторе получает новый импульс, что подтверждается рядом проектов, которые уже выходят за рамки демонстрационных в стадию пилотной эксплуатации и предсерийных поставок. Daimler Truck (Германия) разрабатывает грузовики Mercedes-Benz GenH2 с водородным двигателем, подтвердившие свою стабильную работу по итогам ходовых испытаний в 2025 году. К концу 2026-го планируется выпуск серии из 100 грузовиков, после чего они поступят клиентам для реальной эксплуатации. Компания совместно с Linde разработала стандарт заправки переохлажденным жидким водородом (subcooled liquid hydrogen, sLH_2) и открыла первую заправочную станцию для демонстрации технологии [13]. В Китае в 2025 году разработанная CASC бортовая

Для эффективной интеграции водорода в европейскую энергетику необходима масштабная инфраструктура импорта, при этом в качестве основных вариантов рассматриваются трубопроводные и морские маршруты



Автомобиль на водородных топливных элементах Источник: SergioYoneda, depositphotos.com



Водородный топливный элемент
Источник: eenewseurope.com

система на жидком водороде весом 100 кг Track 1000 завершила испытания на автомобиле на жидководородных топливных элементах Starlight мощностью на 300 кВт компании FAW Jiefang Lantu, подтвердившие запас хода более 1000 км и стабильную работу при давлении 1,3 МПа. Проект стал основой для создания национальных стандартов и демонстрационной зоны по применению LH_2 в грузоперевозках [14]. Также в 2025 году китайская компания Foton Motor представила концепт электрического седельного тягача Beacon Hydrogen Truck, оснащенного топливной системой мощностью 300 кВт, работающей на жидком водороде, с запасом хода свыше 1000 км. Старт серийного производства планируется в 2026 году [15].

Отдельным направлением выступает криосжатый водород. В этой концепции водород краткосрочно хранится при криогенных температурах, близких к температуре жидкого водорода, но при повышенном давлении, что позволяет повысить объемную плотность накопленной энергии на борту транспортного средства. В то же время решения на базе CcH_2 пока находятся на стадии опытно-промышленных демонстраций.

Однако потенциал применения жидкого водорода не ограничивается только транспортным сектором. Его физико-химические свойства — высокая плотность хранения, чистота, криогенный характер — делают LH_2 востребованным решением и в других отраслях [29]. В полупроводниковой промышленности использование сжиженного водорода уже сегодня осуществляется благодаря его высокой степени чистоты после регазификации (до класса 6.0) и высокой плотности хранения: один криогенный резервуар может заменить несколько высоконапорных баллонов при сопоставимом уровне чистоты. Кроме того, в энергетическом секторе те же криогенные свойства LH_2 позволяют охлаждать HTS без применения других систем, что открывает возможность создания «гибридных трубопроводов», совмещающих транспортировку LH_2 и передачу электроэнергии с минимальными потерями. Согласно исследованию [29], такие решения рассматриваются как перспективное направление интеграции водородной и электрической инфраструктуры.

Таким образом, сжиженный водород уже сегодня демонстрирует высокий потенциал в транспортной, промышленной и энергетической сферах. Расширение масштабов производства, развитие инфраструктуры и снижение издержек создают условия для широкомасштабного внедрения LH_2 в ключевые сегменты экономики, формируя основу для устойчивой водородной архитектуры будущего.

Конкурентоспособность транспортировки водорода в жидком виде: анализ литературных источников

Сравнительный анализ решений для транспортировки водорода, проведенный JRC, представляет собой одно из наиболее комплексных исследований, охватывающих как централизованные, так и распределенные сценарии поставок. В рамках двух последовательных публикаций были рассмотрены экономические [9] и экологические параметры [41] различных моделей поставок.

В сценарии централизованной доставки крупных объемов водорода трубопроводный транспорт остается наименее затратным решением при условии его доступности. Однако в условиях распределенной логистики ключевое значение приобретает морская доставка. Сжиженный водород в случае транспортировки специализированным танкером показывает устойчивое преимущество на дистанциях от 7500 до 10000 км при низких ценах на электроэнергию, а при высоких остается наиболее конкурентоспособным вариантом вплоть до 25 тыс. км, уступая только трубопроводу на коротких дистанциях (рис. 6). В распределенной модели с умеренными объемами поставки водорода контейнерная транспортировка получает отдельную оценку как актуальный вариант для мультимодальной логистики. Стоимость доставки жидкого водорода в контейнерах-цистернах выше, чем при перевозке танкерами, но существенно ниже, чем у контейнерной логистики CGH_2, и сопоставима или даже предпочтительнее по сравнению с химическими носителями (рис. 7).

Сжатый водород, несмотря на зрелость технологии и широкое распространение, характеризуется сравнительно низкой объемной плотностью, что ограничивает его эффективность при использовании в сегменте дальнемагистральных перевозок

Что касается экологической оценки жизненного цикла для сценария централизованной доставки, по результатам расчетов, сжиженный и сжатый водород при морской доставке танкерами и по трубопроводу соответственно характеризуются самым низким уровнем выбросов парниковых газов — около 1,9 кг CO_2-экв. / кг H_2,

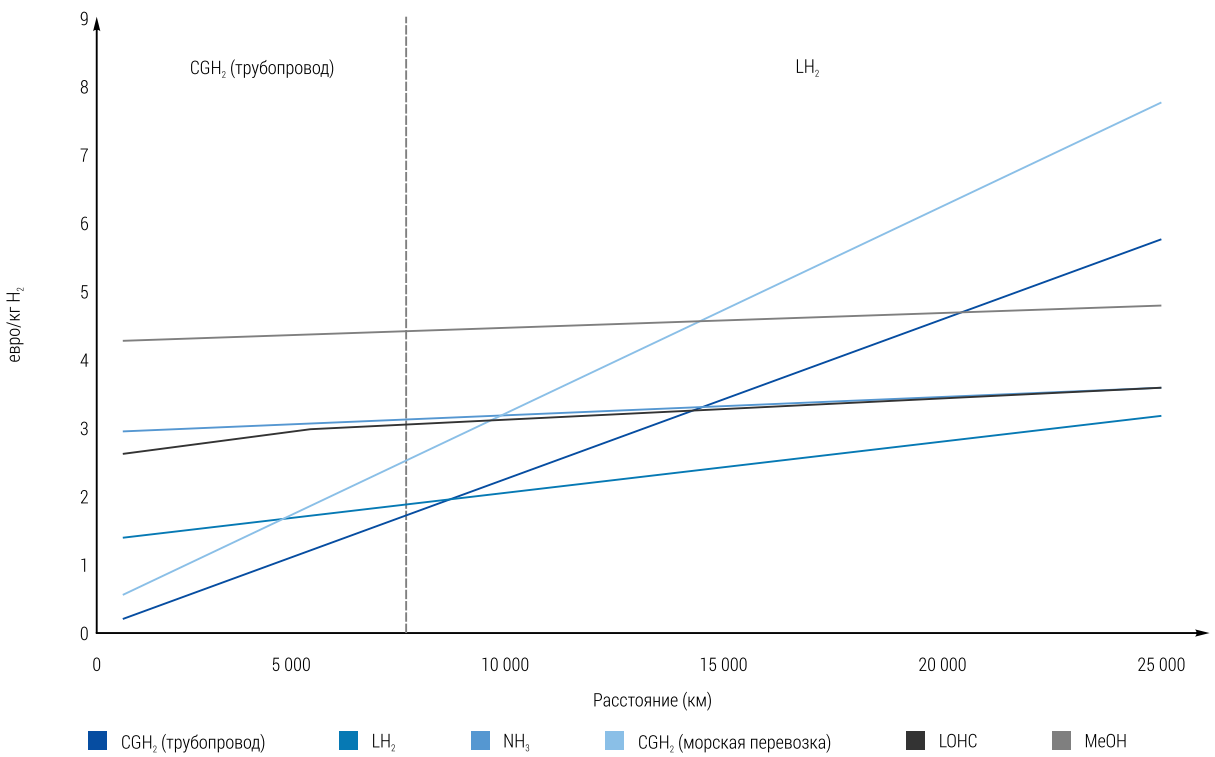


Рис. 6. Стоимость доставки водорода в зависимости от расстояния (при высокой цене на электроэнергию)

Источник: JRC Analysis

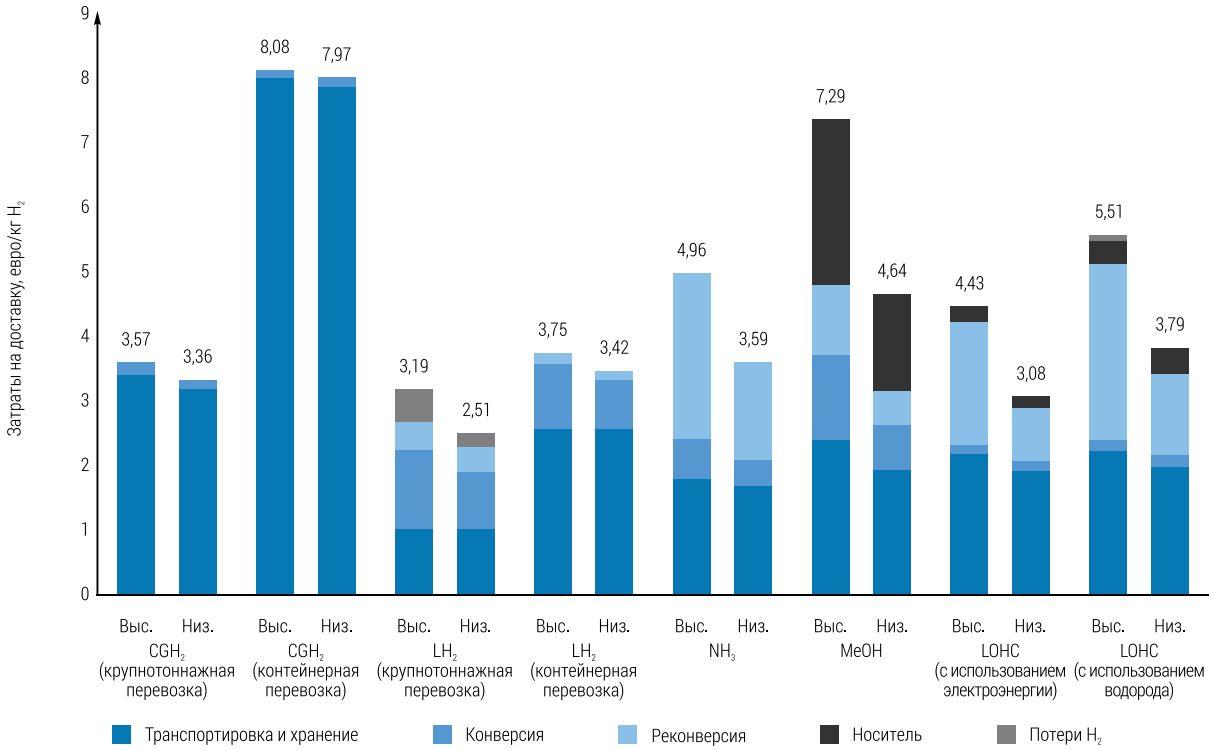


Рис. 7. Стоимость доставки водорода (сценарий интермодальных перевозок)

Источник: JRC Analysis

в то время как для химических носителей показатель достигает 3,4 кг CO_2-экв. / кг H_2, в первую очередь из-за энергоемких процессов конверсии и реконверсии. Даже с учетом потенциальных потерь водорода при доставке LH_2 специализированными танкерами, его углеродный след остается ниже, чем у LOHC, аммиака или метанола. Кроме того, LH_2 оказался наименее чувствительным к углеродоемкости электросети на конце цепи поставки, что повышает его устойчивость в условиях неполной декарбонизации энергетического сектора ЕС.

Развитие водородной логистики может оказывать косвенные климатические эффекты, включая утечки водорода. По данным IEA и ECH2A [1, 35], сам водород, не являясь парниковым газом, может косвенно усиливать парниковый эффект через реакции, влияющие на концентрации отдельных парниковых газов. Причем риски утечек присутствуют на всех этапах цепочки поставок — от конверсии до распределения и конечного использования, особенно при недостаточной герметичности оборудования.

Выбор транспортного средства также влияет на углеродную интенсивность и риски утечек. Морские перевозки, несмотря на более высокую энергоемкость по сравнению с трубопроводными, потенциально могут быть декарбонизированы за счет использования низкоуглеродного водорода или аммиака в качестве судового топлива. Трубопроводные системы требуют сжатия, зачастую с применением электроэнергии, обладающей высоким углеродным следом.

В этих условиях контейнерная модель транспортировки сжиженного водорода представляет собой сбалансированное решение. Она позволяет обеспечивать длительную бездренажную транспортировку без сброса продукта в атмосферу за счет контейнера-цистерны с эффективной теплоизоляцией. Кроме того, мультимодальный характер такой логистики снижает количество циклов слива-налива продукта и тем самым предоставляет возможность контроля целостности системы на каждом этапе маршрута.

Исследование [29] подчеркивает стратегическую роль сжиженного водорода

как формы транспортировки возобновляемой энергии, особенно в условиях отсутствия развитой трубопроводной инфраструктуры. LH_2 рассматривается как опорная инфраструктура в переходе к низкоуглеродному водороду, обеспечивая логистическую гибкость и ускоряя процессы декарбонизации на ранних этапах. Он может использоваться как независимый канал импорта, элемент стратегического резерва и средство балансировки пиковых нагрузок — аналогично роли СПГ в газовой системе.

В дополнение к этому за пределами межконтинентальных маршрутов, о которых шла речь ранее, LH_2 демонстрирует преимущества и в других логистических сценариях [29]:

1. Трансграничные перевозки (например, в рамках Европейского союза): при отсутствии газопроводной инфраструктуры транспортировка LH_2 с использованием авто-, железнодорожного или внутреннего водного транспорта позволит гибко удовлетворять спрос распределенных потребителей. Такой подход рассматривается как «недостающее звено» в становлении единого водородного пространства Европы, особенно на ранних этапах масштабирования спроса.
2. Региональное распределение (до 200 км): LH_2 остается конкурентоспособным там, где требуется высокая интенсивность подачи при ограниченном пространстве. Исследование [42], рассматривающее сценарии снабжения сети ВЗС автотранспортом на 2050 год, показывает, что при расстояниях свыше 130 км именно доставка водорода в сжиженной форме оказывается наиболее предпочтительным вариантом по сравнению с другими водородными носителями — CGH_2 и LOHC. В частности, на примере Германии практика авто- и железнодорожных перевозок LH_2 давно отработана и позволяет быстро организовать так называемый «виртуальный трубопровод» между местами хранения и точками потребления без необходимости строительства новой сети. Такой подход может ускорить переход к использованию низкоуглеродного водорода в промышленности и транспортном секторе.

Таким образом, контейнерная модель доставки сжиженного водорода представляет собой устойчивое, масштабируемое и гибкое решение для трансграничной логистики. В условиях отсутствия трубопроводной инфраструктуры и высокой неопределенности раннего этапа формирования водородного рынка, именно контейнерные поставки LH_2 могут обеспечить конкурентоспособность по совокупной стоимости, адаптивность к климатическим и технологическим рискам. Такой формат способен сыграть ключевую роль в построении надежных водородных цепочек поставок как на европейском уровне, так и в рамках международной торговли.

Универсального решения для крупномасштабных трансграничных поставок водорода не существует: оптимальный носитель определяется расстоянием, масштабом и стабильностью спроса

Танк-контейнер со сжиженным водородом: гибкое решение

Одним из ключевых вызовов масштабирования водородной экономики остается ограниченность готовой инфраструктуры хранения и транспортировки, особенно в регионах, не имеющих доступа к водородным трубопроводам или специализированным терминалам. В этих условиях контейнерная логистика с использованием криогенных танк-контейнеров для сжиженного водорода приобретает стратегическое значение. Такое решение позволяет оперативно развернуть трансграничные поставки без необходимости капитальных вложений и обеспечивает высокую степень адаптивности к меняющемуся спросу.

Современное высокотехнологичное решение для транспортировки сжиженного водорода в криогенных контейнерах, создаваемое в России, опирается на уникальное инженерное наследие, сформированное в рамках ракетно-космической программы СССР. Еще в 1960–1970-е годы начались масштабные работы по созданию оборудования и технологий для применения водородно-кислородного топлива в ракетно-космической технике. Для реализации этих задач требовалась разработка транспортных средств для перевозки сжиженного водорода, новых конструкционных и теплоизоляционных материалов, обеспечивающих минимальные потери и безопасную эксплуатацию при экстремально низких температурах. Так, первые железнодорожные цистерны (например, ЖВЦ-100/ЖВЦ-100М) и автоцистерны (например, ТРЖВ-20) с многослойной вакуумной изоляцией, специализированной арматурой и системами безопасного дренажа стали основой для отечественной инженерной школы по транспортировке LH_2. В процессе многолетних НИОКР были апробированы решения по увеличению объема перевозимого водорода, снижению испаряемости, повышению устойчивости к ударным нагрузкам и управлению аварийными ситуациями, включая утечки и потерю вакуума [43].

CryoSafe-42 имеет универсальную пригодность для эксплуатации в диапазоне температур от минус 40 до плюс 50 °С, что позволяет использовать его в различных климатических условиях и при маршрутах до 15 тыс. км без потерь водорода

Примером современной адаптации накопленных компетенций служит контейнер-цистерна CryoSafe-42, разработанный компанией «Н2 Тех». В отличие от специализированных криогенных танкеров, CryoSafe-42 выполнен в формате



Контейнер-цистерна CryoSafe-42 для перевозки сжиженного водорода Источник: Н2 Инвест



Установка контейнера-цистерны на грузовую платформу Источник: Н2 Инвест

ISO-контейнера (стандарт 40-футового интермодального танк-контейнера), что обеспечивает его полную совместимость с существующей транспортно-логистической инфраструктурой — от портовых терминалов до железнодорожных платформ и автотранспорта. Такое решение позволяет обеспечить интеграцию в мультимодальные маршруты без необходимости в специализированных перегрузочных мощностях, тем самым эффективно преодолевая ограничения «первой и последней мили» в цепочках поставок.

Технические характеристики контейнера-цистерны CryoSafe-42 демонстрируют его конкурентоспособность: максимальная загрузка — до 2,9 тонны LH_2, длительное время бездренажной транспортировки — до 56 суток[8] в зависимости от степени заполнения контейнера-цистерны, возможность штабелирования до 8 ярусов, безопасность, пригодная для железнодорожной перевозки. Криогенная система теплоизоляции, многослойная экранно-вакуумная конструкция обеспечивают минимальный теплоприток и позволяют избежать неконтролируемого испарения водорода. Расчетный показатель испаряемости — менее 0,5 % в сутки, однако для транспортных цистерн основным параметром является именно время бездренажного хранения, которое может достигать рекордных сроков транспортировки при неполной загрузке.

Процесс сжижения водорода, несмотря на значительные удельные энергетические потери, может быть экономически оправдан при организации производства в регионах с низкой стоимостью электроэнергии

Контейнер-цистерна спроектирован в соответствии с комплексом международ-

[8] Максимальное время удержания водорода без потерь составляет до 56 суток при условии заполнения танк-контейнера на уровне 56 % либо до 30 суток при степени заполнения 85 %.

ных и национальных нормативов. В их числе — модельные правила ООН по перевозке опасных грузов (ST/SG/AC.10/1, МК МПОГ), а также стандарты ISO, регламентирующие конструкцию и эксплуатацию контейнеров, качество сварных соединений, материалы и процедуры обращения с жидким водородом (например, ISO 1496-3, ISO 1161:2016, ISO 14687:2019, ISO 21013-3:2016, ISO 20421-1:2019 и др.). Дополнительно учтены европейские нормы и рекомендации отраслевых ассоциаций (EIGA DOC 211/17, ДОПОГ, UIC Code 920-1 VII), американские стандарты (ASME BPVC-2019), а также соответствующие положения российских ГОСТ. Для подтверждения заявленных эксплуатационных характеристик контейнер-цистерна прошел комплекс испытаний, включая проверки устойчивости к ударным воздействиям, что подтверждает его пригодность для железнодорожных перевозок и штабелирования, а также испытания системы теплоизоляции, позволяющие верифицировать приток тепла, расчетное время удержания и допустимую протяженность маршрута транспортировки. Программа испытаний завершена под наблюдением Российского морского регистра судоходства (РМРС) и подтвердила расчетные показатели с превышением заявленных характеристик системы теплоизоляции приблизительно на 15 %.

Контейнерная модель транспортировки сжиженного водорода обеспечивает критически важную гибкость и возможность масштабирования поставок без значительных вложений и длительных сроков строительства

Кроме того, CryoSafe-42 имеет универсальную пригодность для эксплуатации в диапазоне температур от минус 40 до плюс 50 °C, что позволяет использовать его в различных климатических условиях и при мультимодальных маршрутах до 15 тыс. км без потерь водорода.



Контейнеры-цистерны для перевозки водорода Источник: Shutterstock.com

Контейнерная модель поставок сжиженного водорода активно формируется в глобальном масштабе: ключевые отраслевые игроки развивают системы на базе ISO-контейнеров, ориентированные на мультимодальную логистику. Так, компания Chart Industries (США) [44] поставляет ISO-контейнеры и решения для ожижения водорода для крупных проектов, таких как Lancaster Clean Energy Centre. Linde Engineering (Германия) [45], развивает линейку контейнеров HYLICS, в том числе модификации с азотным экраном, предназначенные для увеличения длительности хранения. Gardner Cryogenics (США) [46] проектирует контейнеры-цистерны с низким показателем испаряемости (менее 0,2 % в сутки), что, по информации компании, соответствует стандартам безопасности и энергоэффективности при перевозке крупных партий LH_2.

Развитие таких решений подтверждает актуальность контейнерного формата как гибкого логистического инструмента для трансграничных поставок. CryoSafe-42 благодаря применению экранно-вакуумной многослойной изоляции демонстрирует улучшенные характеристики по сравнению с решениями, обладающими азотным экраном, при этом соответствуя международным нормативным требованиям и стандартам мультимодальной логистики.

Контейнерная модель транспортировки сжиженного водорода обеспечивает критически важную операционную гибкость и возможность масштабирования поставок без значительных капитальных вложений и длительных сроков строительства. Благодаря совместимости с глобальной инфраструктурой ISO-контейнеров такие решения могут быть оперативно интегрированы в существующие логистические цепочки, включая порты, железнодорожные узлы и автотранспорт.

На ранних этапах развития трансграничной водородной торговли танк-контейнеры формата ISO позволяют обеспечить поставки в условиях неопределенности спроса, дефицита инфраструктуры и ограниченного числа крупных терминалов. В долгосрочной перспективе они способны дополнять капиталоемкие системы (включая специализированные криогенные танкеры и водородные трубопроводы), снижая барьеры входа для новых участников рынка.

Аналогично опыту становления СПГ-рынка контейнерная модель может применяться для спотовых поставок, тестирования маршрутов, подключения удаленных потребителей и обеспечения логистической устойчивости. В результате такие решения становятся важным элементом гибкой, поэтапно разворачиваемой и технологически нейтральной глобальной системы водородных поставок.



Автоперевозка контейнера-цистерны CryoSafe-42 Источник: H2 Инвест

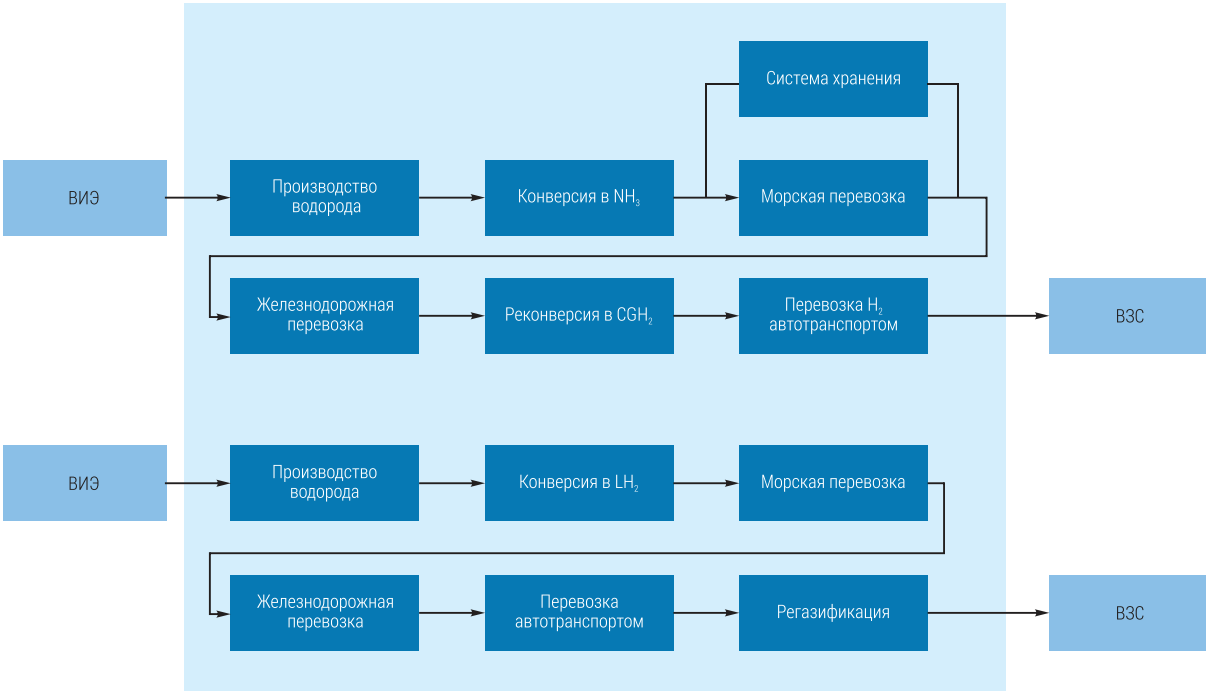


Рис. 8. Границы системы, рассматриваемой в расчетах

Источник: составлено авторами

Сценарный кейс: конкурентоспособность контейнерной модели

Целью расчетной части настоящего исследования является межтехнологическое сравнение танк-контейнерной цепочки поставок жидкого водорода и аммиачной цепочки с последующим крекингом на основе сопоставимых границ системы с оценкой конкурентоспособности по приведенной удельной стоимости низкоуглеродного водорода (LCOH).

Рассматривается полная цепочка поставки водорода от этапа производства методом электролиза на основе электроэнергии из ВИЭ до подготовки к конечному использованию на площадке потребителя: (i) электролиз; (ii) конверсия — сжижение водорода либо синтез аммиака; (iii) портовая обработка: для контейнерной цепочки LH_2 — только операции терминальной обработки контейнеров, для аммиачной — буферное хранение и перевалочные операции; (iv) морская перевозка — в танк-контейнерах с жидким водородом либо наливом в аммиачном танкере; (v) реконверсия — регазификация LH_2 с последующим доведением водорода до параметров подачи или крекинг NH_3 с очисткой и компрессией водорода; (vi) последующая дистрибуция до точки потребления (рис. 8). Настоящее исследование не включает оценку жизненного цикла продукта в части выбросов парниковых газов. Вместе с тем в расчетах заданы допущения, предусматривающие использование технических и транспортно-логистических решений с потенциально более низкой углеродоемкостью (в том числе электрифицированный процесс Габера — Боша, крекинг на смеси NH_3/H_2 в роли топлива, применение низкоуглеродных топлив на отдельных транспортных плечах[9] и пр.).

В отличие от исследований, ограничивающих границы системы «до порта прибытия», в настоящем исследовании последняя миля включена в расчетные границы. Этот участок является важным звеном цепочки создания стоимости с собственными требованиями к инфраструктуре передачи, хранения и распределения.

Расчет выполнен при допущении доступности и промышленной применимо-

[9] Для морского плеча использован специализированный ценовой ориентир на судовое низкоуглеродное топливо BIO Global 4 Ports Average по данным S&B, что обусловлено спецификой рынка бункеровки; для автомобильного и железнодорожного плеча принят единый общеевропейский ориентир FAME 0 FOB ARA по данным Argus как более релевантный индикатор биодизельной составляющей для сухопутных сегментов.

сти рассматриваемых технологических решений и наличии спроса на водород, произведенный с помощью электроэнергии из ВИЭ, в транспортном секторе. Исходные параметры получены из трех типов источников: (i) коммерческие предложения и техническая документация (электролиз, сжижение водорода, танк-контейнер); (ii) экспертные оценки и консультации профильных специалистов отрасли[10]; (iii) технические отчеты профильных организаций (регазификация LH_2 и транспортные средства; воздухоразделительная установка (ВРУ), синтез и крекинг NH_3, стационарные хранилища, морская и наземная перевозка NH_3). Часть параметров отражает реальные установки (в том числе малых/средних мощностей), тогда как по узлам без коммерческих аналогов применены модельные схемы из литературы (например, крекинг NH_3) с допущениями[11]. Наращивание мощности осуществлялось тиражированием базовых модулей с фиксированными удельными параметрами, эффекты масштаба и кривые обучения не учитывались.

Расчеты выполняются для 1 кг подготовленного к конечному использованию H_2 (LHV) в точке потребления. Приведенная удельная стоимость включает капитальные и операционные затраты всех звеньев в границах системы, а также затраты на дополнительный объем продукта, необходимый для компенсации потерь и покрытия внутренних технологических расходов по цепочке поставки. Потери и собственное потребление учитывались через увеличение требуемого объема продукта в пределах принятых границ системы. В аммиачной цепочке расход носителя на стадии крекинга[12], а при поставке LH_2 в танк-контейнерах потери на испарение при наполнении и опорожнении приняты по опубликованным данным [9], тогда как расход

Ускоренное развитие портовой инфраструктуры становится необходимым условием обеспечения рынка ЕС водородом, особенно в контексте реализации плана REPowerEU и пакета Fit for 55

носителя на захолаживание[13] определен на основе экспертной оценки авторов с учетом особенностей технологии танк-контейнерной перевозки LH_2. Стоимости приведены к сопоставимым ценам 2024 года методом эскалации отраслевым индексом CEPCI [47] с валютной конвертацией; географические коэффициенты локализации не применялись.

Цена электроэнергии принимается постоянной в пределах каждой локации, при этом предполагается устойчивая дифференциация между местом производства и местом потребления. На производственной стороне (электролиз и конверсия) в качестве базового допущения используется проектный ориентир стоимости возобновляемой электроэнергии для Марокко, основанный на ставке долгосрочного договора купли-продажи электроэнергии (PPA)[14]. На стороне потребления (реконверсия) применяется сетевая цена электроэнергии для крупных индустриальных потребителей Германии[15].

Кейс предполагает мультимодальный формат поставки 100 тыс. т H_2 в год в сеть из 270 ВЗС (1 т H_2 в сутки на ВЗС). Первый

[10] Для оценки отдельных параметров и верификации исходных данных.

[11] В отчетах профильных организаций (в том числе JRC, Deloitte) для транспортных/инфраструктурных звеньев широко используются техническая документация производителей и отраслевые справочники, тогда как параметры конверсии/реконверсии нередко основаны на литературных референсах меньших мощностей с последующим масштабированием; соответственно, не все стоимости относятся к реально построенным крупным установкам.

[12] В диаграмме структуры LCOH соответствующие затраты отнесены к доле стадии крекинга.

[13] Количество целевого продукта, необходимое для охлаждения системы до рабочей температуры. Для жидкого водорода может относиться к энергетическим потерям с возможностью повторного ожижения при использовании дополнительного оборудования.

[14] В качестве ценового ориентира для Марокко использованы параметры предложения по проектам Noor Midelt II/III для конфигурации фотоэлектрической генерации в сочетании с системой накопления энергии (по данным MEED, декабрь 2024); пересчет в доллары выполнен по среднегодовому обменному курсу за 2024 год.

[15] Цена принята по данным Eurostat (nrg_pc_205), категория band IG, без налогов, за II полугодие 2024 года; значения переведены в доллары по среднему обменному курсу за тот же период.

участок маршрута — международное морское плечо от порта Джорф Ласфар (Марокко) до порта Гамбург (около 3220 км в одну сторону). Далее водород распределяется в пределах 500 км: 400 км по железной дороге и 100 км автотранспортом (рис. 9). На стороне ВЗС водород должен соответствовать требованиям по чистоте и давлению, которые предъявляются к заправке водородного транспорта (газообразное состояние, давление 50 МПа). Аммиак подвергается реконверсии (вместе с очисткой и компрессией) на конечной железнодорожной станции.

Расчет технологических звеньев выполняется по единому алгоритму. Исходя из требуемого годового объема водорода, скорректированного в соответствии с принятыми допущениями, и режима эксплуатации оборудования 8424 ч/год, рассчитывается необходимая часовая производительность целевого потока для соответствующего передела. По этой производительности и паспортным/литературным данным подбираются тип и количество ключевых технологических единиц (в частности, для производства водорода — электролизеры с учетом однократной замены стека; для конверсии — установки сжижения либо ВРУ совместно с электрифицированным синтезом NH_3). Вклад передела в LCOH определяется как сумма ежегодной доли капитальных вложений (CAPEX, распределенный на 20 лет) и ежегодных операционных расходов, деленная на годовой выпуск водорода.

Морские перевозки, несмотря на более высокую энергоемкость, потенциально могут быть декарбонизированы за счет использования низкоуглеродного водорода или аммиака в качестве судового топлива

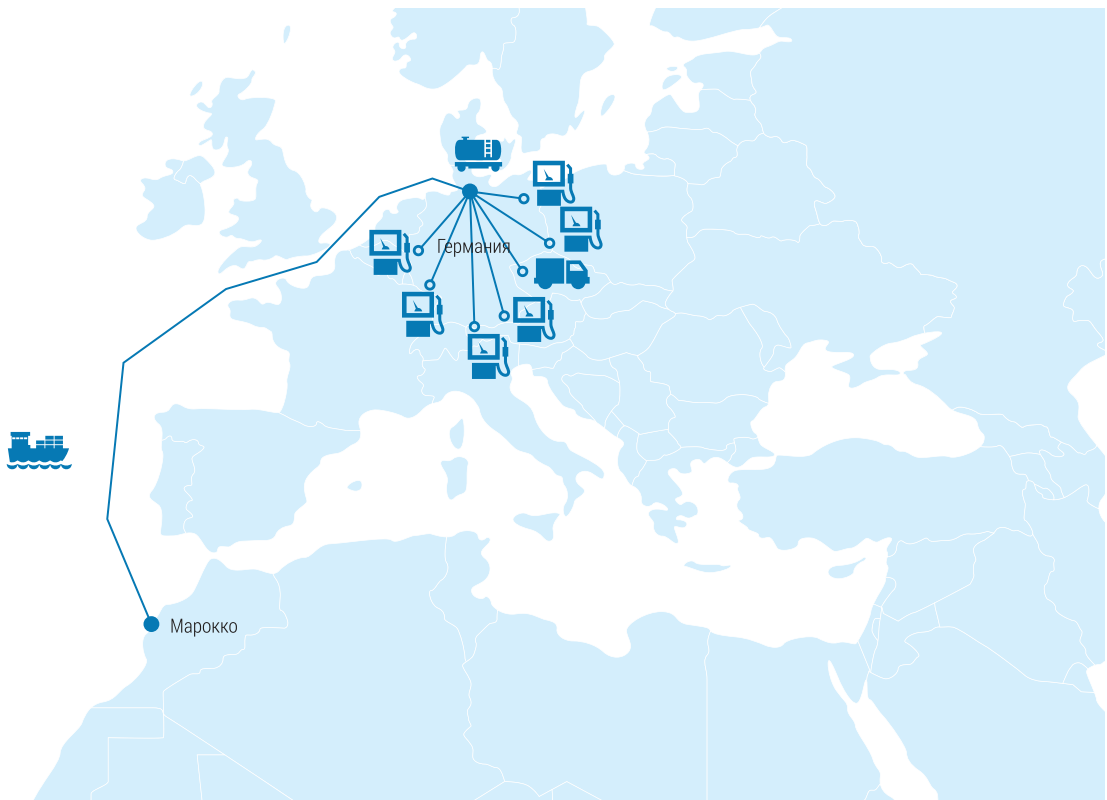


Рис. 9. Схематическое изображение маршрута

Источник: составлено авторами

В состав затрат на оборудование, описанное в технической документации, дополнительно включается строительство производственной площадки, а также доставка, монтаж и пусконаладочные работы (на уровне 10 % от CAPEX). Для затрат из литературных источников применяется правило полноты CAPEX: при неполных оценках уровня ISBL/TDC (оборудование с монтажом в пределах технологических границ) дополнительно учитываются доставка и пусконаладочные работы на уровне около 5 % от CAPEX; при указании полных капитальных затрат дополнительные надбавки не применяются. Необходимые ресурсы (в том числе электроэнергия и вода) учитываются по паспортным и литературным данным по удельным расходам оборудования. Кроме того, учитываются затраты на эксплуатационный персонал, а затраты на страхование в расчеты не включались ввиду отсутствия сопоставимых данных по всем типам объектов.

Моделирование логистики контейнерной цепочки LH_2, включая определение времени удержания и оптимальной степени наполнения танк-контейнера, выполняется на основе годовой потребности в поставках и продолжительности маршрута доставки (кругорейса), определяемой прежде всего временем транспортировки, накопления необходимого количества контейнеров в местах перевалки и погрузочно-разгрузочных операций. Эксплуатационные скорости фиксированы: для автодорожного и железнодорожного плеч — 50 км/ч, для морского плеча — 16 уз; в соответствии с IMDG Code (UN 1966) контейнеры размещаются на верхней палубе, размер судовой партии принят 150 танк-контейнеров. По времени отсутствия контейнера на станции налива и суточного объема наполнения рассчитывается требуемый оборотный парк порожних контейнеров. Стоимость морского плеча оценивается по индексу XSICFENE[16] с учетом надбавки за опасный груз и погрузо-разгрузочных операций; удельная стоимость определяется делением совокупных затрат на массу перевезенного LH_2.

Дополнительная стоимость оснащения крупнотоннажного газовоза оборудованием для перевозки аммиака составляет порядка 1–1,5 млн долл. по сравнению с типовым судном класса VLGC

Моделирование логистики контейнерной цепочки, включая определение времени удержания и оптимальной степени наполнения контейнера, выполняется на основе годовой потребности в поставках и продолжительности маршрута доставки

Параметры железнодорожного плеча (доставка на 400 км) выводятся из частоты прибытия судов, длины состава и длительности цикла, что задает количество платформ, потребность в локомотивах и расход топлива; для автомобильного плеча потребность в тягачах и полуприцепах-контейнеровозах определяется по частоте прибытия поездов.

Исходной величиной для транспортного модуля аммиачной цепочки служит поток NH_3 на экспортном терминале. Для сглаживания графика закладывается буфер на стороне отправления в объеме загрузки одного танкера. Продолжительность кругорейса определяется длительностью марш-

[16] Использовано значение индекса XSICFENE (Xeneta Shipping Index, Far East to North Europe) (по данным Compass на 08.10.2025); в расчете выделяется топливная составляющая ценового ориентира, представленная бункерной надбавкой (BAF), которая пересчитывается пропорционально отношению цены биотоплива к цене базового судового топлива при неизменности нетопливной части. Значения BAF и цены базового судового топлива приняты по данным Maersk.



Судно HD Hyundai Heavy на аммиаке Источник: en.portnews.ru

рута доставки в танкерах, скоростями налива/слива и терминальными операциями (степень заполнения судна ограничивается 85 % по требованиям безопасности). На этой основе рассчитываются провозная способность единицы флота и требуемое количество танкеров. На импортной стороне задается аммиачное хранилище исходя из целевого уровня запаса и графика разгрузки/отгрузки, что определяет суммарную вместимость и число резервуаров. При этом для экспортного узла Джорф Ласфар портово-терминальная инфраструктура аппроксимируется затратами на системы хранения, что обусловлено наличием действующей промышленно-портовой базы, тогда как для импортного узла в Гамбурге, помимо резервуаров, дополнительно учитывается ограниченная надбавка на адаптацию существующего перевалочного узла[17], что связано с формированием специализированной инфраструктуры импорта аммиака на базе существующей площадки[18].

Внутреннее распределение NH_3 выполняется железнодорожным транспортом: по числу наливных/сливных постов и вместимости цистерны 55,12 т определяется суточный поток отправок; при длине состава 43 цистерны и заданной длительности цикла выводятся требуемый парк цистерн и локомотивов, а также расчетное потребление топлива. Стоимость железнодорожного плеча рассчитывается как отношение совокупных затрат на задействованные транспортные средства (включая эксплуатационные расходы) к массе перевезенного аммиака. Реконверсия аммиака выполняется на пяти приемных железнодорожных терминалах. Последний участок маршрута, ведущий к сети из 270 ВЗС, обеспечивается MEGC при 50 МПа, часть MEGC используется для временного хранения с целью поддержания целевого запаса. Итоговый вклад транспортной составляющей в LCOH определяется суммированием удельных приведенных затрат морского, железнодорожного и автомобильного участков.

[17] Для указанной надбавки принята ориентировочная оценка затрат на дооснащение существующего причала средствами перевалки аммиака по материалам H2Uppp / PtX Hub (исследование для RWE, 2025).

[18] Такая постановка позволяет более реалистично отразить различия в степени инфраструктурной готовности экспортного и импортного узлов рассматриваемого маршрута.

Важно отметить, что ввиду ограниченного числа реализованных проектов требуемых масштабов основные параметры аммиачной цепочки поставок и отдельные данные для танк-контейнерной цепочки заданы на основе технических отчетов, научно-технической литературы и инженерных допущений и, соответственно, имеют повышенную неопределенность.

В описанном сценарии доставки к сети ВЗС контейнерная цепочка LH_2 демонстрирует явное ценовое преимущество: 6 долл. / кг H_2 против 7,37 долл. / кг H_2 для аммиачной цепочки с крекингом (рис. 10). По нашим расчетам, разрыв, вероятнее всего, обусловлен сочетанием нескольких факторов: (i) требуемые на стороне ВЗС чистота и давление существенно увеличивают затраты на стадию реконверсии аммиака, (ii) в силу этих требований финальная дистрибуция после крекинга осуществляется в форме CGH_2, что при прочих равных приводит к большей потребности в транспортных единицах (из-за меньшей объемной плотности по сравнению с LH_2) и, как следствие, к более высоким удельным издержкам на транспорт и тару. При этом контейнеры следуют от экспортного терминала непосредственно к ВЗС без промежуточных операций опорожнения/наполнения, что снижает операционную сложность по сравнению с наливными схемами. При этом капитальные затраты на парк танк-контейнеров не становятся определяющим фактором итоговой стоимости поставки и не нивелируют выявленное ценовое преимущество контейнерной цепочки LH_2.

Дополнительным преимуществом транспортировки водорода в танк-контейнерах является возможность обеспечения поэтапного наращивания мощностей (через увеличение парка танк-контейнеров), что может снижать риск недозагрузки капиталоемких узлов по сравнению с крекинговыми установками фиксированной мощности. Использование стандартизованных танк-контейнеров, как правило, повышает операционную гибкость и перераспределяемость между маршрутами и узлами, что способно смягчать колебания спроса и снижать риски ограничений пропускной способности и связанных простоев на тер-

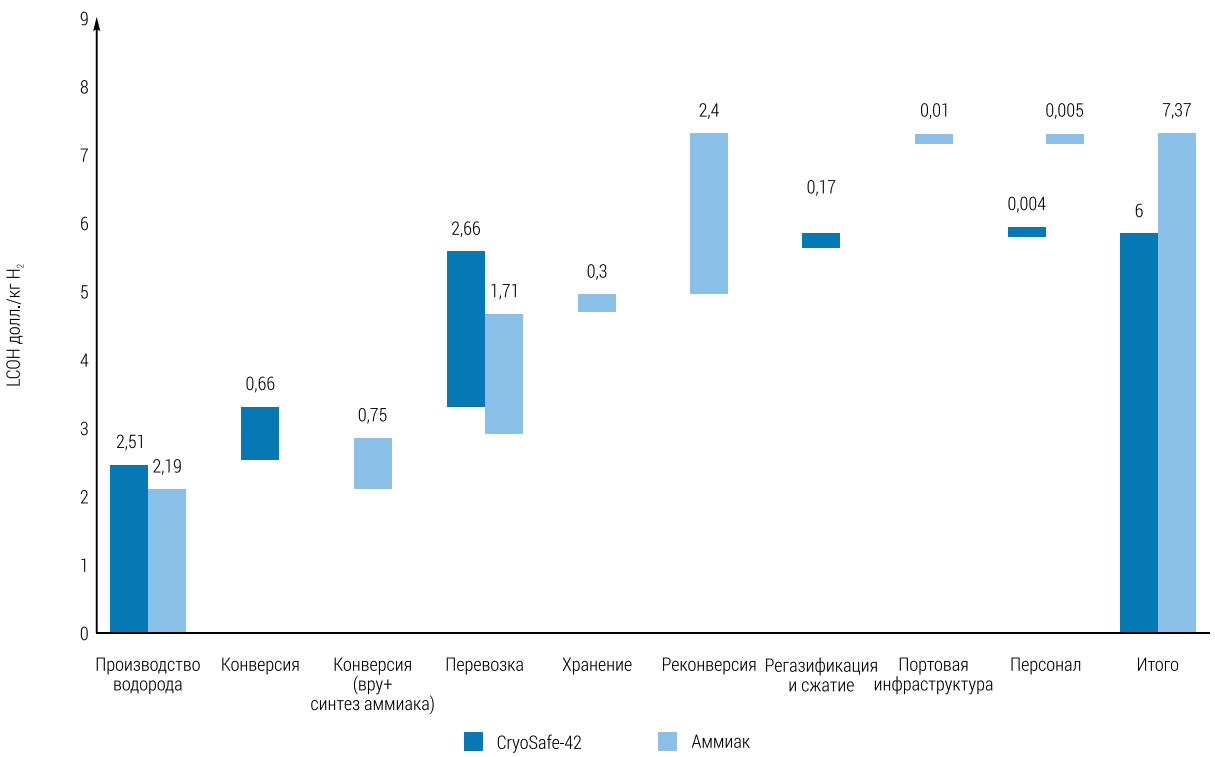


Рис. 10. Расчетные LCOH (долл. / кг H_2) для танк-контейнерной и аммиачной цепочек поставок водорода в рассматриваемом кейсе

Источник: составлено авторами



Порт Джорф-Ласфар, Марокко

Источник: commons.wikimedia.org

миналах и транспортных плечах. Отсутствие у конечного потребителя токсичного носителя и стационарных крекинговых мощностей может способствовать упрощению разрешительных процедур и требований промышленной безопасности, что потенциально сокращает сроки реализации и сопутствующие косвенные издержки. Кроме того, танк-контейнеры могут использоваться как краткосрочный промежуточный буфер на ВЗС, что в отдельных конфигурациях уменьшает потребность в стационарных резервуарах и повышает устойчивость поставок при вариациях нагрузки.

В рассматриваемой конфигурации уровень цены электроэнергии на стороне потребления выступает значимым фактором формирования итоговой стоимости, прежде всего, для аммиачной цепочки: реконверсия требует значимых энергетических затрат и выполняется в зоне более высокой стоимости электроэнергии из сети, чем на стороне производства. Это системно повышает LCOH для транспортировки водорода в виде аммиака по сравнению с жидким водородом в танк-контейнерах, где энергоемкие стадии приходятся на площадку с низкой стоимостью электроэнергии из ВИЭ.



Судно HD Hyundai Heavy на аммиаке

Источник: en.yna.co.kr

Следует учитывать, что рассматриваемый маршрут через порт Джорф Ласфар отражает относительно благоприятную с инфраструктурной точки зрения конфигурацию аммиачной цепочки, поскольку основан на использовании уже существующей промышленной и портовой базы. Соответственно, для более капиталоемких конфигураций, связанных с освоением новых экспортных площадок и созданием (или существенным расширением) портово-терминальной инфраструктуры, издержки аммиачной логистики, вероятно, будут выше, чем в рассматриваемом сценарном кейсе.

Представленные значения являются репрезентативными для рассматриваемой конфигурации и получены на основе принятых в модели допущений по технологиям, логистике и ценовым уровням. Поскольку стоимость электроэнергии из ВИЭ относится к числу ключевых параметров, определяющих итоговую стоимость поставки низкоуглеродного водорода, дополнительно проверена чувствительность результатов к ее изменению в диапазоне ±30 % относительно принятого базового значения. Анализ показал, что изменение данного параметра заметно влияет на абсолютные значения LCOH, однако не приводит к изменению общего сравнительного вывода о ценовом преимуществе варианта транспортировки жидкого водорода в танк-контейнерах по сравнению с аммиачной цепочкой. Учитывая, что часть технологических решений еще не развернута в полном промышленном масштабе и данные по затратам/режимам эксплуатации ограничены, отдельные параметры подлежат уточнению по мере появления верифицированных эмпирических данных.

Заключение

Географический разрыв между зонами низкой стоимости электроэнергии из ВИЭ и центрами спроса на низкоуглеродный водород обусловливает необходимость формирования надежной трансграничной логистики. На фоне дефицита готовой инфраструктуры, высокой капиталоемкости трубопроводов и портовых терминалов и сложностей первой и последней мили сохраняется риск формирования логистических «узких мест».



Прототип газовоза по перевозке водорода Источник: aa-w Depositphotos.com



Водородная возобновляемая энергия
Источник: Shutterstock.com

Универсального решения для крупномасштабных трансграничных поставок водорода не существует: оптимальный носитель определяется расстоянием, масштабом и стабильностью спроса, требованиями к форме конечного продукта и его чистоте, наличием инфраструктуры, сроками развертывания, профилем энергетических потерь и пр.

В период с 2025 по 2035 год формируется зачаточная система трансграничной торговли водородом (десятки коридоров и рост объемов), однако дефицит готовой инфраструктуры, стандартизации и стимулирования спроса сохраняет высокую неопределенность. Для ЕС импорт, по всей вероятности, станет значимой составляющей обеспечения спроса на низкоуглеродный водород: это потребует ускоренного развития портовой и терминальной инфраструктуры и связанной внутриконтинентальной логистики. На этом фоне модульные решения, способные работать при частичной готовности инфраструктуры, приобретают особое значение.

Транспортировка сжиженного водорода в контейнерах-цистернах формирует самостоятельную логистическую платформу: позволяет поставлять чистую форму водорода без энергоемкой химической реконверсии, обладает модульностью и мультимодальной совместимостью, закрывает барьеры первой и последней мили и поддерживает распределенный спрос; при этом наливной LH_2 в специализированных танкерах требует значительных капитальных затрат и внедрения систем управления испарением. В совокупности транспортировка LH_2 контейнерами-цистернами выступает комплементарным «мостовым» решением к трубопроводам и наливным форматам на ранней стадии рынка.

Практическая реализуемость подтверждается такими решениями, как CryoSafe-42, ключевые характеристики которого включают мультимодальность (включая железнодорожный транспорт), длительное бездренажное хранение и работу в широком климатическом диапазоне. При этом соответствие международным и национальным нормам снижает регуляторные барьеры и ускоряет интеграцию в мультимодальные цепочки поставок.

В моделируемой конфигурации (единые границы системы, включая последнюю милю) расчетного сценарного кейса перевозка сжиженного водорода в контейнерах-цистернах демонстрирует более низкую стоимость при заданных условиях относительно транспортировки водорода в форме аммиака: ключевые причины — отсутствие энергоемкого этапа реконверсии на стороне потребления и более эффективная финальная дистрибуция без перехода в CGH_2.

К приоритетным направлениям дальнейших исследований относятся калибровка модели по мере появления эксплуатационных данных реальных установок, уточнение стоимостных параметров с учетом эффектов масштаба, расширение анализа чувствительности по другим ключевым параметрам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. *Global Hydrogen Review 2025 // IEA, 2025. URL: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025.*
2. *Gomonov K., Permana C. T., et al. The growing demand for hydrogen: current trends, sectoral analysis, and future projections // Unconventional Resources. Vol. 6. April 2025. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100176.*
3. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe // European Commission, 2020. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf#:~:text=The%20role%20of%20infrastructure%20A,Transport%20can%20happen%20as.*
4. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – REPowerEU Plan // European Commission, 2022. URL:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230#:~:text=To%20facilitate%20the%20import%20of,facilitate%20the%20imports%20of%20green.*
5. *Wijk A., Westphal K., et al. How to deliver on the EU Hydrogen Accelerator // AHP, Dii Desert Energy, et al. May 2022. URL: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/05/How-to-deliver-on-the-EU-Hydrogen-Accelerator_Final.pdf.*
6. *Hydrogen transportation – The key to unlocking the clean hydrogen economy // Roland Berger, 2021. URL: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_hydrogen_transport.pdf.*
7. *Hydrogen Insights 2024 // Hydrogen Council, McKinsey & Company, September 2024. URL: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2024/09/Hydrogen-Insights-2024.pdf.*
8. *Global Hydrogen Compass 2025 // Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2025. URL: https://compass.hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2025/09/Hydrogen-Council-Global-Hydrogen-Compass-2025.pdf.*
9. *Cebolla O., Dolci R., et al. Assessment of hydrogen delivery options // Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. https://doi.org/10.2760/869085, JRC130442.*
10. *Techno-economic Realities of Long-Distance Hydrogen Transport // CATF, September 2023. URL: https://www.catf.us/resource/techno-economic-realities-long-distance-hydrogen-transport/.*
11. *Day P. Hydrogen uses to be determined by delivery methods // Reuters, October 2022. URL: https://www.reuters.com/business/energy/hydrogen-uses-be-determined-by-delivery-methods-2022-10-12/#:~:text=%E2%80%9CEveryone%20focuses%20on%20hydrogen%20production,the%20Roland%20Berger%20consulting%20firm.*
12. *Path to hydrogen competitiveness – A cost perspective // Hydrogen Council, January 2020. URL: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf#:~:text=and%20then%20distribute%20it%20via,highly%20competitive%20once%20the%20industry.*
13. *Next Generation Fuel Cell Truck: Development Vehicles Demonstrate Performance in High Summer Temperatures in the Alps // Daimler Truck, Sept 2025. URL: https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/next-generation-fuel-cell-truck-development-vehicles-demonstrate-performance-in-high-summer-temperatures-in-the-alps-53195980.*
14. *China Unveils 'Track 1000' Liquid Hydrogen System for Trucks, Breaking 1,000 Km Barrier Without Refueling // Fuel Cells Works, March 2025. URL: https://fuelcellsworks.com/2025/03/21/clean-energy/china-unveils-track-1000-liquid-hydrogen-system-for-trucks-breaking-1-000km-barrier-without-refueling.*
15. *Foton Unveils New Beacon Concept Truck // China Trucks, January 2025. URL: https://m.chinatrucks.org/news/10970.html.*
16. *Ishkov A., Nesterov N., Romanov K., et al. Risks of using the gas transportation system for hydrogen energy // Engineering Policy. 193(2):56-67, 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/379001756_Riski_ispolzovania_gazotransportnoj_sistemy_dla_vodorodnoj_energetiki_Risks_of_using_the_gas_transportation_system_for_hydrogen_energy.*
17. *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal – Part II Tecnology review of hydrogen carriers // IRENA, 2022. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf.*
18. *Staiß, Frithjof, et al. Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030 // Materialien des Akademienprojekts "Energiesysteme der Zukunft", November 2022. URL: https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/materialien/transportoptionen-wasserstoff-2030.*
19. *Weichenhain U., Schmitt C. Is solid-state storage the missing ingredient in hydrogen transport? // Roland Berger, January 2024. URL: https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Is-solid-state-storage-the-missing-ingredient-in-hydrogen-transport.html.*
20. *European Hydrogen Backbon – a European hydrogen infrastructure vision covering 28 countries // Amber Grid, Bulgartransgaz, et al., April 2022. URL: https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf.*
21. *Wendlinger C., Kigle S., et al. Wasserstofftransport: Analyse der Prozessketten, Kostenbewertung und gegenüberstellender Vergleich // FfE, April 2025. URL: https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/wasserstofftransport-analyse-der-prozessketten-kostenbewertung-und-gegenueberstellender-vergleich/.*

22. Horita R. Large-scale hydrogen infrastructure: Europe ahead of rest of the world in planning // Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report, January 2025. URL: https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/__icsFiles/afieldfile/2025/03/19/2501_j_horita_e.pdf.
23. Ammoniak – Transport per Schiff // Factsheet – Wasserstoff Infrastruktur roadmap, 2025. URL: https://www.transhyde.de/infrastruktur/ammoniak/nachteile.
24. Spatolisano E., Pellegrini L. Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier: NH3 Cracking to H2 // Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62, 28, 10813–10827. URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.3c01419.
25. Market Study & Location Assessment for Green Ammonia Production in India // Deloitte, May 2023. URL: https://energyforum.in/fileadmin/india/media_elements/publications/20230515_GNH3_Deloitte_Study/20230707_gs_GNH3_finalprint.pdf.
26. Green hydrogen: Energizing the path to net zero // Deloitte, 2023. URL: https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/green-hydrogen.html.
27. Parkes R. "Big wave" of orders for huge ammonia tankers underway – but will any of them ever carry NH3? // HydrogenInsight, January 2024. URL: https://www.hydrogeninsight.com/transport/hydrogen-export-big-wave-of-orders-for-huge-ammonia-tankers-underway-but-will-any-of-them-ever-carry-nh3-/2-1-1578513.
28. Sterner M., Hofrichter A. 19 Import options for green hydrogen and derivatives – An overview of efficiencies and technology readiness levels // International Journal of Hydrogen Energy, vol. 90, November 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924042368.
29. Alekseev A., et al. Hydrogen liquefaction, storage, transport and application of liquid hydrogen // Flagship Project TransHyDE, 2023. https://doi.org/10.5445/IR/1000155199.
30. The Suiso Frontier // HESC, 2025. URL: https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/.
31. A pioneering effort in efficient hydrogen transport: Kawasaki Heavy Industries powers innovations toward sustainable future // Hydrogen Council, September 2024. URL: https://hydrogencouncil.com/en/a-pioneering-effort-in-efficient-hydrogen-transport-kawasaki-heavy-industries-powers-innovations-toward-sustainable-future/.
32. Emerging trade corridors for hydrogen and its derivatives // Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2024.
33. The structures of the emerging international hydrogen trade // H2-Diplo, May 2023.
34. Global Hydrogen Flows – 2023 Update // Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2023.
35. Learnbook: hydrogen imports to the EU market // European Clean Hydrogen Alliance, November 2023. URL: https://www.entsog.eu/sites/default/files/2024-01/LEARNBOOK--%20HYDROGEN%20IMPORTS%20TO%20THE%20EU%20MARKET_update%20Jan%202024.pdf.
36. Schenk O. Hydrogen Import Study // Interview with Patrick Zimmerman, Fraunhofer CML, January 2025. URL: https://www.erneuerbare-energien-hamburg.de/en/news/details/hydrogen-import-study.html.
37. Update 2024: Greenhouse gas savings and the associated hydrogen demand in Germany // Nationaler Wasserstoffrat, May 2024. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/EN/2024/2024-05-03_NWR-White_paper_Update_2024_hydrogen_demands.pdf.
38. European Hydrogen Backbon – Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen // Creos, DESFA, et al., June 2021. URL: https://ehb.eu/files/downloads/EHB-Analysing-the-future-demand-supply-and-transport-of-hydrogen-June-2021-v3.pdf.
39. Ahluwalia R. K., Peng J.-K. Liquid hydrogen storage system for heavy duty trucks: Capacity, dormancy, refueling, and discharge // International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 48, is. 87, October 2023. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923024084.
40. Ahluwalia R. K., Roh H.-S. Liquid hydrogen storage system for heavy duty trucks: Configuration, performance, cost, and safety // International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 48, is. 35, April 2023. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922058700.
41. Arrigoni A., Dolci F., Ortiz Cebolla R., et. al. Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe // Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2024. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137953.
42. Reuß M., Dimos P., et. al. Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050 // Energies 2021, 14, 3166. URL: https://doi.org/10.3390/en14113166.
43. Черемных О. Я. Создание, совершенствование конструкции, перспектива развития транспортных средств для жидкого водорода // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 3. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1602.
44. Chart Industries awarded order for hydrogen liquefier, liquid hydrogen transports and ISO containers from Element Resources // Storageterminalsmag, March 2024. URL: https://storageterminalsmag.com/chart-industries-awarded-order-for-hydrogen-liquefier-liquid-hydrogen-transports-and-iso-containers-from-element-resources/.
45. Liquefied Hydrogen Tank Solutions // A Linde Company, 2025. URL: https://www.linde-engineering.com/products-and-services/plant-components/liquefied-hydrogen-tank-solutions.
46. Hydrogen Products // Gardner Cryogenics, 2025. URL: https://www.gardnercryo.com/hydrogen-products/.
47. Maxwell C. Cost Indices // Towering Skills, August 2025. URL: https://toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/.

УДК 66.07 DOI 10.46920/2409-5516_2026_6221_118 EDN TRGLEP

Состояние и перспективы развития газохимического сектора экономики

Current State and Development Prospects of the Gas-Chemical Sector of the Economy

Андрей МИХАЙЛОВ
Начальник центра ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к. т. н.

Andrey MIKHAILOV
Head of Center of Gazprom VNIIGAZ LLC, PhD in Engineering

Денис ГОЛДОБИН
Младший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Denis GOLDOBIN
Junior Researcher of Gazprom VNIIGAZ LLC

Иван СКРЫПНИКОВ
Младший научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Ivan SKRYPNIKOV
Junior Researcher of Gazprom VNIIGAZ LLC

Александр ИШКОВ
Советник заместителя Председателя Правления — начальника Департамента ПАО «Газпром», ученый секретарь ООО «Газпром ВНИИГАЗ», профессор кафедры ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития» Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева, д. х. н.

Aleksandr ISHKOV
Advisor to the Deputy Chairman of the Management Committee — Head of Department of Gazprom PJSC, Scientific Secretary of Gazprom VNIIGAZ LLC, Professor at the UNESCO Chair “Green Chemistry for Sustainable Development”, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Grand PhD in Chemistry

Аннотация. В статье проведен аналитический обзор текущего состояния и ближайших перспектив развития крупнотоннажной газохимии в рыночных и технологических аспектах, по результатам которого определено, что для обеспечения диверсификации производства и возможности адаптации к изменениям на рынке в условиях глобальных трансформаций целесообразно реализовать гибкий технологический подход. Технологические процессы могут быть объединены в рамках мегатоннажных производственных комплексов с выпуском продуктов высоких переделов. Такие производства должны быть обеспечены доступным сырьем, хорошим экспортным потенциалом и возможностью длительного подземного хранения больших объемов углекислого газа. Технологической основной мегатоннажных производственных комплексов могут быть современные водородные технологии, базой которых является окислительная конверсия природного газа. Данный уровень развития окислительной конверсии природного газа может обеспечить низкоуглеродность производимой продукции.

Для поддержания рыночной эффективности таких производственных комплексов должна сохраняться возможность регулировать тоннажность производственных процессов за счет изменения производительности по отдельным продуктам для формирования оптимальной продуктовой корзины. Такой подход позволит реализовать конкурентные преимущества отечественной газохимической продукции на горизонте 30–50 лет.

Ключевые слова: природный газ, метан, аммиак, метанол, газохимия

Abstract. This article provides an analytical review of the current state and immediate development prospects of the large-scale gas chemical industry, covering both market and technological aspects. The results indicate that a flexible technological approach is advisable to ensure production diversification and the ability to adapt to market changes in the context of global change. Technological processes can be integrated within megatonnage production complexes producing high-value-added products. Such production facilities must be equipped with readily available feedstock, good export potential, and the ability to store large volumes of carbon dioxide in underground storage for long periods. Modern hydrogen technologies based on the oxidative conversion of natural gas can serve as the technological backbone of megatonnage production complexes. This level of development in oxidative conversion of natural gas can ensure low-carbon products.

To maintain the market efficiency of such production complexes, it is essential to maintain the ability to adjust the tonnage of production processes by varying the throughput of individual products to create an optimal product mix. This approach will enable the realization of the competitive advantages of domestic gas chemical products over a 30–50-year horizon.

Keywords: natural gas, methane, ammonia, methanol, gas chemicals

Введение

Среди вызовов, влияющих на развитие мировой экономики, можно выделить несколько основных, которые формируют тенденции в газохимии. Глобальные изменения в экономике не позволяют продолжать развитие в рамках единой парадигмы и взаимовыгодного сотрудничества. Это приводит к обострению конкуренции не только в финансово-экономической и политической сферах, но и в научно-технологической. В результате формируются различные пути технологического и экономического развития. Единая мировая экономика демонстрирует тенденцию к формированию локальных центров. Драйверами формирования таких центров могут служить как традиционные экономические стимулы, так и стремление к декарбонизации и «зеленая» повестка.

Возникшие мировые вызовы и изменения мирового топливно-энергетического и сырьевого секторов находят свое отражение в системообразующих государственных процессах. В Энергетической стратегии Российской Федерации до 2050 года (далее — Стратегия) водород рассматривается не только как базовое сырье большого количества газохимических процессов, но и как перспективный энергоноситель. В Стратегии поставлены задачи по разработке отечественных низкоуглеродных технологий производства водорода и энергетических смесей на его основе, к которым в числе прочего относится аммиак, а также задачи по развитию инжиниринга водородных технологических решений.

Объем мирового рынка основных крупнотоннажных продуктов газохимии вырос с 2022 года более чем в три раза, до 205 млрд долларов. Прирост связан с увеличением мирового оборота карбамида и аммиака

Развитие водородной энергетики приведет к появлению рыночного спроса на этот газ, что в свою очередь вызовет увеличение спроса на водород и продукты его переработки. При этом сектор новой энергетики и смежных областей будет характеризоваться все более стремительным ростом из-за кумулятивного эффекта от увеличивающегося количества бенефициаров, заинтересованных научных и технологических организаций, а также нарастания мер государственной поддержки и стимулирования в различных секторах экономики, в том числе для водородного транспорта и водородной заправочной инфраструктуры, а также для энергоснабжения изолированных от мировых поставок углеводородов территорий.

Установка по производству метанола в Китае

Источник: carbonrecycling.com



Цифровизация и автоматизация переходят в область предиктивной аналитики и начинают активно влиять на технологические и экономически ландшафты. Элементы искусственного интеллекта и автоматизированная поддержка принятия стратегических и технологических решений минимизируют вероятность принятия неправильных решений. Это приводит к созданию решений, близких к оптимальным, и уменьшает пространство для конкуренции как на рынке, так и в технологиях. Согласно оценкам [1], широкое внедрение цифровизации может привести к снижению потребления энергии до 40 %.

В связи с осознанием исчерпаемости отдельных ресурсов, а для некоторых видов ресурсов и локально — скорой исчерпаемости, значение доступа к ним и рационального их использования возрастает. В ответ на эти вызовы нефтегазохимическая отрасль формирует две основные тенденции:

- повышение эффективности использования сырья и рентабельности производства за счет перехода к мегатоннажным комплексам в местах с длительной перспективой доступа к ресурсам;
- внедрение концепции гибких технологических комплексов, которая направлена на поиск новых способов использования ресурсов и обеспечения долгосрочной устойчивости отрасли.

Концепция гибких и безотходных технологических комплексов была проработана



Установка по производству метанола в Китае
Источник: offshore-energy.biz

в СССР в трудах академиков Ласкорина Б. Н. и Кафарова В. В. Суть концепции заключается в комплексном подходе к созданию большого количества химико-технологических процессов на технологическом объекте, что позволяет обеспечить высокую рентабельность производства за счет динамически меняющейся под запрос номенклатуры наукоемкой и высоколиквидной продукции и реализации безотходности производства. Предложенные академиком Ласкориным Б. Н. технологические решения на промышленных предприятиях позволили сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду в десятки раз и заложили основу для дальнейшего развития энергоэффективных и экологосберегающих отечественных технологий [2].

Завод «Ставролен»
Источник: budmuzeum.ru



В качестве успешного примера реализации гибкого технологического комплекса можно привести совместный опыт компаний BASF и SINOPEC, запустивших предприятие Nanjing New Materials High-Tech Park в городе Цзянбэй [3]. Технологическая цепочка начинается с окислительного пиролиза нафты в этилен (производительностью 740 тыс. тонн в год) с последующей переработкой в продукты более высоких переделов: поверхностно-активные вещества, амины и другие конечные продукты (более десяти комплексных направлений переработки).

Основными продуктами метановой газохимии являются метанол, аммиак и кар-

бамид — продукты первого и второго переделла. Несмотря на то, что они также являются сырьем для дальнейшей переработки, большая часть производимых в России продуктов метановой газохимии экспортируется за рубеж. Это может быть оценено как экспорт ресурсов низкой степени передела.

Производство продуктов более высоких переделов путем увеличения глубины переработки сырья, которое достигается посредством комбинирования процессов, является одной из основных тенденцией развития современной газохимической отрасли, что уже сейчас позволяет на передовых газохимических предприятиях производить продукты третьего, четвертого и больших переделов. При этом отечественная газохимическая отрасль имеет потенциал для развития в направлении увеличения количества переделов метана за счет существенной научно-технической базы страны. В итоге складывается ситуация, когда отечественные производители проводят начальные газохимические переделы, а получаемые при этом продукты отправляют на экспорт зарубежным партнерам на их собственные объекты переработки. В результате проведенной дальнейшей переработки товарные продукты возвращаются в Россию, но с кратно более высокой стоимостью.

Рынок крупнотоннажной продукции газохимии

Суммарный размер мирового трансграничного рынка основных крупнотоннажных продуктов газохимии — аммиака, карбамида и метанола — в 2024 году вырос более чем в три раза (по сравнению с 2022 годом) и составил ~205 млрд долларов США [4]. Существенный прирост мирового трансграничного рынка связан с увеличением мирового оборота карбамида и аммиака. Производство этих продуктов характеризуется тем, что до 90 % их себестоимости составляет стоимость природного газа. Более 5 % добываемого природного газа расходуется на производство газохимической продукции. В таблице 1 приведены данные оценки рынка крупнотоннажной

Таблица 1. Оценка рынка крупнотоннажной продукции газохимии на 2024 год по данным из открытых источников [4—7]

	Производство в мире, млн т	Трансграничная торговля в мире, млн т	Производство в России, млн т	Экспорт из России, млн т	Вклад России в мировое производство, %	Вклад России в мировую трансграничную торговлю, %
Аммиак	150—185	~17,0 (9,2 %)	17	0,9	~9,2	~5,1
Метанол	118—201	~17,6 (14,9 %)	4,5	0,8	~3,8	~4,4
Карбамид	180—210	~74,8 (41,6 %)	6,5	8,0	~3,6	~10,7



Амурский ГПЗ

Источник: gazprom.ru



Производство метанола ОАО «Щекиноазот» Источник: hydrounit.ru

продукции газохимии на 2024 год по данным из открытых источников [4–7].

Россия в 2022 году обеспечивала 3,8 % мирового производства метанола, 9,2 % аммиака и 3,6 % карбамида, что составляло 4,4, 5,1 и 11,3 % мировой торговли соответственно. По сравнению с аналогичными данными за 2021 год можно заметить существенное снижение экспорта аммиака (вклад России в мировую трансграничную торговлю в 2021 году составлял 17,3 % (3,3 млн тонн)) в связи с вступлением в силу экспортных ограничений.

Можно предположить, что с потерей доступа к соответствующей инфраструктуре вектор торговли будет смещаться в сторону производства газохимической продукции более высокого передела — карбамида и других азотных удобрений. Азотные удобрения имеют одну важную особенность — они не являются продуктами немедленного потребления, за исключением производства свежих овощей и зелени, поскольку истощение почвы происходит в течение нескольких сельскохозяйственных сезонов.

Завод ПАО «КуйбышевАзот»
Источник: kuazot.ru



Производство метанола в мире в значительной степени ориентировано на экспортные поставки, до трети всего выпускаемого метанола отправляется на экспорт. Однако большая часть расходуется по месту производства. Метанол является сырьем для производства различных химических продуктов, таких как формальдегид и смолы на его основе, олефины, метил-трет-бутиловый эфир и трет-амилметиловый эфир, уксусная кислота, диметиловый эфир и многие другие. Перспективным направлением потребления метанола на месте его производства является использование в качестве топлива, в первую очередь для судов и кораблей. По данным на 2023 год, потребление метанола в качестве топлива составляло 1,5 % от всего произведенного в мире [8], а к 2028-му превысит 10 % от всего производимого метанола на данный момент [9].

Мировой трансграничный оборот аммиака, карбамида и метанола не превы-

шает 1/3 производства. Основная часть базовых продуктов метановой химии расходуется на месте. В то же время с точки зрения увеличения объемов производства существуют риски наращивания товарного экспорта, связанные с насыщенностью рынка и его внутрирегиональной направленностью. Рынки крупнотоннажной продукции газохимии конкурентны и во многом формируются за счет реализации излишков после собственного потребления. Эти рынки носят преимущественно региональный характер.

В связи с последними изменениями на рынках природного газа ЕС и Азии, сопряженными с беспрецедентным ростом цен, а также высокой степенью неопределенности и волатильности, существует тенденция к смещению производства крупнотоннажной газохимии к местам, обеспечивающим стабильный доступ к ресурсной базе.

Для европейского рынка аммиака последствием роста цен на природный газ стала существенная оптимизация производственной деятельности. Например, несмотря на широкий перечень различных мер поддержки, которые предлагались отдельными странами, норвежская компания Yara снизила производительность двух своих химических заводов в Европе на 45 % [10], венгерская компания Nitrogénművek закрыла единственное в Венгрии производство аммиачной селитры [11].

Возникший энергетический кризис в ЕС, предпосылками которого были ошибки в

Энергетический кризис в ЕС, возникший из-за ошибки в выборе стратегии в нефтегазовом секторе, геополитической конфронтации и конкуренции за рынки сбыта, привел к снижению выпуска аммиака и остановке ключевых

выборе стратегических направлений в нефтегазовом секторе, геополитическая конфронтация и конкуренция за рынки сбыта [12], привел к снижению выпуска аммиака и остановке или закрытию ключевых производств [13–17]. Снижение производства в европейском регионе приведет к увеличению международной торговли. Так, по продуктам газохимии прибыль Европейского союза уже в 2022 году упала до 2,5 млрд долларов США по сравнению с 35 млрд годом ранее и 45 млрд допандемийного уровня [17]. Китай, имея ограниченные возможности собственной ресурсной базы, предпринимает значительные усилия по ее развитию и снижению зависимости от внешних поставок. КНР является крупнейшим импортером метанола и значи-

Электротопливо (e-fuel) Источник: energyintel.com



Основными центрами развития газохимии кроме Китая можно считать Россию, страны Персидского залива и Северной Африки. США и Австралия, имея значительные запасы газа, предпочитали реализовывать его

тельным импортером аммиака, однако при этом и крупным экспортером карбамида. Основными центрами текущего развития газохимического производства кроме Китая можно считать Российскую Федерацию и страны Персидского залива и Северной Африки. Важно отметить, что не все страны, имеющие стабильный доступ к природному газу, стремились коммерциализировать его в эти газохимические продукты. Так, США и Австралия, имея значительные запасы природного газа, предпочитали реализовывать его в виде СПГ, оставаясь импортерами базовых продуктов газохимии. Однако за последние годы США анонсировали запуск большого числа производств аммиака и метанола.

Тенденции в производстве метанола

Метанол имеет существенный потенциал роста, поскольку используется в производстве широкого спектра химической продукции. В период с 2010 по 2019 год наблюдался интенсивный рост производства и потребления метанола (до 15 % в год). При этом в результате высокой экономической привлекательности в мире сложилась ситуация опережающего роста мощностей производства метанола в ожидании роста потребностей в тех же темпах. На рисунке 1 представлены запланированные и анонсированные мощности по производству метанола в различных регионах.

Международный рынок метанола является вторичным по отношению к внутреннему китайскому, ситуация с пандемией ко-

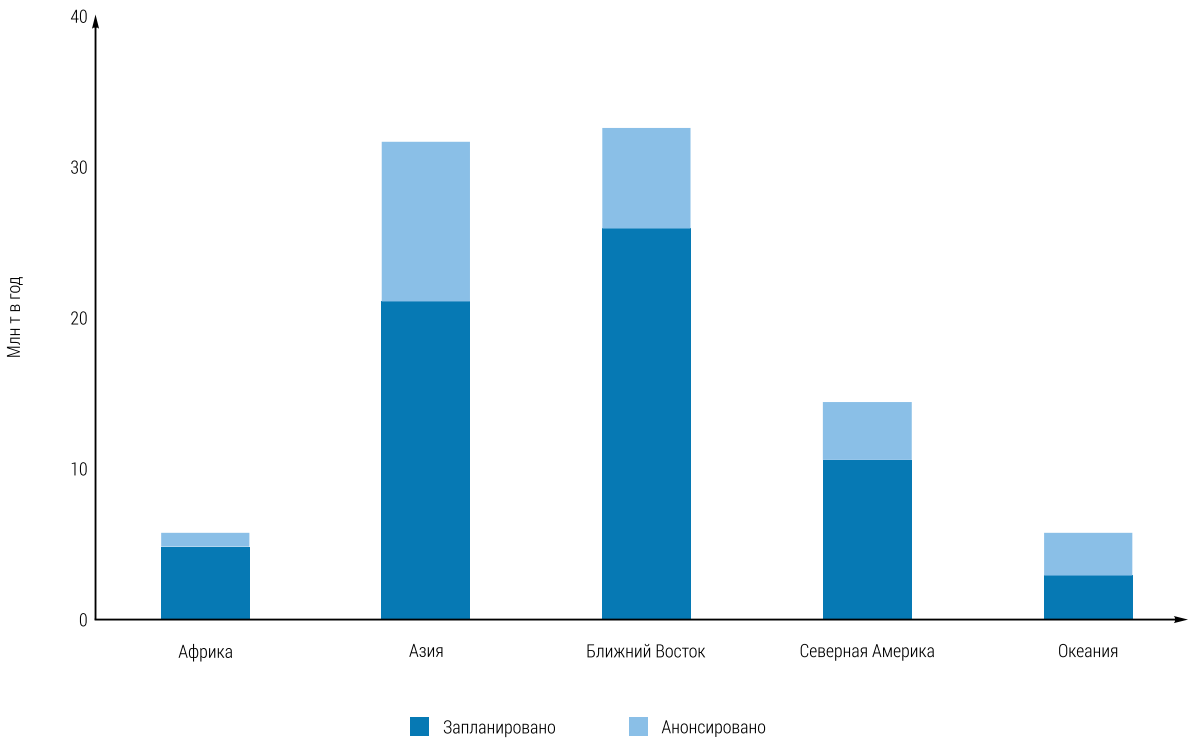


Рис. 1. Планы и анонсы по введению мощностей производства метанола [18]

ронавируса привела к резкому снижению темпов роста трансграничного рынка. Однако в настоящее время наблюдается тенденция к восстановлению. Так, по оценкам BusinesStat, в 2021 году рост выпуска метанола вновь увеличился до 8,2 %, по итогам года объем производства составил 117,7 млн тонн [19]. Мировые мощности по производству метанола в 2021 году оценивались в 160,6 млн тонн. За 2017–2021 годы рост мощностей составил 21,2 % при росте потребления в 34 %. Однако темпы ввода новых мощностей по метанолу (12 млн тонн в Иране в 2020 году, еще 12 млн тонн к 2025-му; в Китае — до 20 млн тонн к 2027-му) становятся избыточными. Только в 2021 году были введены в эксплуатацию несколько проектов общей мощностью 5,5 млн тонн в год [19].

Производство метанола в Китае сталкивается с серьезной конкуренцией со стороны иранских производителей. Наличие доступного источника сырья позволяет Ирану вводить новые мощности и обеспечивать ценовое преимущество. В предыдущие годы большой объем поставок метанола из Ирана приходился на Индию, однако из-за американских санкций платежи из Индии иранским производителям стали затруднены. По этой причине экспорт метанола по данному маршруту резко сократился. Европейский же рынок для Ирана ограничен санкциями, введенными Евросоюзом [20].

Поскольку основным мировым потребителем и импортером метанола является Китай, а доля России в мировой торговле метанолом невысока, то структура мировой торговли в связи с санкционными ограничениями изменилась несущественно. Несмотря на это, РФ в последние несколько лет и в ближайшие годы вводит и анонсирует крупнотоннажные мощности по производству метанола (табл. 2). В условиях технологических санкций доступ к передовым техническим и технологическим решениям мог быть ограничен, однако в этой сфере он достаточно безболезненно может быть получен за счет использования собственного научно-технического задела и технологий дружественных стран.



Комплекс по производству метанола и аммиака «Щекиноазот»

Источник: n-azot.ru

Завод ПАО «КуйбышевАзот»

Источник: jbk9.ru



Таблица 2. Вводимые и анонсированные в России мощности по производству метанола, млн т в год (по данным из открытых источников)

Компания «Русхим» и китайская CEEC, НАО	1,7
Группа AEON и CNCEC, Волгоград	1
Группа компаний ECH, Сковородино	2,2
«ЕвроХим», Кингисепп	2,5
«Балтийский метанол», Усть-Луга	1,8
Находкинский завод минеральных удобрений, Находка	1,8
ООО «Газ Синтез», Высоцк	1,8
Суммарно	**12,9**

Введение новых крупнотоннажных мощностей в России, наряду с уже введенными в других регионах, может существенно осложнить ситуацию с производством метанола и привести к перепроизводству и демпингу со стороны производителей этого продукта, инвестиционные затраты которых уже были возвращены, а доступ к собственному сырью и рынкам сохраняется.

Стоит отметить, что в Европе рынок метанола имел свои особенности. Из-за неразвитости прямых поставок в структуре торговли происходят многократные экспортно-импортные операции. Основные торговые потоки направлены из Нидерландов, которые импортируют этот продукт на 840 млн долларов США и экспортируют на 771 млн [21] в Финляндию, Польшу, Словакию, которые затем реэкспортируют до половины метанола в другие страны. Аналогичная ситуация наблюдается на рынке США. Кроме того, в структуре мировой торговли фактически не полностью видны поставки метанола из Ирана, а теперь из-за политического давления могут быть не видны поставки из Российской Федерации [21].

Тенденции в производстве аммиака и карбамида

Производство аммиака в мире в основном ориентировано на переработку на месте производства. Лишь около 10 % получаемого аммиака поступает на рынок. Основными продуктами переработки являются карбамид, соли аммония и азотная кислота. Карбамид в чистом виде и в виде других азотных удобрений является широко реализуемым продуктом газохимии (рис. 2).

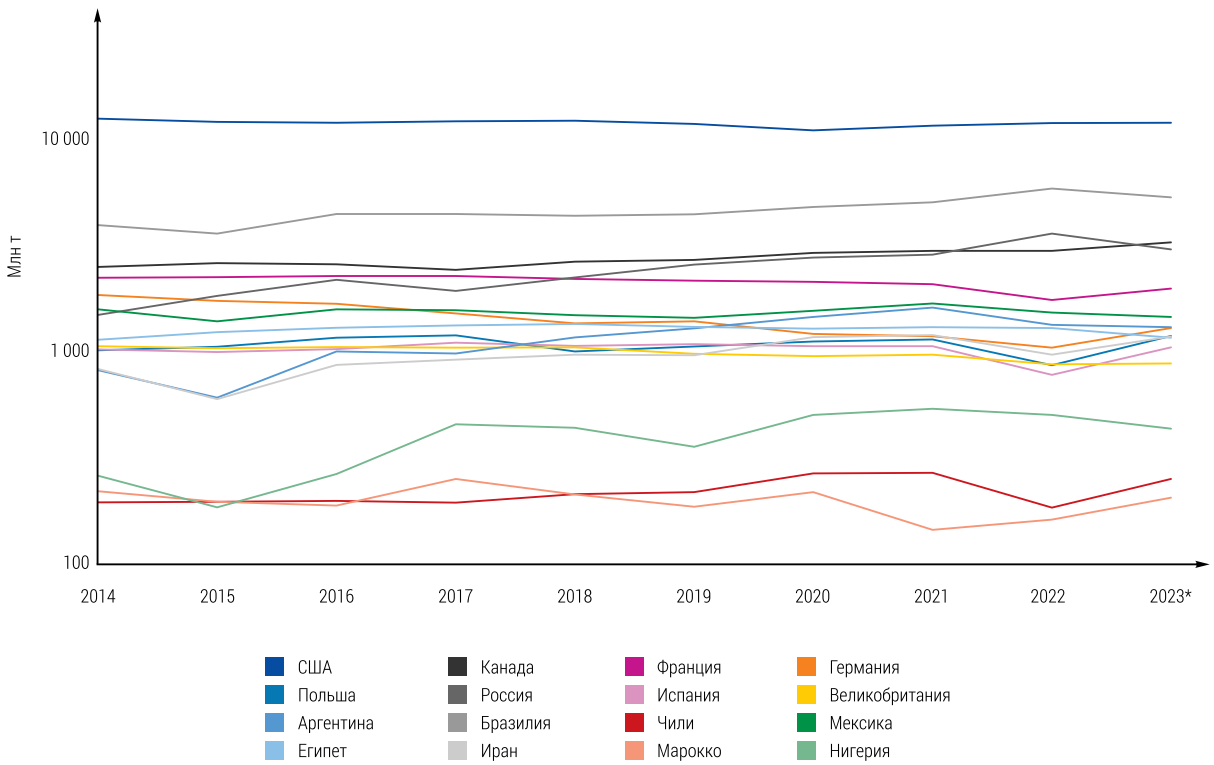


Рис. 2. Потребление азотных удобрений в количестве внесенного азота [22]
* Суммарное потребление за 2023 год является оценочным на основе данных за неполный год

Традиционное использование аммиака и карбамида в качестве сырья для азотных и комплексных удобрений имеет стабильный рост благодаря расширению применения техники интенсивного растениеводства в развивающихся странах. В странах, которые являются устойчивыми потребителями удобрений, в отдельных случаях фиксируется постепенное увеличение потребления, но в целом динамика остается стабильной без явно выраженного восходящего роста (рис. 3).

Можно предположить, что умеренный рост потребления аммиака связан с ограничением рыночного предложения, ко-

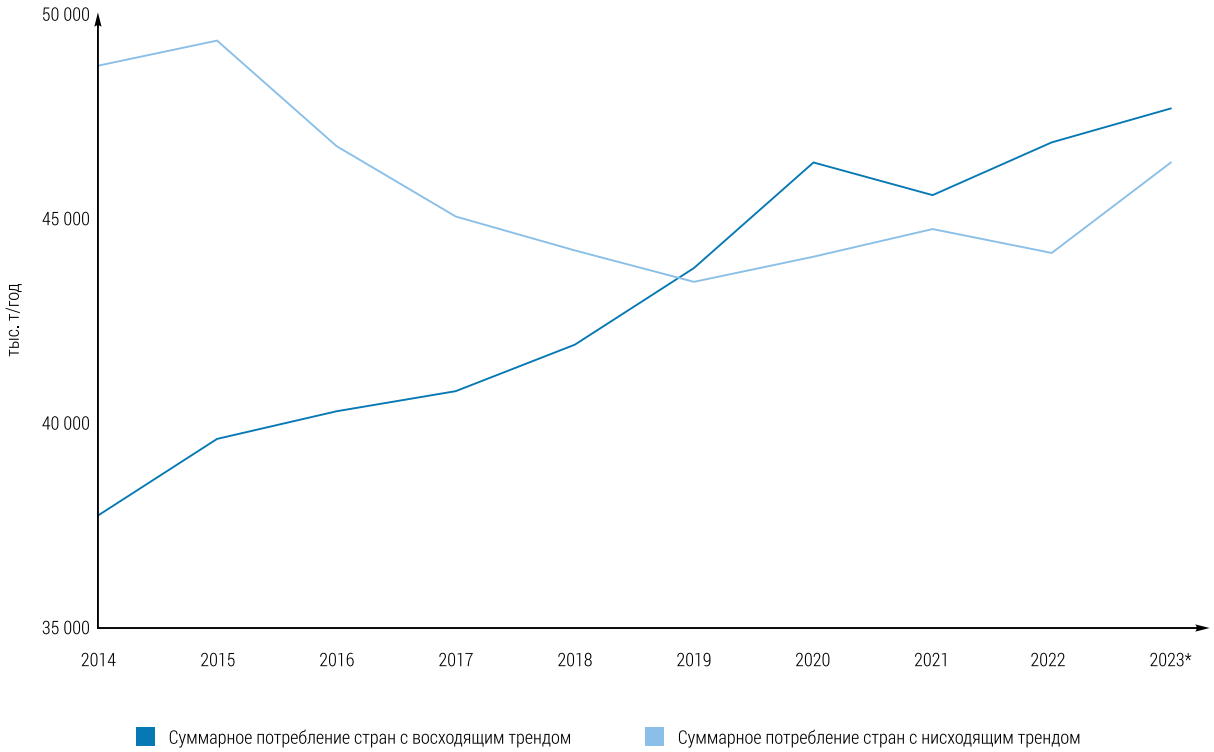


Рис. 3. Годовое потребление азотных удобрений в количестве внесенного азота в основных 20 странах-потребителях, разделенных на страны с развивающимся потреблением удобрений и страны с сокращающимся потреблением удобрений [22]
* Суммарное потребление за 2023 год является оценочным на основе данных за неполный год



ГПЗ Prudhoe Bay Unit Central Gas Facility на Аляске

Источник: commons.wikimedia.org

торое может составлять 10–15 млн тонн в год. Рыночный дефицит может быть компенсирован введением избыточных производственных мощностей. Несмотря на выбывание ряда крупных производителей в Западной и Восточной Европе и снижение конкурентоспособности оставшихся производителей из-за роста стоимости сырья, по данным GlobalData [6], суммарная мощность действующих производств аммиака достигла 236 млн тонн в 2021 году (рис. 5) при потреблении в 175 млн тонн и будет только расти согласно планам и анонсам (рис. 4).

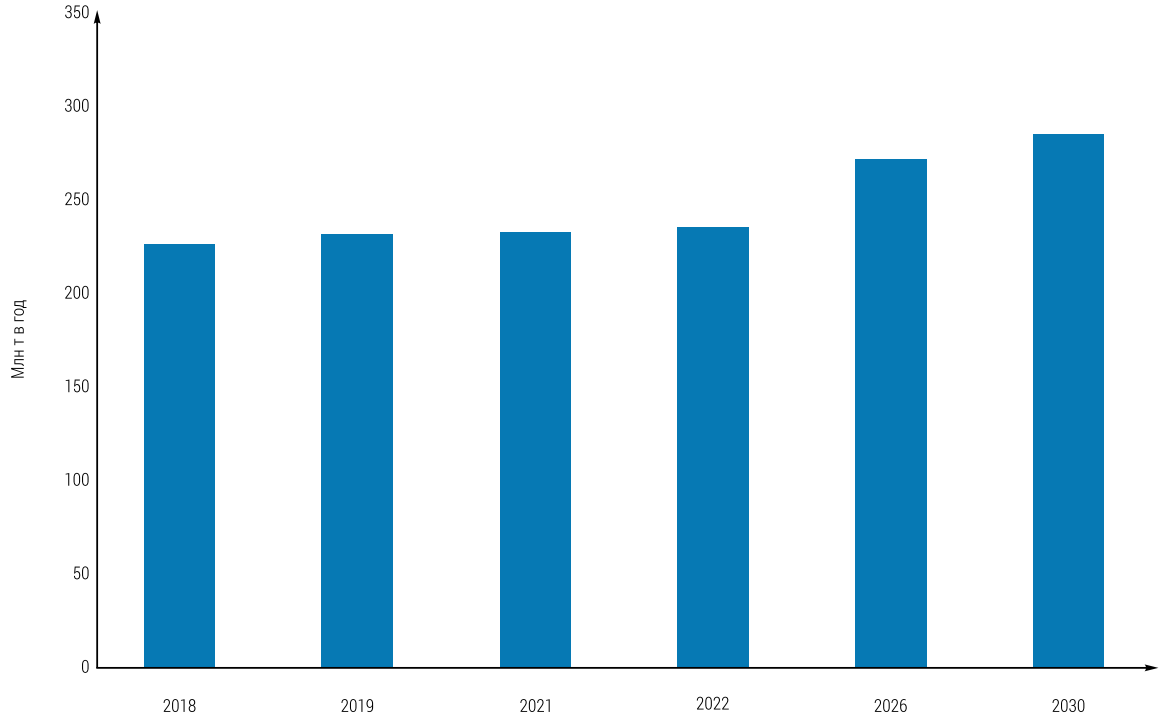


Рис. 4. Суммарная мировая производительность установок производства аммиака [6]

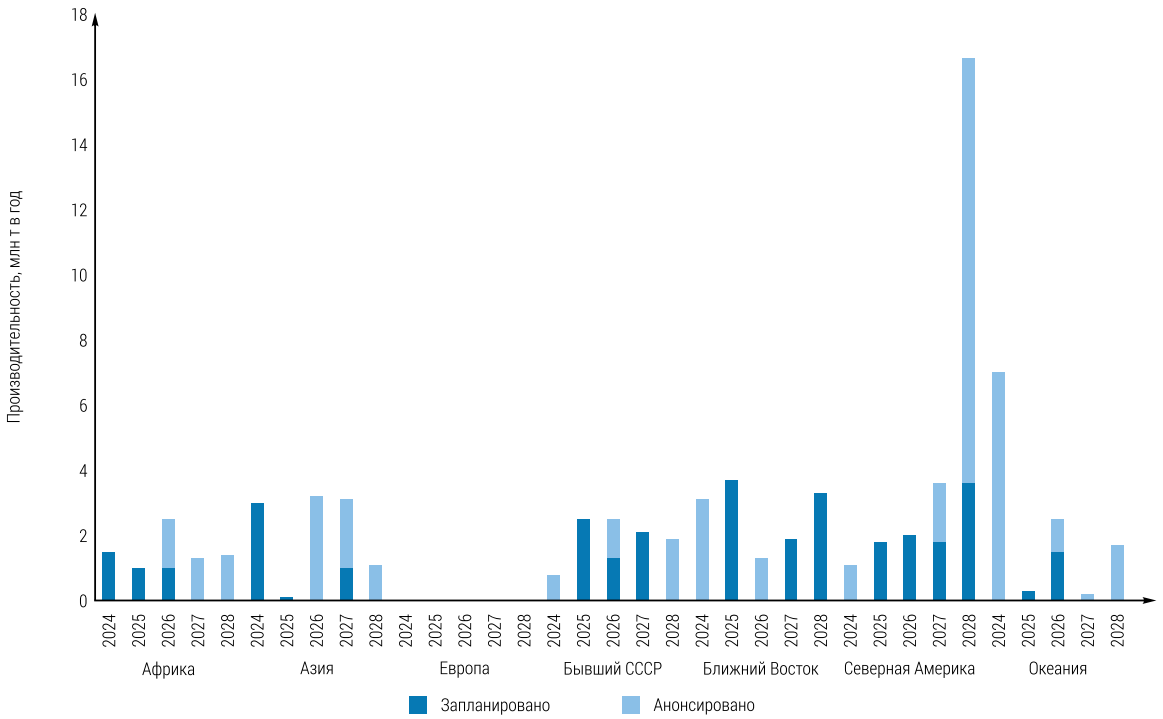


Рис. 5. Планируемые и анонсированные мощности производства аммиака с 2024 по 2028 год по основным регионам [6]

Другим важным фактором является влияние стоимости природного газа на экономическую эффективность. По данным CRU Group [23], увеличение стоимости природного газа приводит к отрицательной операционной доходности производства аммиака (рис. 6 и 7).

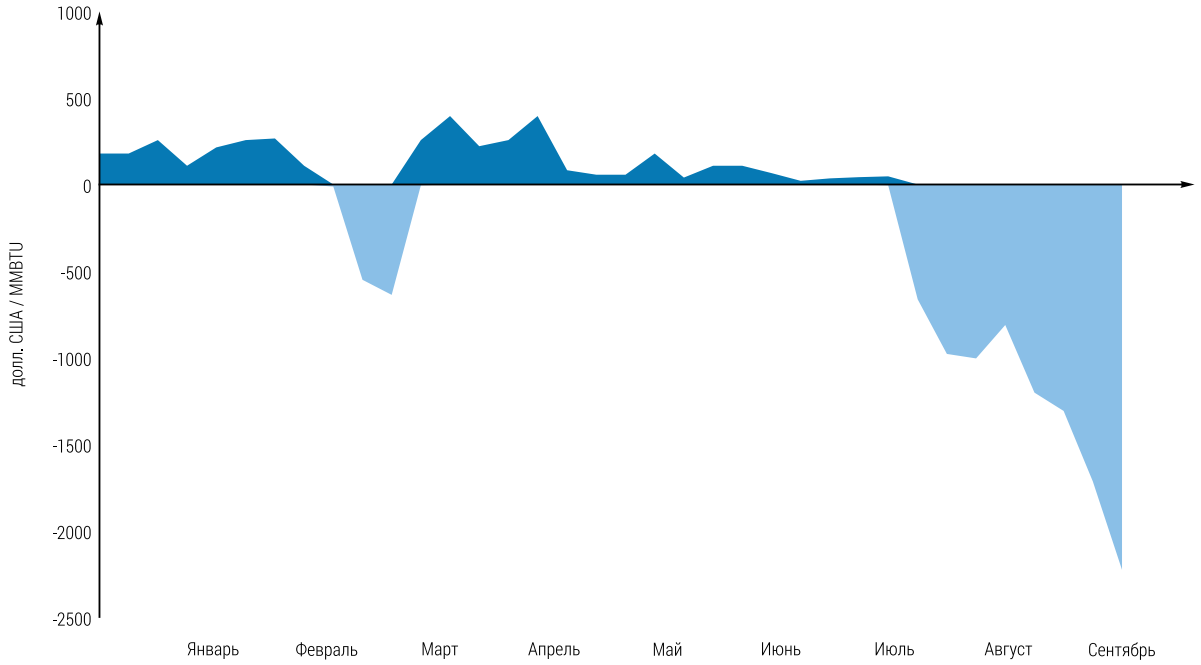


Рис. 6. Спотовая месячная цена природного газа TTF в 2022 году [23]

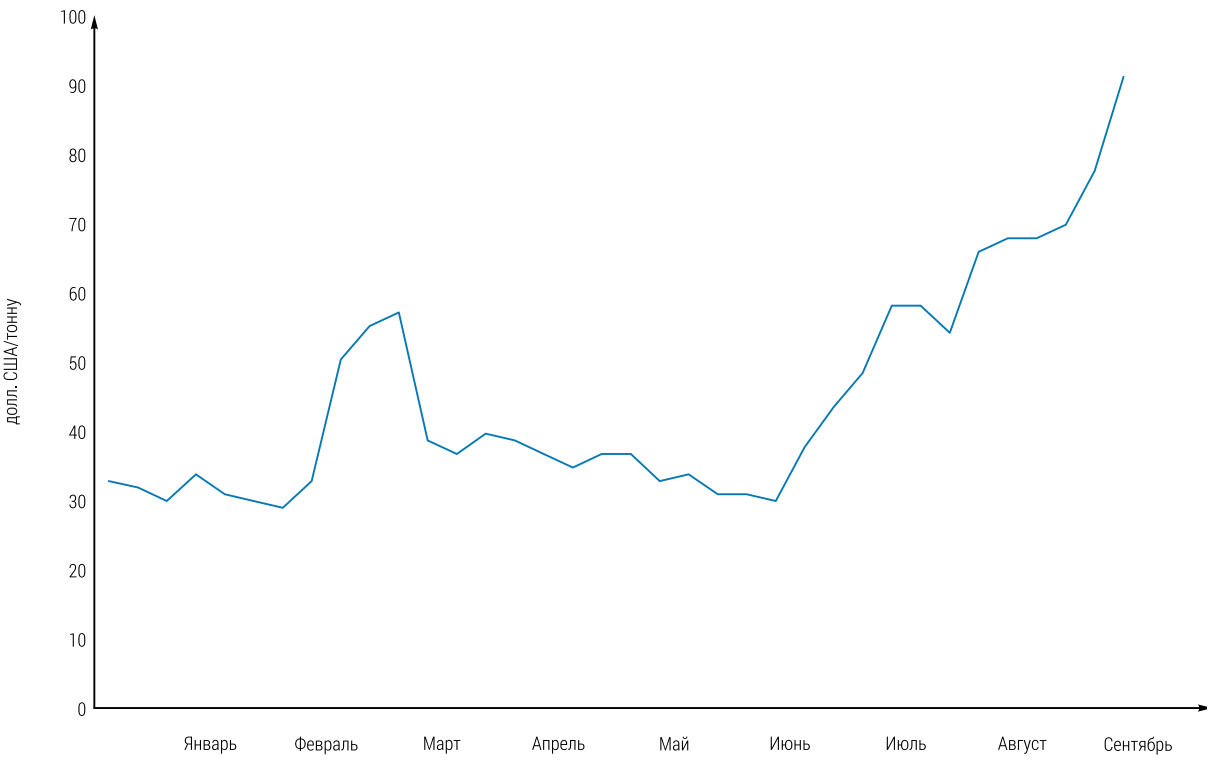


Рис. 7. Рентабельность производства аммиака на 2022 год [23]

Таблица 3. Вводимые и анонсированные в России мощности по производству аммиака и/или карбамида (по данным из открытых источников)

Вводимые в строй мощности	Производительность, млн т в год
«Фосагро», Череповец	1,0
«Щекино азот», Первомайский	0,5
Обский ГХК	2,4
«Куйбышев азот», Курск	0,8
«Аммоний-2», Менделеевск	1,2
«Азот», Кемерово	1,2
Находкинский завод минеральных удобрений, Находка	1,8
«Метафракс», Губаха	0,3
Акрон «Карбамид №6+», Великий Новгород	0,8
Итого	**11,0**
Анонсированные мощности	
«ЛУКОЙЛ», Буденновск	1,0
«Еврохим», Невинномысск	1,0
Грозный	1,0
«Акрон», Новгород	1,2
«Орелметахим», Орловская область	0,4
Итого	**4,6**

В последние годы цена аммиака демонстрировала значительные колебания при общей тенденции к росту. Вышеуказанные факторы обусловили высокий интерес к строительству заводов по производству аммиака в местах, где есть возможность получать природный газ по умеренным и прогнозируемым в долгосрочной перспективе ценам. Так, например, только в России в ближайшие несколько лет суммарная дополнительная мощность по производству аммиака достигнет более 10 млн тонн (табл. 3). В условиях стабильного внутреннего потребления это будет способствовать росту мировой торговли аммиаком.

Долгосрочное целеполагание

В связи с нестабильностью на газовых рынках ЕС и Азии цены выросли, что принесло дополнительную прибыль тем производителям, которые имели доступ к надежным источникам, не зависящим от рыночных цен. Кроме того, разрушение устойчивых маршрутов поставок природного газа в Европу сделало производство метанола, аммиака и карбамида в целом регионе неконкурентоспособным, что привело к некоторому дефициту и еще большему удержанию высоких цен. В результате на достаточно консервативном рынке появились большие возможности для создания новых газохимических производств. В России и мире реализуется такое количество проектов, которое может привести к кратному росту предложения на международном рынке аммиака, метанола и карбамида. Сложно оценить, насколько этот объем газохимической продукции может быть компенсирован ростом потребления и выпадением производства в странах с высоким и труднопрогнозируемым уровнем цен на региональных сырьевых рынках. Кроме того, стоит учитывать конкуренцию за доступ к сырью с проектами по производству сжиженного природного газа (СПГ).

Введение новых крупнотоннажных мощностей в России, наряду с уже введенными в других странах, может привести к перепроизводству метанола и демпингу со стороны

Таким образом, конкуренция на рынках крупнотоннажной газохимической продукции не будет снижаться. Кроме того, может существенно обостриться внутрироссийская конку-

ренция за доступ к экспортным поставкам. Поскольку старые газохимические производства имеют ограничения по выходу на мировые рынки из-за своего неоптимального расположения, новые экспортно-ориентированные газохимические проекты будут конкурировать не с другими мировыми производителями, а с российскими поставщиками. В таких условиях большим преимуществом по развитию крупнотоннажных производств продуктов газохимии будут обладать производители, способные законтрактовать на всем жизненном цикле функционирования проекта необходимые объемы сырья (природного газа) по доступным прогнозируемым ценам.

Ключевым аспектом различия долгосрочных рыночных тенденций для аммиака, карбамида и метанола является отличие направлений их потребления.

Рынок карбамида, будучи основой рынка азотных удобрений, в долгосрочной перспективе не имеет альтернативных способов крупнотоннажного использования и полностью зависит от объемов и интенсивности сельскохозяйственной деятельности. Ряд тенденций, которые в прошлом и в среднесрочной перспективе вызывали и будут вызывать интенсивное и экстенсивное развитие сельского хозяйства, в долгосрочной перспективе перестанут действовать. Замедление роста населения Земли приведет к его стабилизации на уровне около 10 млрд человек уже в 2040-х годах. Основной остаточный прирост населения будет за счет реализации высокой ожидаемой продолжительности жизни новых поколений. Количество детей и молодежи начнет снижаться уже в ближайшие годы (рис. 8).



Производство ПАО «КуйбышевАзот»

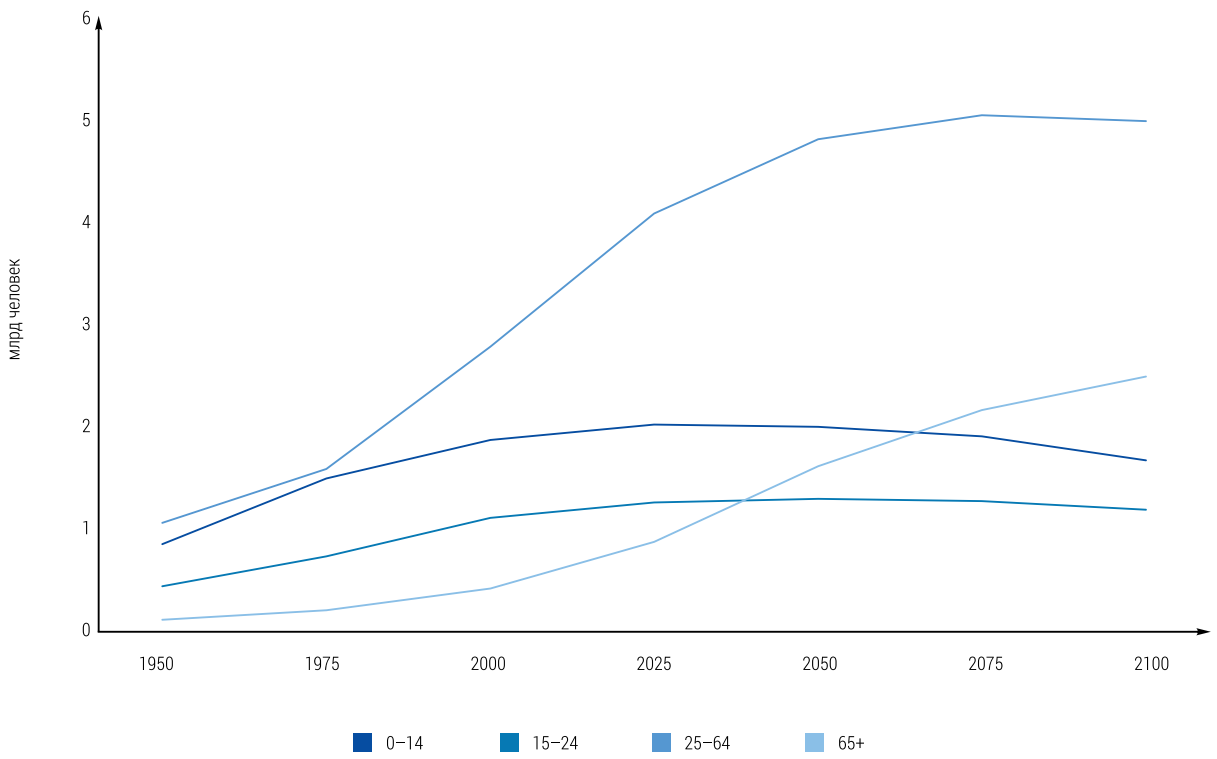


Рис. 8. Народонаселение земли по возрастным группам [24]



Источник: jbk9.ru

При этом в регионах, где потребление наиболее емких продуктов сельского хозяйства, таких как продукты животноводства, алкоголь и натуральные ткани, существенно выше среднемирового уровня, коренное население будет снижаться опережающими темпами. Кроме того, возможен сценарий широкого внедрения синтетических кормовых белков и продукции насекомоводства. «Зеленая революция», которая привела к интенсивному использованию удобрений, развивается и завершится даже в странах с ранее традиционным укладом сельского хозяйства. Выращивание технических сельскохозяйственных культур также не имеет существенных перспектив роста.

Повышение качества тканей из синтетических полимеров вытесняет натуральные ткани из области массового потребления. В странах с интенсивным ростом населения, скорее всего, «натуральность» тканей не будет иметь большого значения. Тенденция к использованию биотоплива сходит на нет, поскольку оно не дает существенного выигрыша по выбросам углекислого газа относительно возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а в стоимостном отношении при существующих уровнях цен на природный газ биотопливо не может конкурировать с традиционным.



Южно-Приобский ГПЗ Источник: Сибур



Установка по производству метанола на НПЗ NIOPDC в Иране
Источник: jondishapour.com

С учетом того, что производство карбамида в меньшей степени привязано к месторождениям природного газа и опирается на производство аммиака, перспектив сокращения производства карбамида в связи с выбыванием израсходованных месторождений немного. Скорее, это приведет к импорту именно аммиака с загрузкой мощностей по его переработке с учетом тенденций по рынку. Таким образом, для карбамида в долгосрочной перспективе можно дать

очень консервативный прогноз, направленный только на замещение за счет конкурентных преимуществ. Степень влияния политики декарбонизации на рынок удобрений предполагается существенно меньшей, чем на сектора энергетики, металлургии и строительства. Декарбонизация же собственно производства карбамида практически полностью определяется декарбонизацией производства аммиака.

В долгосрочной перспективе традиционный рынок аммиака в целом определяется теми же тенденциями, что и рынок карбамида, но он имеет два существенных отличительных аспекта, связанных с декарбонизацией (рис. 9). В первую очередь по мере развития тенденции декарбонизации спрос на аммиак с низким углеродным следом будет существенно возрастать, поскольку при производстве аммиака можно за сравнительно небольшую стоимость достигнуть существенного снижения выбросов [25–27]. Во вторую очередь развитие концепции водородной энергетики столкнулось с труднопреодолимыми препятствиями на пути к использованию собственно водорода в качестве энергоносителя, в результате чего в настоящее время обретает высокие темпы развития концепция использования аммиака в качестве носителя водорода в энергетических приложениях. Оба эти аспекта могут вызвать существенный рост спроса на аммиак с низким углеродным следом в среднесрочной перспективе. В долгосрочной перспективе это направление может стать доминирующим. При этом производство низкоуглеродного аммиака за счет регуляторных инструментов может существенно снизить доход-

Внутрироссийская конкуренция за доступ к экспортным поставкам может существенно обостриться, поскольку старые ГПЗ имеют ограничения по выходу на мировые рынки из-за своего неоптимального расположения

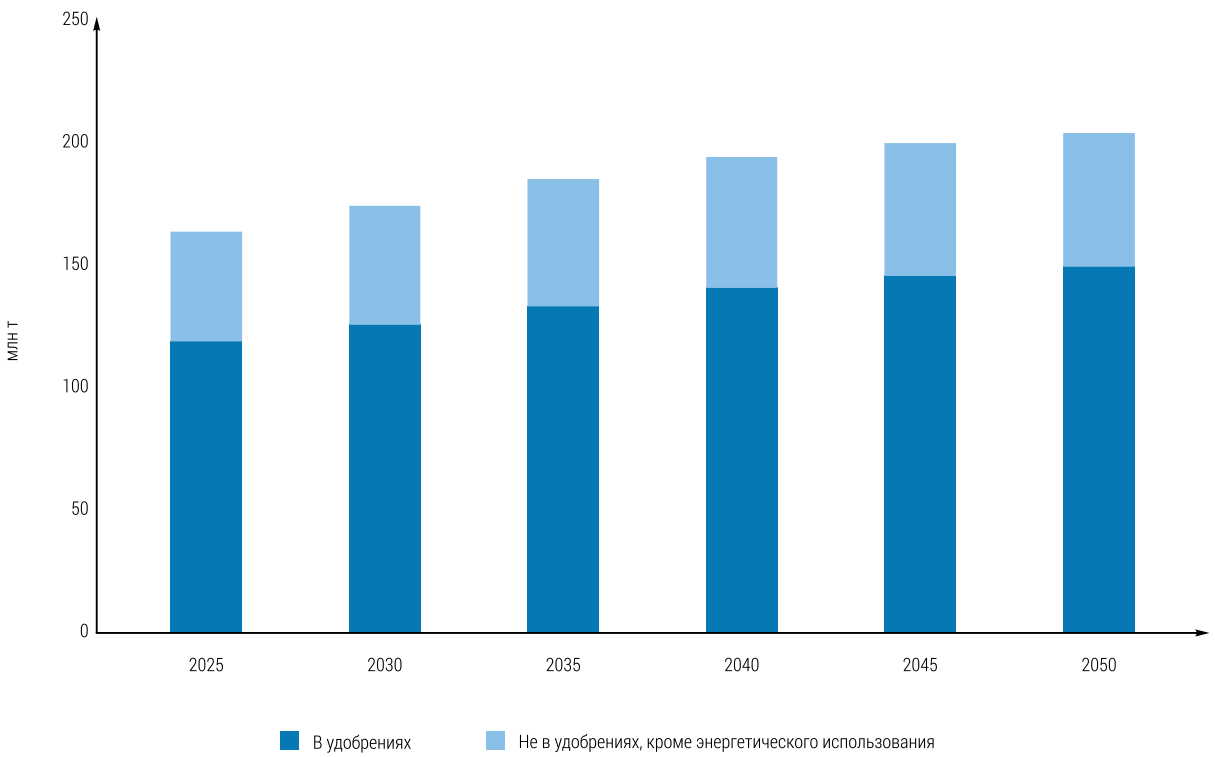


Рис. 9. Потребности в азоте в виде азотных соединений, без учета энергетического использования [29]



Завод Группы «ФосАгро» в Череповце Источник: rupec.ru

ность выпуска и объемы потребления не низкоуглеродного аммиака.

Указанные выше тенденции наблюдаются уже в настоящее время. Характерным признаком является существенный пересмотр планов по вводу новых крупнотоннажным мощностей по производству аммиака. В международном отраслевом отчете [28] приводятся следующие показатели планируемых к вводу производств: основной рост планируется в Азии, в том числе в странах, которые являются одними из основных потребителей, — Китае и Индии. Существенно более умеренный рост наблюдается в странах СНГ и на Ближнем Востоке.

Планы по вводу в эксплуатацию новых крупнотоннажных мощностей существенно меняются в 2023 году (на рис. 10 и 11 представлены планы на 2030 год в 2022 и 2025 годах соответственно). Основным регионом развития мощностей становится Северная Америка вместо Азии. При этом сохраняются планы по запуску крупнотоннажных

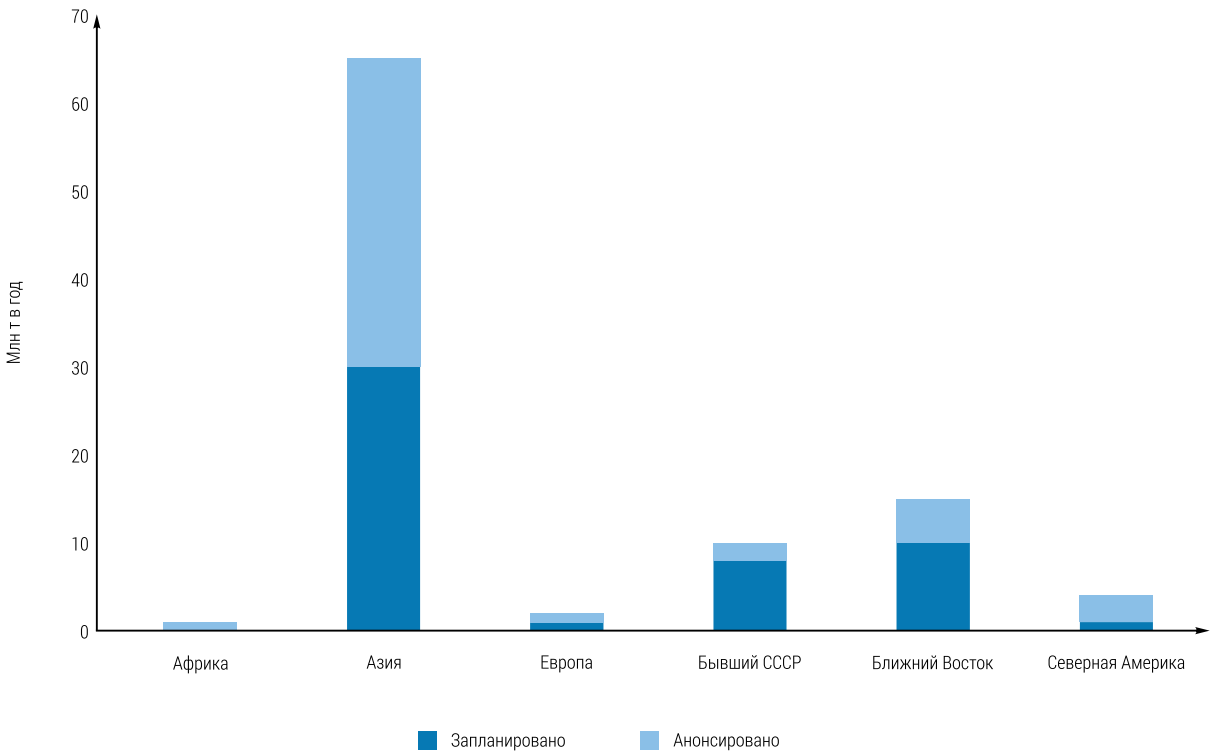


Рис. 10. Планы и анонсы по введению мощностей производства аммиака к 2030 году с 2022 года (по данным на 2022 год) [6]

мощностей в странах СНГ и на Ближнем Востоке, с учетом уже построенных объектов.

Во многом пересмотр планов вызван высокой стоимостью природного газа в 2022–2024 годах, которая смещает оптимум производства аммиака от мест его потребления к местам добычи природного газа, что согласуется с планами по вводу новых мощностей в России. Можно предположить, что в случае снижения цены на природный газ проекты могут вернуться к потребителям. Однако при этом проявляется тенденция, когда многие из них анонсируются как низкоуглеродные (табл. 4).

Основные планируемые производственные мощности продолжают использовать природный газ в качестве сырья и топлива, но есть предложения по оснащению их системами улавливания и подземного хранения углекислого газа, что гораздо более эффективно делать в местах добычи. Ряд проектов презентуется как способ переработки водорода, полученного электролизом за счет электроэнергии от возобновляемых источников энергии. Мощность таких проектов существенно ниже газовых, но уже заявляется на уровне крупнотоннажного производства — до 400 тыс. тонн в год [29].

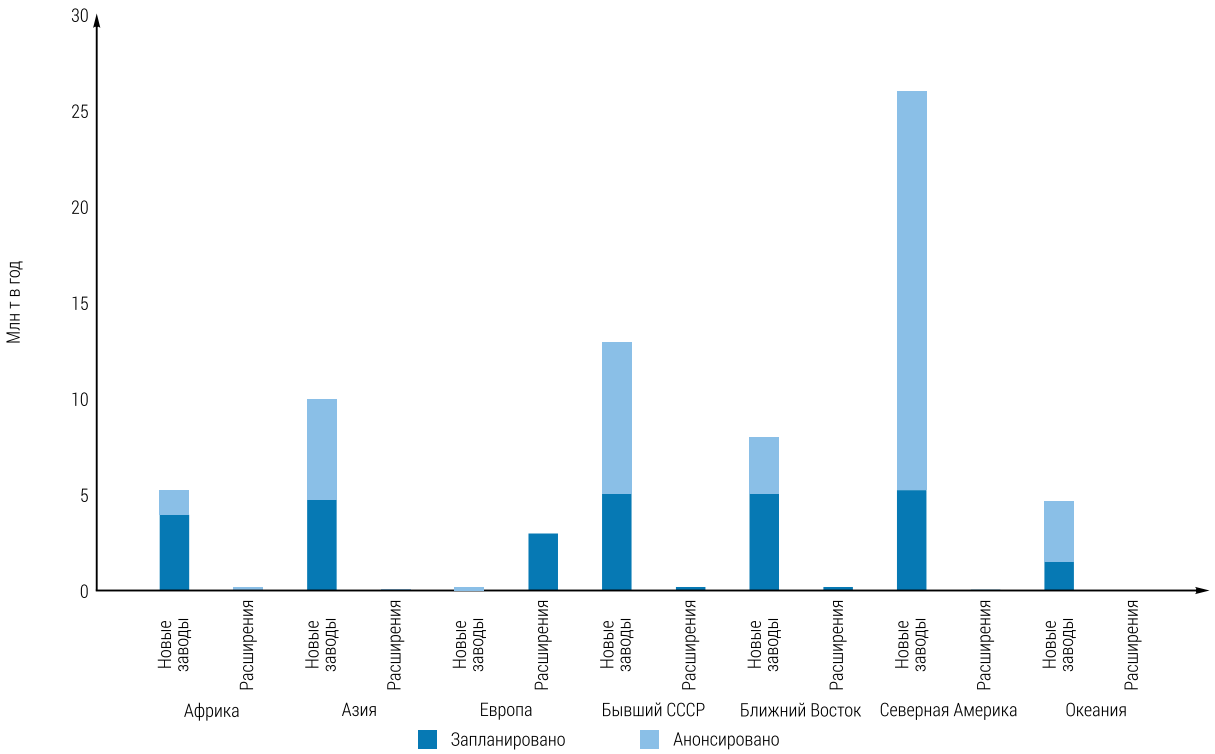


Рис. 11. Планы и анонсы по введению мощностей (в виде новых заводов или расширения действующих) производства аммиака к 2030 году с 2025 года (по данным на 2025 год) [6]

Таблица 4. Проекты низкоуглеродного производства аммиака (по данным из открытых источников)

Название проекта (страна размещения)	Мощность, млн т в год	Год ввода в эксплуатацию
Ascension Clean Energy Donaldsonville Ammonia Plant (США)	7,2	2027
St Charles Clean Fuels St. James Parish Ammonia Plant (США)	3,0	2027
Nutrien Ltd. Geisma (США)	1,2	2027
Adams Fork Energy clean ammonia project Mingo County (США)	2,2	–
Topsoe (DynAMMO™) at Allied Green Ammonia Gove Peninsula (Австралия)	0,9	2028
Horisont Energi (Норвегия)	1,0	2026
Omani-Indian venture, OMIFCO (Оман)	3,5	2026
QAFCO Ammonia-7 QatarEnergy blue ammonia Project (Катар)	1,3	2026
Mid West Clean Energy Project (Австралия)	1,2	2027



Завод по производству аммиака
CF Industries в США
Источник: worldrecordacademy.org



Завод BASF в Людвигсхафене
Источник: agroexpert.md

Развитие потребления метанола является диверсифицированным, и сложно сказать, какая тенденция окажет наибольшее влияние. Из новых факторов можно привести, например, то, что в виде метанола можно утилизировать улавливаемый из атмосферы углекислый газ за счет его реакции с водородом, что при условии получения водорода с низким уровнем выбросов парниковых газов может использоваться в качестве способа снижения углеродного следа и получения «низкоуглеродных» активов. Однако если метанол при использовании окисляется, выделяя оксид углерода, то эффект от улавливания будет снижен. Поэтому целесообразно использовать метанол в более устойчивых соединениях, таких как полимеры. В любом случае декарбонизация традиционного производства метанола может иметь место, но в меньшей степени, чем аммиака. Это обусловлено тем, что производство метанола в Китае, а значит, и в мире во многом основано на использовании угля, следовательно, переход на использование природного газа уже приведет к существенному снижению углеродного следа.

По мере развития декарбонизации спрос на аммиак будет существенно возрастать, поскольку при его производстве можно за сравнительно небольшую стоимость достигнуть существенного снижения

Для повторения интенсивного роста потребления метанола аналогично периоду 2010–2017 годов должно появиться новое направление его использования, ко-

торое сейчас не просматривается. В долгосрочной перспективе рентабельность производства и конкурентность продукции могут быть обеспечены за счет доступного сырья и применения передовых технологий. С точки зрения повышения эффективности и снижения углеродного следа наиболее перспективными для трансляции доступности сырья в рентабельность продукции являются технологии мегатоннажного производства аммиака и метанола с обеспечением возможности улавливания и эффективного использования углекислого газа. При этом повышение эффективности технологии приводит к снижению объема углекислого газа, подлежащего утилизации. Это может быть реализовано за счет пароокислительной конверсии природного газа. Кроме того, применение пароокислительной конверсии приводит к относительно невысокой стоимости улавливания углекислого газа с последующим его подземным хранением при возникновении поддерживаемого спроса на подобные решения.

Альтернативным вариантом может быть применение более традиционной технологии — паровой конверсии — с использованием части получаемого водорода в качестве печного топлива. В долгосрочной перспективе аммиак может стать одним из основных видов топлива (рис. 12), а продукция последующего передела метанола подвергнется углеродному регулированию, что может иметь значение при их низкоуглеродном производстве. Однако вопрос обеспечения низкого углеродного следа, являющегося ключевым во многих иностранных газохимических проектах, пока

Основные планируемые производственные мощности продолжают использовать природный газ в качестве сырья и топлива, но есть предложения по оснащению их системами улавливания и подземного

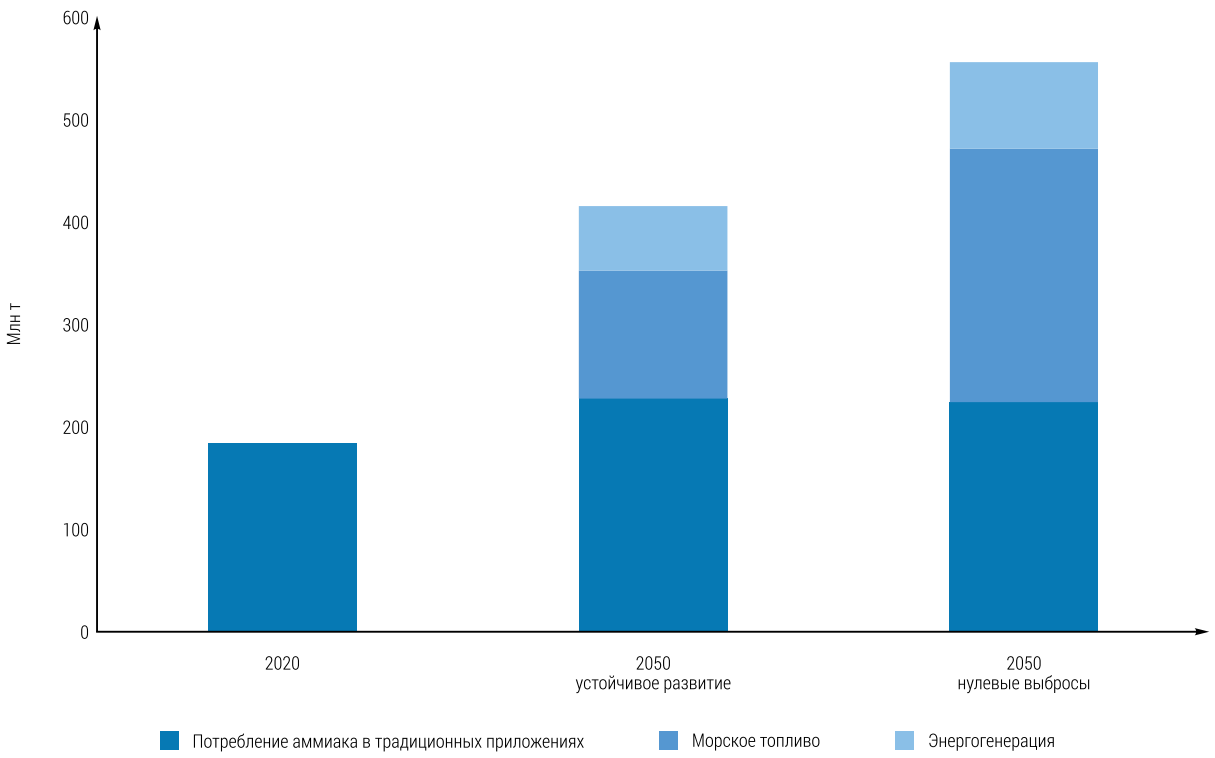


Рис. 12. Прогноз потребления аммиака в качестве энергоносителя и топлива [11]

мало рассматривается в планируемых к реализации проектах на территории Российской Федерации. Для формирования устойчивых позиций на мировом рынке и обеспечения внутреннего спроса сырьевое конкурентное преимущество должно транслироваться за счет передовых высокоэффективных технологий.

В связи с ограничением международных товарно-логистических цепочек и переориентацией рыночных потоков, для обеспечения стабильного и поступательного развития отечественной экономики и промышленности целесообразна реализация многостадийных технологических процессов на базе отечественных технологий и функциональных материалов на территории России. Для достижения высоких экономических показателей реализуемых производств в условиях необходимости рассчитывать на собственные научно-технические компетенции и производственные мощности из-за ухода зарубежных лицензиаров, а также введения новых продуктов в деятельность в кратчайшие сроки необходимо проводить глубокую аналитическую оценку перспективных к производству продуктов на длинном горизонте.

Существенным потенциалом с точки зрения функционализирования метана

Декарбонизация традиционного производства метанола может иметь место, но в меньшей степени, чем аммиака, так как производство метанола в Китае, а значит, и в мире, во многом основано на использовании угля

обладает класс процессов Gas-to-Liquids (GTL). Основными продуктами процессов GTL являются разнообразные жидкие химические продукты, в основе технологических цепочек которых лежит тот или иной способ функционализирования природного газа. Основным направлением GTL является производство широкого перечня жидких углеводородов: синтетической нефти, дизеля, нафты, воска и т.д. Технологическую базу процесса GTL составляют водородные технологии, синтез-газ после которых направляется на синтез Фишера



ГПЗ Prudhoe Bay Unit Central Gas Facility на Аляске

Источник: storage.googleapis.com

— Тропша (СФТ) и гидрокрекинг. Варьирование отношения H_2:C_0 и применяемые катализаторы позволяют получать разные целевые продукты:

- для производства длинных парафинов (восков и др.) отношение H2:CO должно составлять 2,0–2,1, а в процессе СФТ следует применять кобальтовые катализаторы;
- для производства легких олефинов и бензиновой фракции отношение H_2:C_0 может опускаться ниже 1,0 и достигать 1,7 при использовании железных катализаторов.

Процесс СФТ протекает с высоким тепловыделением, что требует точных и эффективных систем контроля температуры внутри реактора.

Развитие технологий

Реализация современных технологий с высокой энергоэффективностью и потенциалом к декарбонизации предлагается в нескольких вариантах. Технологии производства метанола, аммиака и карбамида основаны на получении водорода и синтез-газа, который в свою очередь имеет несколько вариантов получения. На рисунке 13 представлены схемы этих вариантов. На рисунке 13А представлена схема проведения паровой конверсии метана, которая в настоящее время наиболее широко

Основу производства аммиака в России составляют агрегаты, введенные в эксплуатацию в 1973–1988 годах. Все они построены по однотипной технологической схеме, различающейся в основном

используется. На рисунке 13Б показана схема окислительной конверсии с теплообменом, в которой кислород от воздухоразделительной установки подается в технологический поток после первых стадий конверсии, обеспечивая протекание конверсии. Избыток образовавшегося тепла передается через теплообменник в зону или реактор первичной окислительной конверсии. На рисунке 13В представлена схема окислительной конверсии, в которой кислород подается в технологическую линию перед реакторами, за счет чего обеспечивается тепловой режим протекания реакции.

На рисунке 13Г приведена схема теплового обеспечения процесса конверсии



Грузовики-бензовозы компании Yara

Источник: grodno24.com

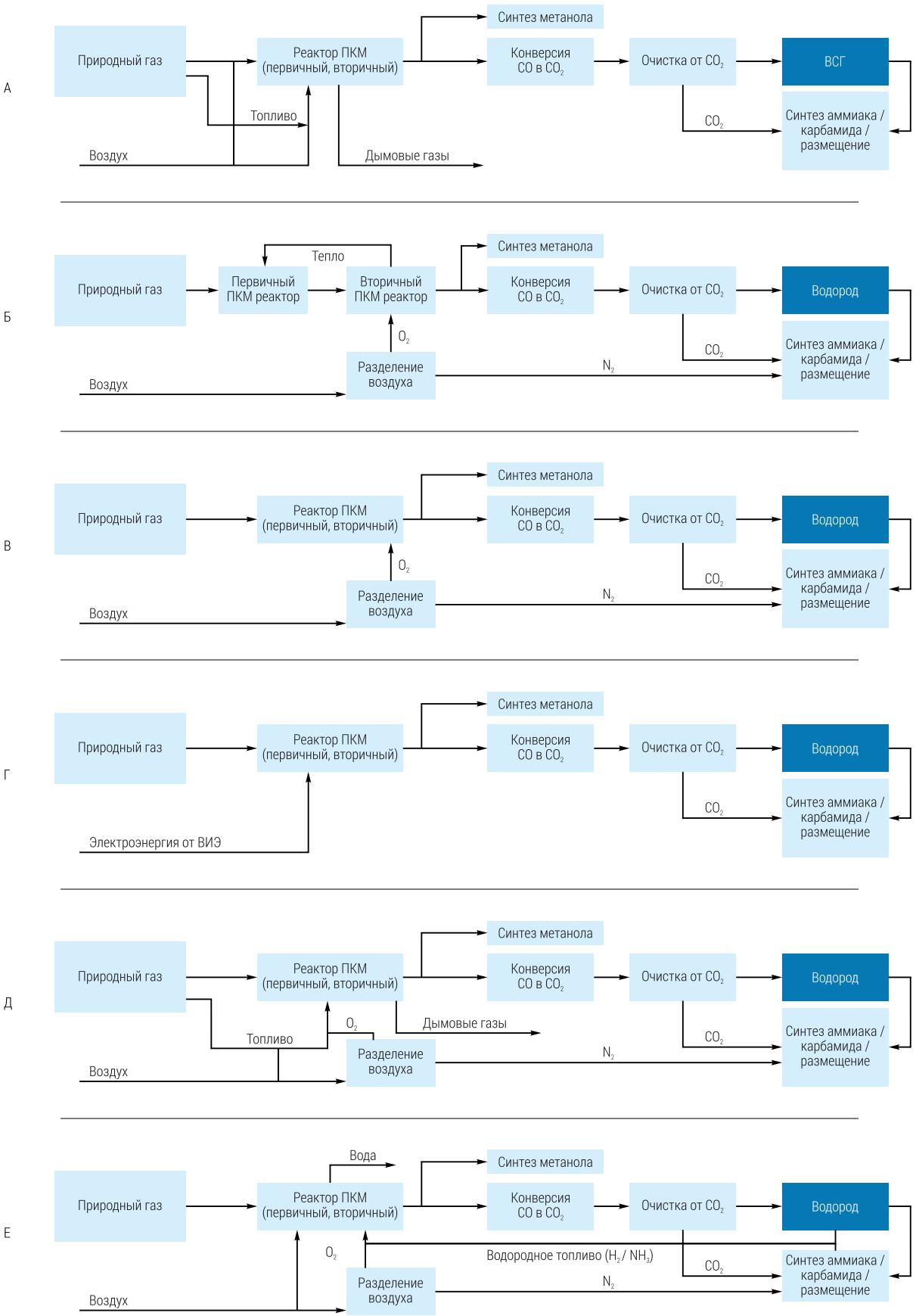


Рис. 13. Применяемые схемы производства водорода и синтез-газа

Таблица 5. Технологии низкоуглеродного производства синтез-газа. В скобках указана заявляемая достижимая степень улавливания углекислого газа

	Паровая конверсия с улавливанием	Паровая конверсия с низкоуглеродными энергоносителями или электронагревом от ВИЭ	Пароокислительная конверсия	Пароокислительная конверсия с теплообменниками	Электролиз
Haldor Topsoe [31]		eREACTTM (99 %)	SynCOR™ — Autothermal Reformer (ATR) (99 %)	SMR + HTER (70 %)	
Air Liquide (Lurgi)			MegaMethanol™ ATR-Reformer Technology (90 %)		
KBR [32]				PurifierPlus™ Reforming Exchanger System (KRES™)(80 %)	K-GreeN® (99 %)
Linde [33]				Tandem Reforming	
Casale [34]		A6000CC Pre-combustion capture (90 %)	A6000CC ATR8 (90 %)		Flexigreen (99 %)
Udhe Tyssen Krupp [35]	Uhde® ammonia technology (60 %)				

электронагревом за счет использования электроэнергии с низким углеродным следом. На рисунке 13Д особенность схемы паровой конверсии состоит в том, что целью воздухоразделительной установки является обеспечение синтеза аммиака, а кислород используется для обогащения воздуха в классической схеме конверсии. При этом для обеспечения повышенного содержания углекислого газа в выхлопных газах целесообразно осуществить процесс горения в несколько стадий, поскольку полное выгорание кислорода в одну стадию дает слишком высокую равновесную температуру, что неизбежно приведет к образованию оксидов азота. На рисунке 13Е для исключения выбросов углекислого газа в классической схеме используется часть получившегося водорода или аммиака в качестве низкоуглеродного водородного топлива.

Приведенные схемы (Б) — (Е) могут обеспечить как повышенную энергетическую эффективность по расходу природного газа, так и глубокое улавливание углекислого газа. Повышение энергетических характеристик обеспечивается за счет возможности интеграции тепловых и материальных потоков. При этом снимаются основные ограничения на производительность установок и становится возможным осуществлять производство в масштабе годовой мощности единичной установки в несколько миллионов тонн в год.

Для указанных технологических решений пока не выявлено однозначных преимуществ того или иного варианта. Как представляется, преимущества будут определяться в первую очередь эффективностью внедрения в конкретных условиях, а в дальнейшем основанием для выбора будет распространенность и отработанность решений. В таблице 5 приведены предложения основных технологических компаний в соотнесении с описанными технологическими решениями. По имеющейся информации, большинство из предлагаемых технологических решений находится в стадии строительства или проведения первых испытательных пробегов.

Сложившееся сочетание географических, экономических, сырьевых критериев позволяет России стать одним из основных бенефициаров изменений в рыночной структуре метанола, аммиака и карбамида



Завод Kaveh Dayer Methanol Plant в Иране

Источник: petrokaveh.com

Основу производства аммиака в России составляют агрегаты, введенные в эксплуатацию в 1973–1988 годах. Функционирующие в РФ установки АМ-70, АМ-76, TEC, Chemico имеют производительность 450–900 тыс. тонн в год с удельным энергопотреблением порядка 8–9 Гкал/т (удельное потребление природного газа составляет более 1000 нм^3/т). Все они построены по однотипной технологической схеме, различающейся в основном аппаратурным оформлением отдельных стадий технологического процесса.

Обладание собственными гибкими технологическими комплексами в области крупнотоннажного производства аммиака на базе пароокислительной конверсии природного газа гарантирует Российской Федерации обеспечение технологического суверенитета в газохимическом секторе экономики.

Заключение

В существующей рыночной динамике газохимической отрасли заметны изменения в структуре производства аммиака, метанола и карбамида. По результатам анализа большого массива данных можно сделать вывод, что эти изменения носят устоявшийся характер и ведут к созданию новых газохимических центров, которые могут быть расположены вблизи торгово-логистических линий с доступным сырьем.

В новых газохимических производствах будут собраны производства метанола, аммиака и карбамида, а также продуктов их дальнейшего передела, с учетом имеющейся и перспективной потребности потребителей. Для новых проектов производства крупнотоннажной газохимической продукции целесообразно на ранних этапах проводить оценку углеродного следа и разработку мероприятий по его снижению, которые могут быть реализованы в случае возникновения потребностей.

Сложившееся сочетание географических, экономических, сырьевых критериев позволяет Российской Федерации стать одним из основных бенефициаров изменений в рыночной структуре метанола, аммиака и карбамида и газохимической отрасли в целом. Близость к крупным торгово-логистическим линиям, развитая собственная газовая сеть и большие разведанные запасы природного газа позволяют существенно снизить экономические затраты на производство и поставку продукции газохимической отрасли.

Основой производственной газохимической базы могут стать современные во-

Строительство мегатоннажного производства с доступным сырьем, хорошим экспортным потенциалом и возможностью подземного хранения CO_2 станет конкурентным преимуществом газохимической продукции Росси

дородные технологии, которые могут быть объединены в мегатоннажные производственные комплексы с производством продуктов высоких переделов. В условиях фиксированного интереса к водородной энергетике в государственных документах применение различных субсидий может снизить экономическую нагрузку на реализацию таких производственных комплексов, что приведет к более быстрому введению их в эксплуатацию и позволит занять существенное количество рыночных ниш газохимической продукции. Это даст возможность получить лидирующие позиции в технологическом (обеспечить собственными передовыми технологиями производственные комплексы) и продуктовом (обеспечить широкий перечень продукции в требуемых объемах) направлениях.

Окислительная конверсия природного газа может стать основой современных водородных технологий. Данный уровень развития окислительной конверсии природного газа может технически оправданно обеспечить низкоуглеродность продукции.

Для достижения диверсификации производства и адаптации к глобальным рыночным изменениям целесообразно реализовать гибкий технологический подход,

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. *Transforming industrial processes through digitalisation. Technology report 13 November 2020 // The International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/articles/transforming-industrial-processes-through-digitalisation.*
2. *Ласкорин Б. Н., Барский Л. А., Персиц В. З. Безотходная технология переработки минерального сырья. Москва: Недра, 1984. 332 с.*
3. *BASF и Sinopec расширили свой химический комплекс в Китае // Информационно-аналитический центр Rupec. URL: https://rupec.ru/news/23797/.*
4. *The Observatory of Economic Complexity: сайт. URL: https://oec.world.*
5. *Blas J. Europe's Petrochemical Industry Is Heading for Death Row // Информационное агентство Bloomberg. URL: https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2023-11-20/europe-s-petrochemical-industry-is-heading-for-death-row.*
6. *Globaldata: сайт. URL: https://www.globaldata.com/.*
7. *В 2021 году роста выпуск метанола в мире увеличился на 8,2 % и достиг 117,7 млн т // Информационное агентство РБК. URL: https://marketing.rbc.ru/articles/13650/.*
8. *Methanol as a marine fuel. Advantages and limitations // Институт Oeko. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Methanol-as-a-marine-fuel.pdf.*
9. *Scaling Up Hydrogen: The Case for Low-Carbon Methanol // Информационное агентство Bloomberg. URL: https://assets.bbhub.io/media/sites/25/2024/06/BNEF-Methanol-Report_to-publish.pdf.*
10. *Yara curtails production due to increased natural gas prices // Химическая компания Yara International. URL: https://www.yara.com/corporate-releases/yara-curtails-production-due-to-increased-natural-gas-prices/.*
11. *Hungary's only fertilizer producer shuts down after 93 years // Agroberichten Buitenland. URL: https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2023/11/17/hungary-fertilizer-company-shutdown.*
12. *Аксютин О. Е. Стратегия «Газпрома»: точки роста спроса на газ // Корпоративный журнал ПАО «Газпром». 2024. № 1–2. С. 6–13.*
13. *Европа перестает выпускать удобрения // Коммерсант. URL: https://www.kommersant.ru/doc/5526650.*
14. *Крупнейший немецкий химический концерн BASF останавливает часть производства аммиака // Информационный ресурс BFM.ru. URL: https://www.bfm.ru/news/519877.*
15. *Завод Achema в Литве остановит производство аммиака. Не выдержал конкуренции // Деловой Петербург. URL: https://www.dp.ru/a/2025/03/26/zavod-achema-v-litve-ostanovit.*
16. *В Великобритании закрылся один из крупнейших заводов азотных удобрений // Информационное агентство РБК. URL: https://www.rbc.ru/rbcfreenews/62a2d2cf9a7947d0372e6262.*
17. *Production of ammonia in Russia from 2014 to 2023 // Компания Statista. URL: https://www.statista.com/statistics/1316104/russia-ammonia-production.*
18. *О промышленном производстве в 2022 году // Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/11_01-02-2023.html.*
19. *EU: Russia's new dependency is urea. Urea has replaced natural gas as an element of de-*

при котором мощность производства синтез-газа позволяет в обоснованных объемах производить аммиак и метанол. В случае благоприятной рыночной конъюнктуры должна быть обеспечена возможность увеличения производства одного продукта при снижении производства другого. На последующих стадиях переработки около половины производимой продукции должно подвергаться переделу вплоть до производства конечной потребляемой продукции газохимии.

Желательно, чтобы при этом соблюдалось деление на несколько направлений передела. Так, половину производимого метанола можно перерабатывать в уксусную кислоту и формальдегид, половину уксусной кислоты — в уксусный ангидрид и метилацетат и так далее. Именно такой подход при тонкой настройке и гибкой динамической оптимизации газохимического производства позволит сформировать оптимальную продуктовую корзину. Строительство мегатоннажного производства с доступным сырьем, хорошим экспортным потенциалом и возможностью длительного подземного хранения больших объемов углекислого газа станет основой для конкурентного преимущества газохимической продукции на горизонте 30–50 лет.

pendence on Russian imports // Pricepedia. URL: https://www.pricepedia.it/en/magazine/article/2024/07/23/eu-russias-new-dependency-is-urea.

20. *В 2021 году роста выпуск метанола в мире увеличился на 8,2 % и достиг 117,7 млн т // Информационное агентство РБК. URL: https://marketing.rbc.ru/articles/13650/.*
21. *Нидерланды | Импорт и экспорт | Весь мир | Метанол (спирт метиловый) | Стоимость (долл. США) и изменение стоимости, г/г (%) | 2012–2023 // TrendEconomy. URL: https://trendeconomy.ru/data/h2/Netherlands/290511.*
22. *Nutrien 2024 factbook. URL: https://cdn.sanity.io/files/ixv7nalm/production/ec6bd3da8ad9ffc6146dce3fb8aa8bdc0fdae2e9.pdf.*
23. *The CRU Fertilizer Market Perspective The view and analysis behind the short-term forecasts January 2023 // CRU Group. URL: https://www.crugroup.com/en/communities/thought-leadership/2022/cru-fertilizers-top-ten-calls-of-2023/.*
24. *World Population Prospects 2022. United Nations, DESA, Population division. URL: http://population.un.org/wpp/.*
25. *Мировая аммиачная промышленность: анализ современного состояния и прогноз развития // Деловой журнал «Нефтегаз.ру». URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/ekonomika/795294-mirovaya-ammiachnaya promyshlennost-analiz-sovremennogo-sostoyaniya-i-prognoz-razvitiya-/.*
26. *Биотопливо: новые технологии для российского рынка // ИА «ПортНьюс». URL: https://portnews.ru/comments/3624/.*
27. *Гриффитс С., Уратани Дж. Низкоуглеродное топливо на основе аммиака // 3-й ежегодный доклад Ассоциации «Глобальная энергия». С. 4–19.*
28. *OVERVIEW. Nutrien. URL: https://nutrien-prod-asset.s3.us-east-2.amazonaws.com/s3fs-public/uploads/2022-06/Nutrien%202022%20Fact%20Book.pdf.*
29. *Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertilizer production. International energy agency Typeset in France by IEA — October 2021. URL: https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap.*
30. *Marine UHMWPE Pipe. URL: https://davidtech.en.made-in-china.com/product/HCfmAIEYIBcU/China-Marine-Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene-UHMWPE-Pipe.html.*
31. *Blue hydrogen. Meet mega-scale challenges with mega-scale solutions. Topsoe. URL: https://www.topsoe.com/blue-hydrogen.*
32. *Blue Ammonia. Towards a sustainable, reduced carbon economy. KBR. URL: https://www.kbr.com/.*
33. *Linde: сайт. URL: https://www.linde-engineering.com/en/process-plants/hydrogen_and_synthesis_gas_plants/gas_generation/tandem_reforming/index.html.*
34. *Matteo Masanti. Reducing the carbon footprint of ammonia as low carbon energy carrier. Casale. AIChE. Orlando 2019. URL: https://ammoniaenergy.org/presentations/reducing-the-carbon-footprint-of-ammonia-as-green-energy-carrier/.*
35. *Thyssenkrupp Uhde to build world-scale Blue Ammonia plant in Qatar Udhe Tyssen Krupp. URL: https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/thyssenkrupp-uhde-to-build-world-scale-blue-ammonia-plant-in-qatar-138369/.*

УДК 339.33:338.45 DOI 10.46920/2409-5516_2026_6221_10 EDN KNECST

Организация технологически нейтрального рынка мощности

Organization of a Technology Neutral Capacity Market

Кирилл ОВЧИННИКОВ
Магистр направления «Экономика инноваций в энергетике» (год окончания: 2026),
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
E-mail: owe4kink@yandex.ru

Ирина БАГРОВА
Магистр направления «Управление развитием организации» (год окончания: 2025),
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
E-mail: irinabagrova.0610@gmail.com

Татьяна БУГАЕВА
Доцент Высшей инженерно-экономической школы СПбПУ, к. э. н.

Kirill OVCHINNIKOV
Master's Degree in Economics of Energy Innovations (graduation year: 2026),
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
E-mail: owe4kink@yandex.ru

Irina BAGROVA
Master's Degree in Organizational Development Management (graduation year: 2025),
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
E-mail: irinabagrova.0610@gmail.com

Tatyana BUGAEVA
Associate Professor at the Higher School of Engineering and Economics at SPbPU, PhD in Economics



Артемовская ТЭЦ
Источник: dv.kp.ru

Аннотация. В работе рассматривается переход к технологически нейтральному рынку мощности с единой недифференцированной ценой для самооптимизации отрасли и исключения конфликта интересов регулятора. Рынок будет разделен на краткосрочный (вторичный рынок токенов, дающих право на доступ к оборудованию), среднесрочный (на год вперед) и долгосрочный (на несколько лет вперед), биржевой и внебиржевой сектора. Постепенная реформа приведет к более умеренному росту цен, что критически важно в условиях прогнозируемого дефицита и необходимости масштабного обновления фондов без избыточной нагрузки на экономику.
Ключевые слова: ОРЭМ, КОМ НГО, КОММод, ДПМ, технологически нейтральный отбор, инвестиционные механизмы, умные сети

Abstract. This paper examines the transition to a technology-neutral capacity market with a single, undifferentiated price, aimed at fostering industry self-optimization and eliminating regulatory conflicts of interest. The market will be structured into short-term (a secondary market for tokens granting access to equipment), medium-term (one year ahead), and long-term (multi-year) segments, comprising both exchange-traded and over-the-counter sectors. A gradual reform process will result in more moderate price growth — a critical factor given the projected capacity deficit and the need for large-scale asset renewal without placing an excessive burden on the economy.
Key words: wholesale electricity and capacity market, competitive selection of capacity for new generation, competitive selection of modernization projects, capacity supply agreement, technology-neutral selection, investment mechanisms, smart grids

Современное состояние ЕЭС России

Российская единая энергосистема сильно изношена: средний возраст оборудования превышает 34 года [1]. Наблюдаются локальные дефициты мощности, что подтвердил инцидент летом 2024 года, приведший к ограничениям на 1 ГВт, затронувшим около 2,5 млн потребителей [2, 3].

Согласно Генеральной схеме до 2042 года, требуется масштабная модернизация энергосистемы: ввод 88,5 ГВт новых мощностей, обновление 63,9 ГВт старых и вывод 45,2 ГВт устаревших ТЭС [4]. Реализацию планов осложняет высокая стоимость финансирования и низкая инвестиционная привлекательность. Это демонстрируют неудачные конкурсы (КОМ НГО) в ОЭС Юга (2024) [5], Дальнего Востока (2025) [6] и КОМ НГО на строительство новых генерирующих объектов для обеспечения вывода из эксплуатации ТЭС в Салехарде (2026) [8], на которые не было подано ни одной подходящей заявки, а также конкурсы КОММод 2029 и КОММод-ПГУ 2029–2031, где была отобрана мощность ниже объема квот [7].

Коммерция в электроэнергетике России разделена на генерацию, сбыт и передачу [9] и представлена оптовым (ОРЭМ) и розничным (РРЭ) рынками, а также электросетевым комплексом. На ОРЭМ работают крупные производители и потребители, сбытовые компании представлены на обоих рынках, а малая генерация — на розничном.

Торги на ОРЭМ делятся на два сектора: рынки электроэнергии и мощности. Торговля электроэнергией близка к рыночной модели. Рынок мощности работает по модели «единого закупщика»: потребители оплачивают мощность по средневзвешенной цене, а конкурентный отбор мощности (КОМ) формирует выручку для покрытия операционных затрат станций.

КОМ проводится в двух ценовых зонах (ЦЗ), минимальный объем мощности прогнозирует системный оператор. Цены ограничены правилами рынка (рис. 1) и недостаточны для возврата инвестиций.

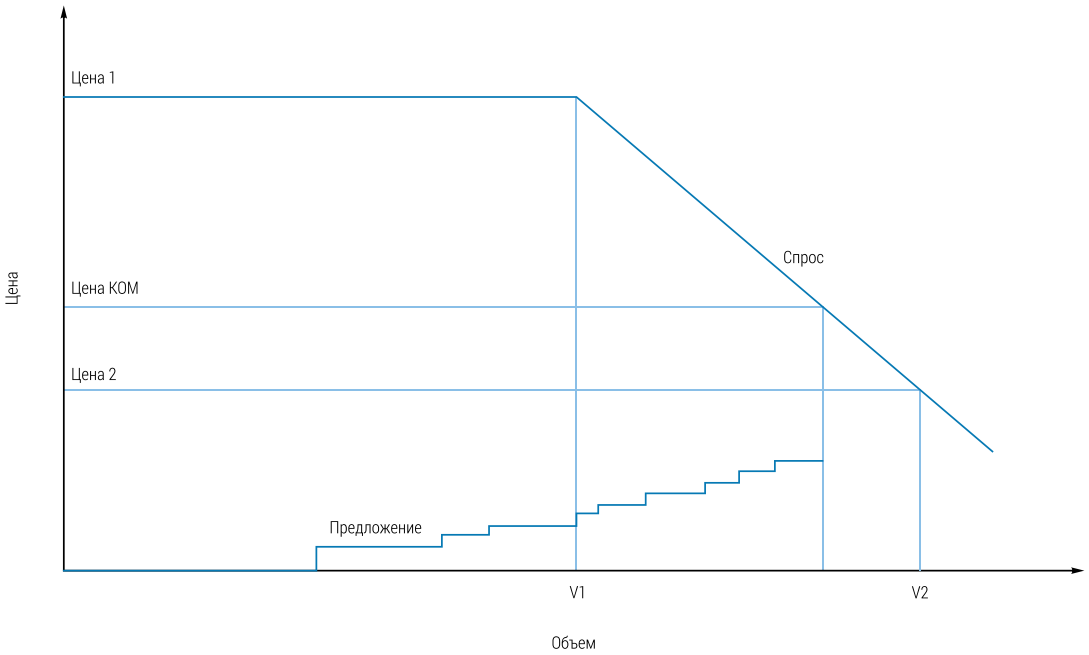


Рис. 1. Механизм ценообразования в КОМ (автор: Павел Берег)

Ранее отбор шел по зонам свободного перетока (ЗСП) с price cap, но из-за низкой конкуренции ЗСП укрупнили в ЦЗ, а price cap заменили «линией спроса». Это усилило конкуренцию, но нивелировало региональные особенности [10].

Новое строительство и модернизация обеспечиваются специальными механизмами (ДПМ, КОМ НГО, КОММод) по инициативе регулятора. В рамках инвестдоговоров к цене КОМ добавляется надбавка, гарантирующая возврат инвестиций.

Адаптация к спросу и обновление мощностей регулируются через рынок мощности, но прогнозирование объемов отбора затруднено из-за неопределенности спроса, отсутствия ответственности потребителя и недоучета эластичности.

В модели заложен конфликт интересов: регулятор должен одновременно сдерживать цены и обеспечивать развитие системы, что ведет к росту затрат. Это может вызывать как перестройку, так и задержки вводов ради снижения платежей. Человеческий фактор искажает планирование структуры генерации.

Старые мощности получают низкую цену на КОМ, что не позволяет формировать капитал для реинвестирования и не стимулирует продление срока службы оборудования. Обновление, которое при рыночной модели происходило бы естественно, ведется вручную через КОММод, что несет риск устаревания системы.

Риски ручного управления уже реализовались: несостоявшиеся конкурсы КОМ НГО и невыбранные квоты КОММод. Пример — конкурс КОМ НГО в ОЭС Юга в 2024 году, где не было заявок: норма доходности в 14 % [11] оказалась ниже ключевой ставки (16 %) и доходности ОФЗ (14–16,8 %) [12].

Энергосистема стареет (средний возраст оборудования — 34 года) [1], нарастают локальные дефициты мощности и электроэнергии, что указывает на ошибки планирования и (или) сдерживание цен регулятором. Генеральная схема до 2042 года требует 140 трлн руб. инвестиций при прогнозной выручке 98,5 трлн (дефицит 41,5

Обновление, которое при рыночной модели происходило бы естественно, ведется вручную через КОММод, что несет риск устаревания системы

трлн) [4]. При этом эластичность спроса в прогнозах не указана, что усугубляет риски неверного планирования.

Инвестиционные договоры (ДПМ, КОМ НГО) навязывают потребителю принудительный кредит: он оплачивает строительство через повышенные платежи, рассчитывая на компенсацию будущей низкой ценой мощности. Однако при снижении собственного потребления он не вернет вложения, а выгода от его инвестиций перейдет к другим потребителям. Так модель лишает потребителя свободы распоряжаться средствами, не гарантирует возврата инвестиций и создает риск безвозмездного перетока созданной ценности третьим лицам.

Продолжительный период умеренных цен в ЕЭС — следствие вложений предыдущих поколений, а не эффективности модели. Рост необходимой валовой выручки по Генсхеме сигнализирует о недоинвестировании в предшествующий период.

Текущая смешанная модель исчерпала себя: локальные дефициты, устаревание фондов, провалы конкурсов (ОЭС Юга, Дальний Восток) и непривлекательность для инвесторов доказывают ошибочность ручного управления. Назрела необходимость перехода к рыночной организации средне- и долгосрочного планирования, что позволит устранить дефициты, обновить генерацию и адаптировать энергетику к реальным потребностям экономики. Возможная модель такого рынка, учитывающая технологические ограничения отрасли, предложена в работе.

Организация рынка мощности

Базовый уровень предлагаемой модели — открытый одноставочный рынок,



Чиркейская ГЭС

Источник: akwatoria.ru

где торгуется электроэнергия по итоговой цене. Над ним существует двухставочный рынок, разделенный на торги мощностью и электроэнергией.

Оплата мощности трактуется как плата за доступ к генерирующему оборудованию, выступающая предоплатой в рамках первого этапа торгов. Это создает у покупателя право, а у продавца — обязанность по дальнейшей сделке с электроэнергией.

Торговля мощностью будет вестись либо по свободным двусторонним договорам, где условия выкупа электроэнергии определяются соглашением сторон, либо через централизованную биржу, где покупка электроэнергии затем возможна у любого генератора по прямому договору или через РСВ.

Обязательства по договору поставки мощности со специализированной Биржей мощности фиксируются через выпуск электронных ключей доступа (ЭКД). Этот токен дает право покупать электроэнергию в оговоренном объеме на отдельной закрытой бирже электроэнергии. В торгах на этой площадке участвуют только владельцы ЭКД. Для генераторов здесь действуют правила, предусмотренные договором о присоединении к бирже (например, подача заявок в соответствии с переменными издержками), что обеспечивает формирование более низких цен на электроэнергию по сравнению с открытым рынком.

Ключевой особенностью системы является полная связанность рынков через механизм арбитража. Участник, владеющий токеном Биржи мощности, может купить электроэнергию на закрытой площадке и перепродать ее на открытом одноставочном рынке. Генератор, в свою очередь, может выкупить ЭКД, чтобы освободить мощность для продажи на одноставочном рынке.

Рынок с разделением торгов на мощность и электроэнергию, позволяющий хеджировать риски негарантированной поставки и ценовой волатильности, может эффективно работать параллельно с биржей одноставочной цены. Такая гибридная модель особенно актуальна в контексте перспектив создания и внедрения общего энергетического рынка (ОЭР), предусматривающего одноставочную модель (рис. 2–4).

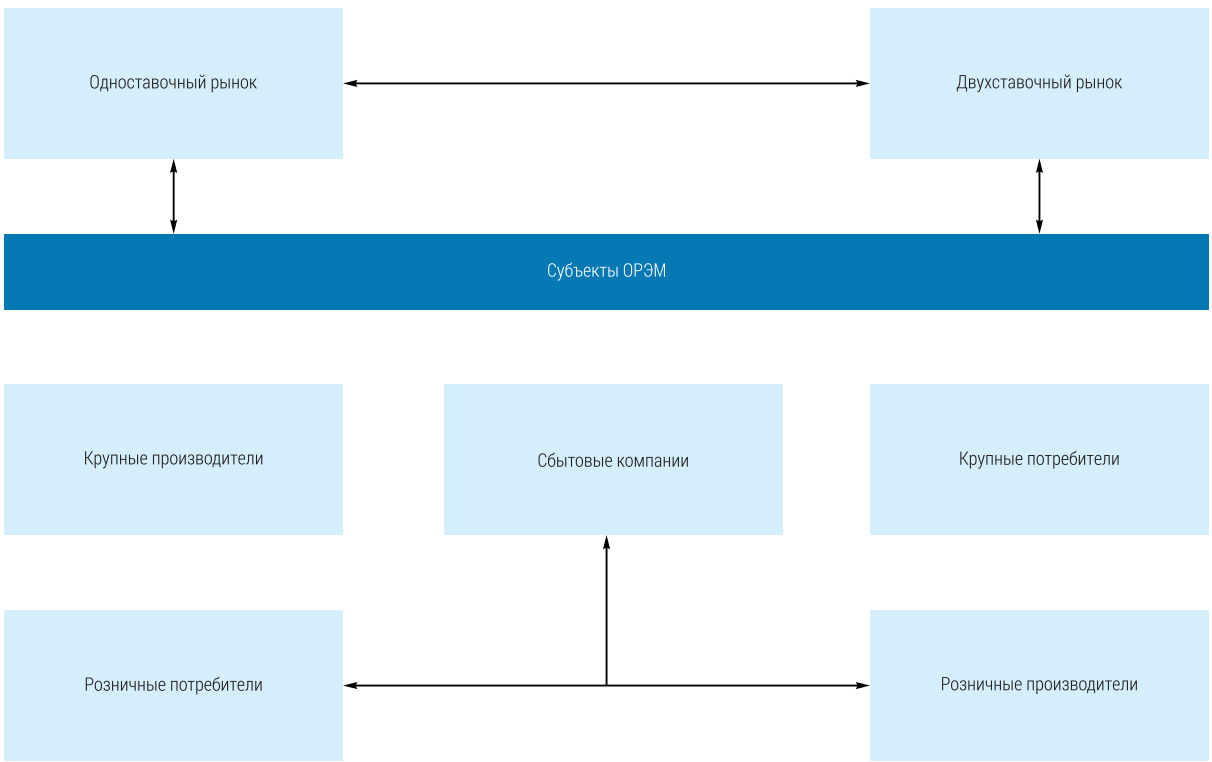


Рис. 2. Интеграция одноставочного и двухставочного рынков электроэнергии

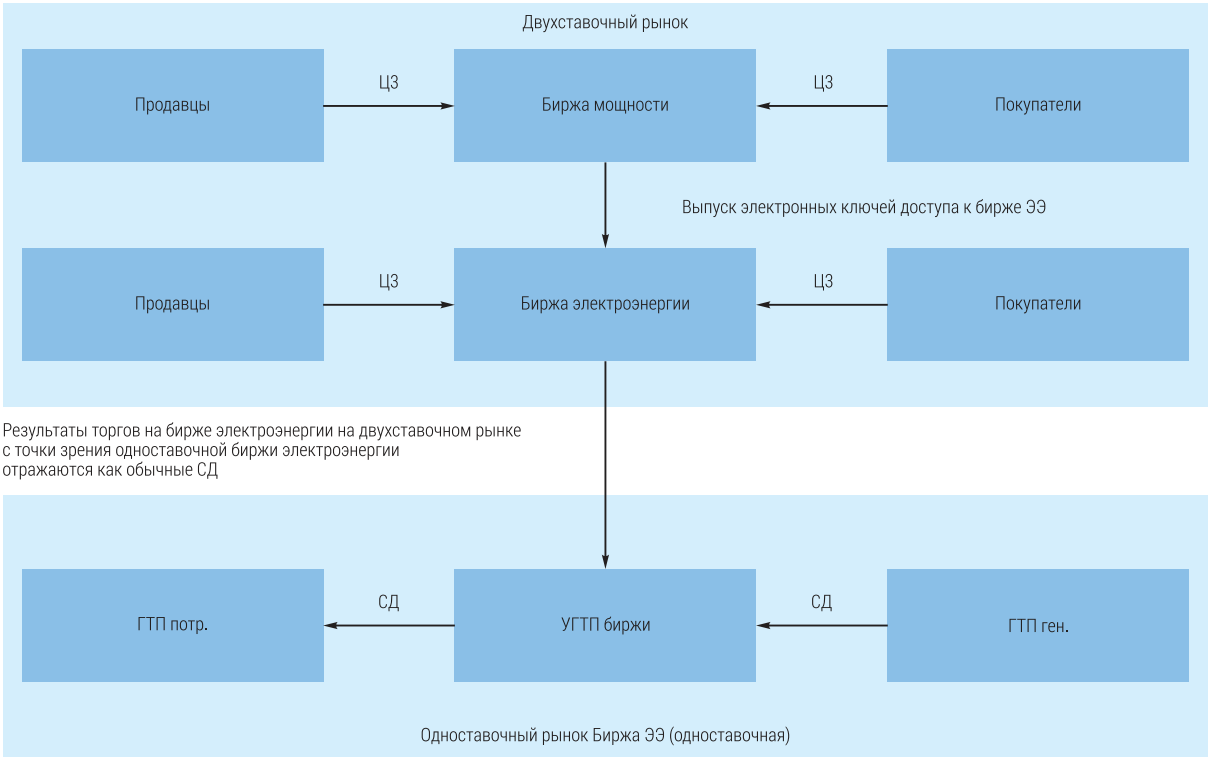
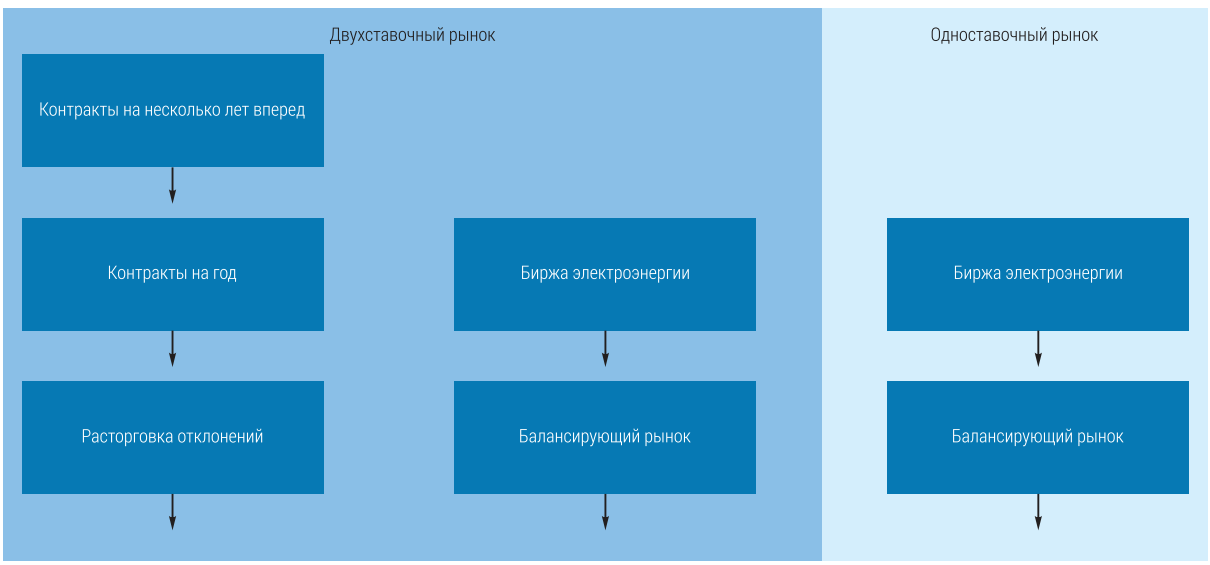


Рис. 3. Взаимосвязь одноставочного и двухставочного рынков



Свободные договоры

Могут включать в себя сложные правила договорных отношений и выполнять разные функции:

- Долгосрочные / краткосрочные
- Одноставочные / двухставочные
- Сложные условия расчета цены
- Условия диспетчеризации
- Разное число участников договора

Рис. 4. Порядок проведения торгов на одноставочном и двухставочном рынках

Организация торговли мощностью сложна в учете особенностей технологий производства (рис. 5). Очень важны такие свойства, как гарантированность генерации и ограничения на объемы выработки электрической энергии.

Обращение прав на мощность

Для регистрации заявок на доступ к мощности и их обращения предполагается выпуск ЭКД, дающих право покупать электроэнергию в заданных объемах и периодах у генератора, группы генераторов или на бирже.

Переуступка прав выступит корректирующим рынком и вместе с балансирующим рынком (БР) позволит актуализировать график РСВ. Избыточную мощность можно продать, снизив нагрузку, а недостающую — приобрести по более низкой цене. Финансовая нагрузка минимизируется для тех, кто точнее прогнозирует потребление, что стимулирует снижение издержек.



Южно-Сахалинская ТЭЦ
Источник: sakhalinenergo.ru

Если генератор не может обеспечить выработку, он вправе выкупить на вторичном рынке права на нее у потребителя, готового отказаться от потребления, или у генератора без обязательств. Если выкупить не удалось и последовало принудительное отключение, договор на поставку мощности считается неисполненным за

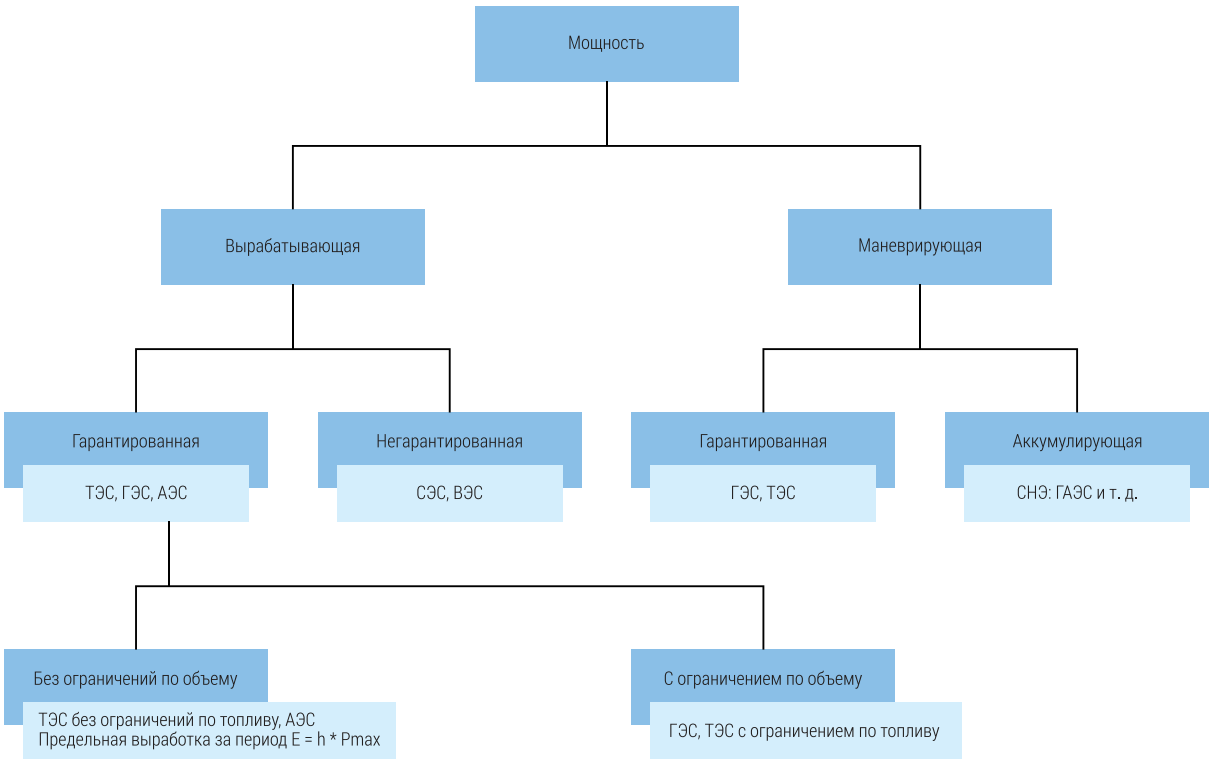


Рис. 5. Классификация технологий производства электроэнергии

Текущая смешанная модель исчерпала себя: локальные дефициты, устаревание фондов, провалы конкурсов (ОЭС Юга, Дальний Восток) и непривлекательность для инвесторов доказывают ошибочность ручного управления

весь период: недопоставленная мощность не оплачивается, возможно начисление компенсации.

Это заменяет систему штрафных коэффициентов рыночным механизмом. Цена ошибки снижается в периоды низкого спроса и многократно растет в пиковые, мотивируя поставщиков снижать риски — через повышение надежности оборудования, приобретение резервов или страхование.

Такие правила стимулируют заключение договоров с технологическими страховщиками, которые могут замещать мощности в нештатных ситуациях или компенсировать упущенную выгоду. Затраты на страхование, зависящие от технического состояния, будут учитываться в ценовых заявках, что позволит отражать не только расходы на содержание, но и фактор надежности. Это особенно важно, поскольку риски отказа крупного блока выше, чем малого, но при централизованном отборе резервов учесть это сложно. В модели с добровольным страхованием оценка рисков ложится на самих агентов, а большая часть резервных мощностей выводится на отдельный рынок. В ведении регулятора остается лишь резервирование для регулирования частоты, напряжения и непрогнозируемых ЧС федерального масштаба.

Вместе с БР рынок торговли мощностью в реальном времени позволяет оперативно и экономически обоснованно корректировать графики производства и потребления.

Двусторонние договоры

Базовой формой договорных отношений являются свободные двусторонние договоры на поставку мощности. Условия (периоды и объемы резервирования, графики производства и потребления, тарифы на покупку электроэнергии по або-



Южно-Сахалинская ТЭЦ

Источник: холдинги.рф



Байкальская ТЭЦ Источник: sibmix.com

нентским договорам) определяются субъектами.

Заключение таких договоров требует взаимодействия с инфраструктурой (сетевой и диспетчерский комплекс), которое может быть организовано через специализированный маркетплейс. На нем субъекты оптового рынка формируют заявки на покупку/продажу мощности.

Например, электростанция указывает место подключения и предлагает доступ к покупке электроэнергии с учетом графиков доступной мощности (ремонты, погодные условия) на индивидуальных условиях. Договор может включать разделение на постоянную и переменную части, одноставочную цену, зависимость выплат от графика потребления. Наиболее вероятен вариант: оплата мощности за год и цены на электроэнергию, зависящие от загрузки (Pmin/Popt/Pmax), цены топлива и сезона.

Покупатель, оценив рынок, выбирает точку поставки и подает заявку с приемле-

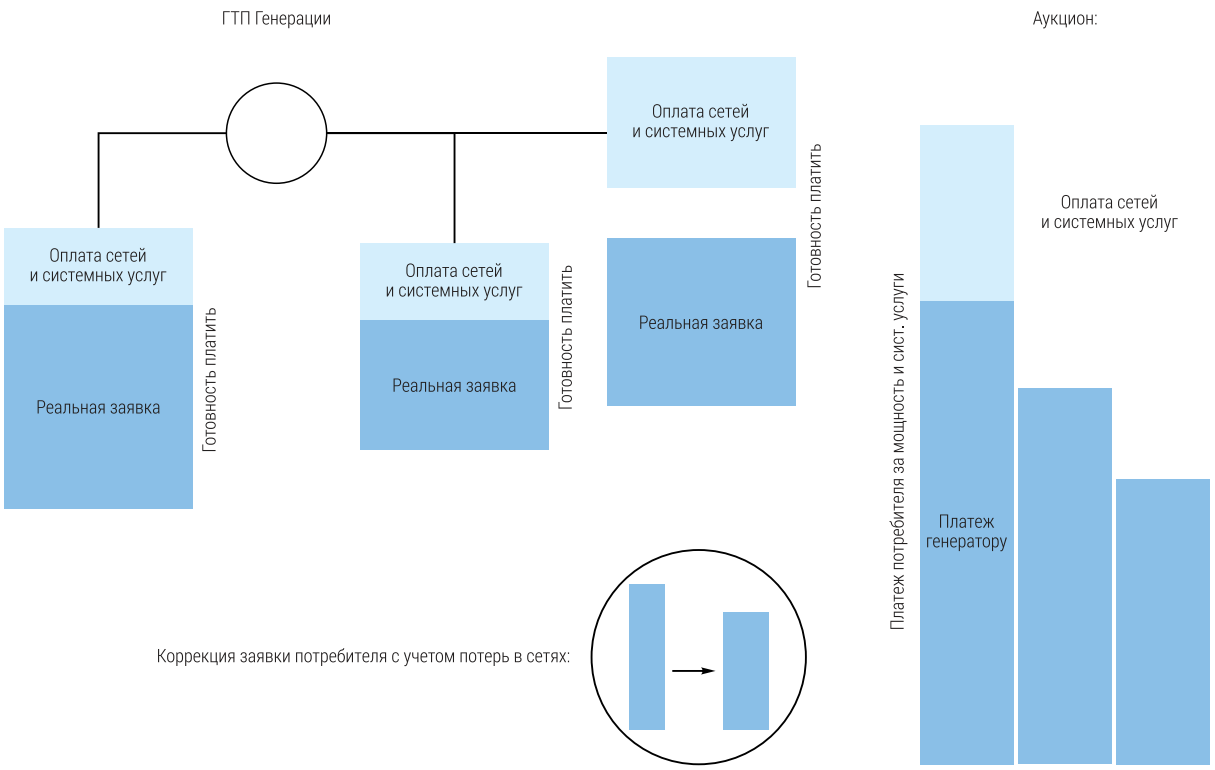


Рис. 6. Аукцион на заключение свободного договора на поставку мощности

мой ценой на мощность. Системный оператор и «Россети» рассчитывают потери в сетях, расходы на использование сетей и системные услуги. Заявка модифицируется с учетом этих затрат и в очищенном виде участвует в аукционе на покупку мощности. Аналогично потребитель может выставить заявку на покупку мощности, в аукционе которой участвуют генераторы (рис. 6).

Заключение свободных договоров проще в организации, чем единые торги, но менее удобно, чем подача унифицированной заявки на все аукционы сразу. Это подводит к идее централизованных торгов на мощность.

Организация биржи мощности

Проведение централизованных торгов мощностью, в отличие от свободных договоров, должно быть унифицировано по периодам (кратно году) и форме договора.

Для рынка мощности значимы два свойства генерации: гарантированность выдачи и обеспеченность выработкой. Учет объемов потребления позволяет продавать не обеспеченную выработкой мощность (например, у ГЭС), избегая резервирования избыточных мощностей и снижая расходы потребителей.

Унифицированная форма заявки субъекта оптового рынка включает:

1. заявку на продажу/покупку обеспеченной мощности;
2. заявку на продажу не обеспеченной мощности;
3. заявку на резерв выработки.

Важно добавить связанность объемов: покупка выработки (для заряда СНЭ или ГЭС с ограничением) актуальна только при отборе заявки на продажу мощности. Выкуп мощности для таких целей идет на вторичном рынке, а затраты включает в цену продавец.

Потребители, готовые снизить нагрузку, и ВИЭ с негарантированным графиком подают заявки с указанием объема и цены снижения/выработки. Цена выработки маржинальная (рис. 7).

Целесообразно разделение цен на резерв выработки по периодам гарантированной поставки: генераторы смогут приобрести выработку и перераспределить ее внутри периода.

Для заявок на не обеспеченную выработкой мощность моделируется выкуп выработки: стоимость мощности суммируется

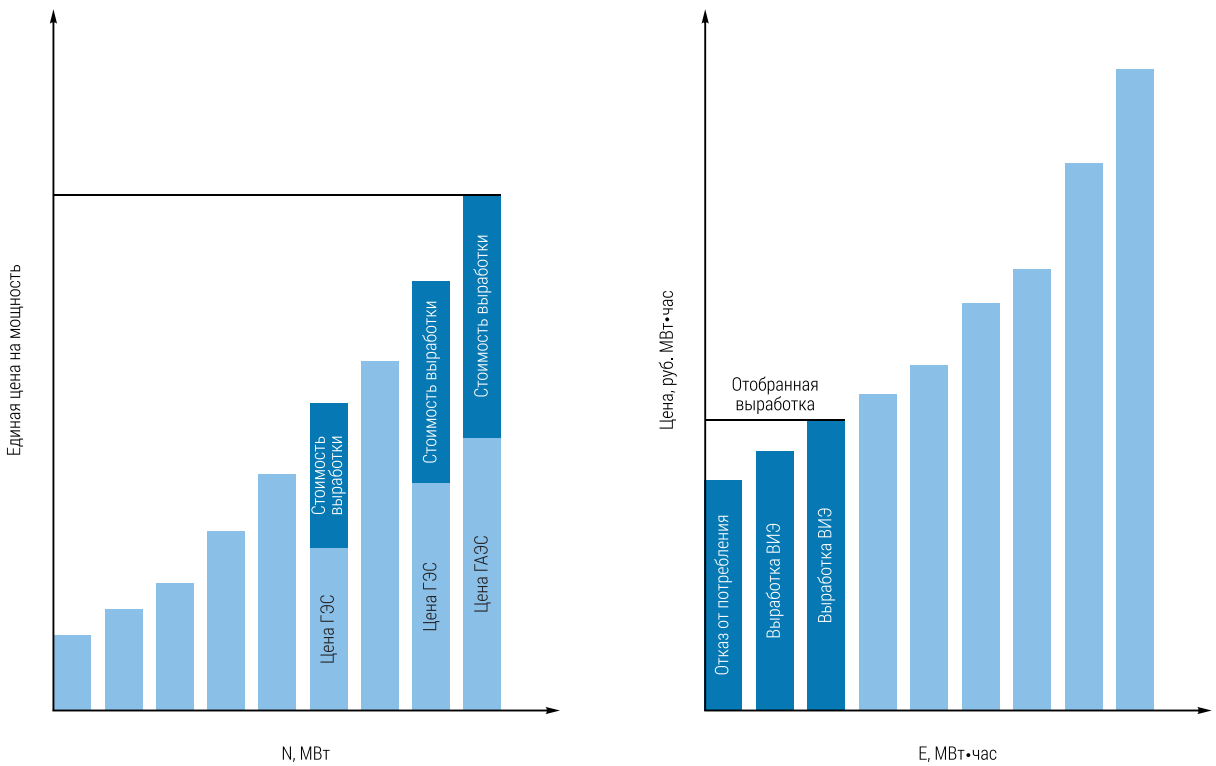


Рис. 7. Формирование единой цены на мощность и на выработку



Богучанская ГЭС Источник: odelax.ru

с расходами на покупку электроэнергии, итог делится на обеспеченный и добавочный объем. Если цена снижается — это первая ступень заявки, если растет — следующая ступень для продажи добавочного объема.

Для учета территориального фактора отбор ведется по зонам свободного перетока. Заявки генераторов модифицируются с учетом прогнозных потерь, из заявок потребителей вычитаются затраты на сетевые и системные услуги (рис. 8).

При покупке мощности для защищаемых категорий (население) допустимо использовать регулируемые договоры на мощность на нормативный объем.

Организация биржевой торговли

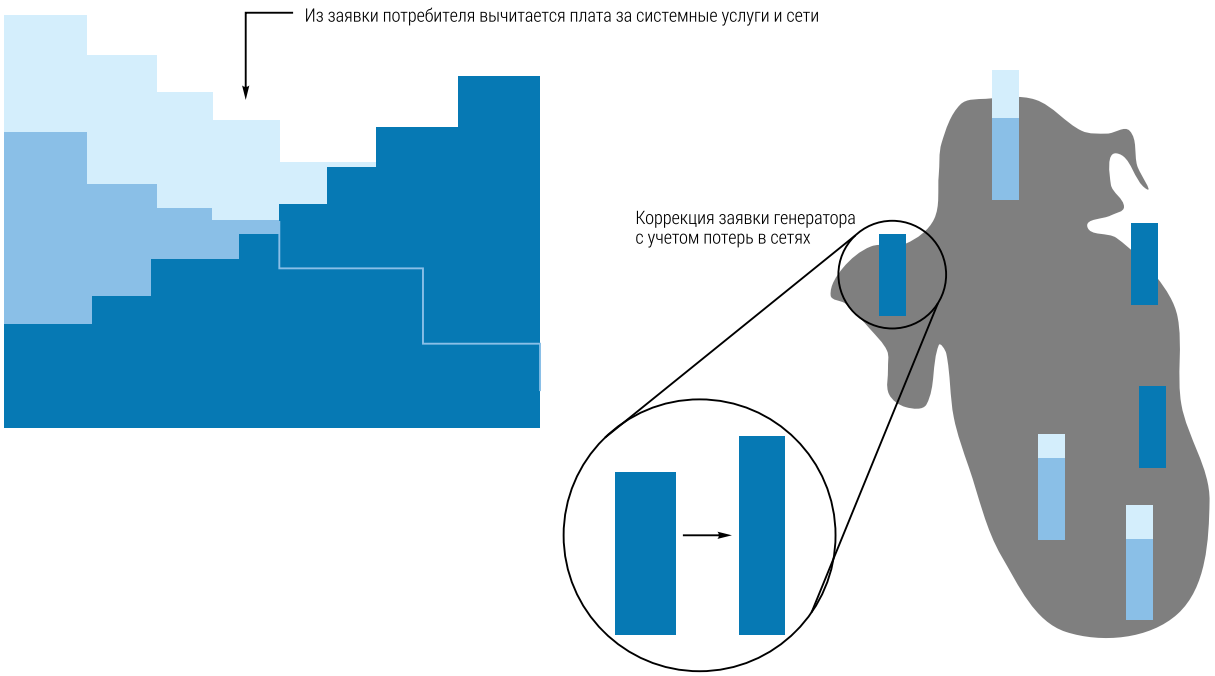


Рис. 8. Организация биржевой торговли мощностью по зонам свободного перетока



Ленинградская АЭС-2 Источник: titan2.ru

Роль свободных договоров в оптимизации совокупных издержек на двухтоварном рынке электроэнергии

При биржевом ценообразовании на двухтоварном рынке преимущество имеет генерация с меньшей долей капитальных и постоянных затрат. Она может подавать на рынок мощности более низкие ценовые заявки (даже при большей себестоимости производства), поскольку большая часть издержек возвращается на рынке электроэнергии (рис. 9). На длинной дистанции при наличии только биржи не будет оптимизации по совокупным затратам.

Корректировать дисбаланс будут двусторонние договоры. По ним поставщики с меньшей одноставочной ценой смогут предложить покупателям со стабильным спросом более выгодные условия, чем сложились бы на бирже. Часть потреби-

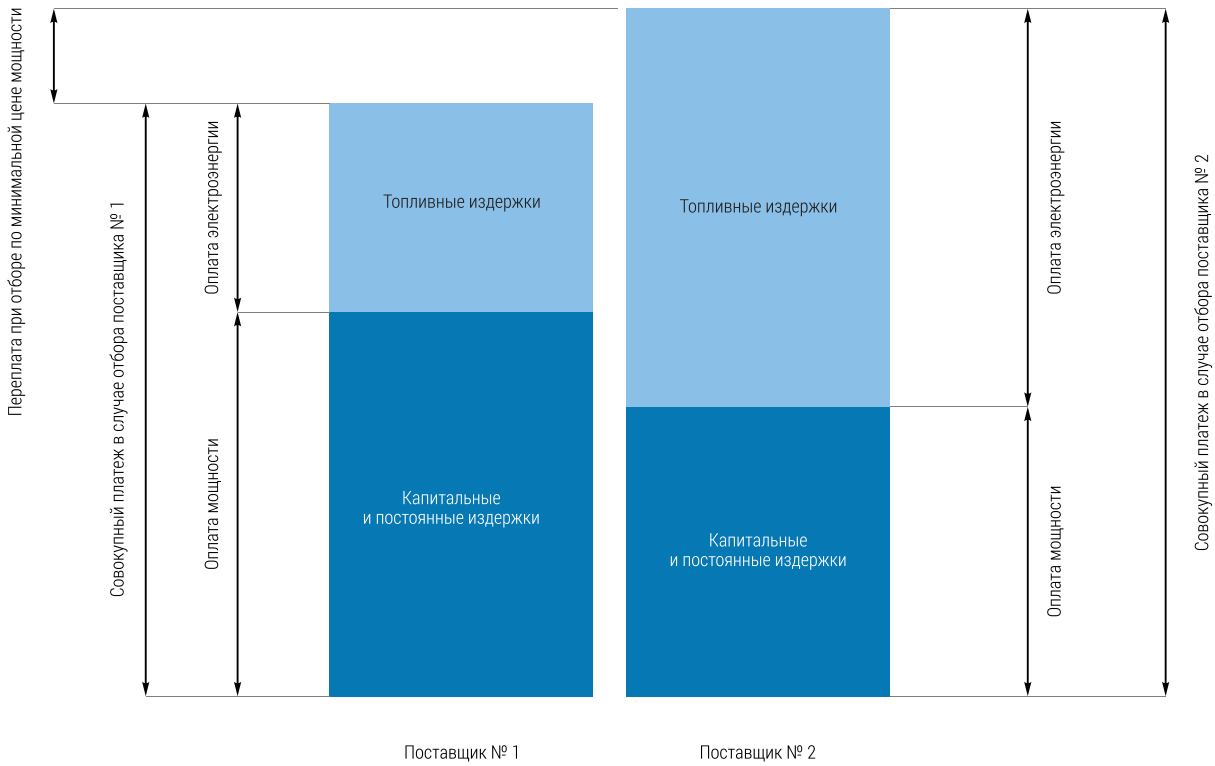


Рис. 9. Преимущество технологий с высокими переменными издержками при биржевых торгах на мощность в двухтоварной модели рынка

телей будет переходить с централизованного отбора на свободные договоры, что способствует самосогласованию цен в биржевом и внебиржевом секторах и обеспечивает оптимизацию отрасли по совокупным затратам.

Развитие фьючерсных и форвардных рынков

После ввода электростанции в эксплуатацию рациональная ценовая стратегия для генератора при проведении отбора однократно — подача заявки на уровне операционных расходов, поскольку любая цена выше этой границы сокращает убытки (рис. 10). В результате ценовые сигналы к строительству новых мощностей возникают с запаздыванием, уже в момент возникновения дефицита.

Для снижения волатильности отборы мощности следует проводить на несколько лет вперед. Мощность для года n должна приобретаться на торгах, проводимых в периоды с n–y по n–1 (табл. 1). Наличие нескольких возможностей подать заявку позволяет владельцам действующих станций указывать цену выше операционных затрат. Это формирует уровень цен, достаточный для возврата инвестиций, без резких скачков.

Таблица 1. Отбор мощности на несколько лет вперед

Год отбора	Цена мощности отобранного года		
	X+1	X+2	X+n
X	837 942	811 494	862 515
X+1	–	794 422	881 682
X+n	–	–	896 087

На многолетних торгах целесообразно ввести особый тип заявок для новых мощностей (на приведенный денежный поток), подаваемых сразу на несколько лет (рис. 11). Участник, подавая такую заявку, принимает обязательство покупать или поставлять мощность в течение всего срока договора. Однако обязательство действительно только при условии положительного совокупного финансового результата от разницы между заявленной и финальной ценой контракта.

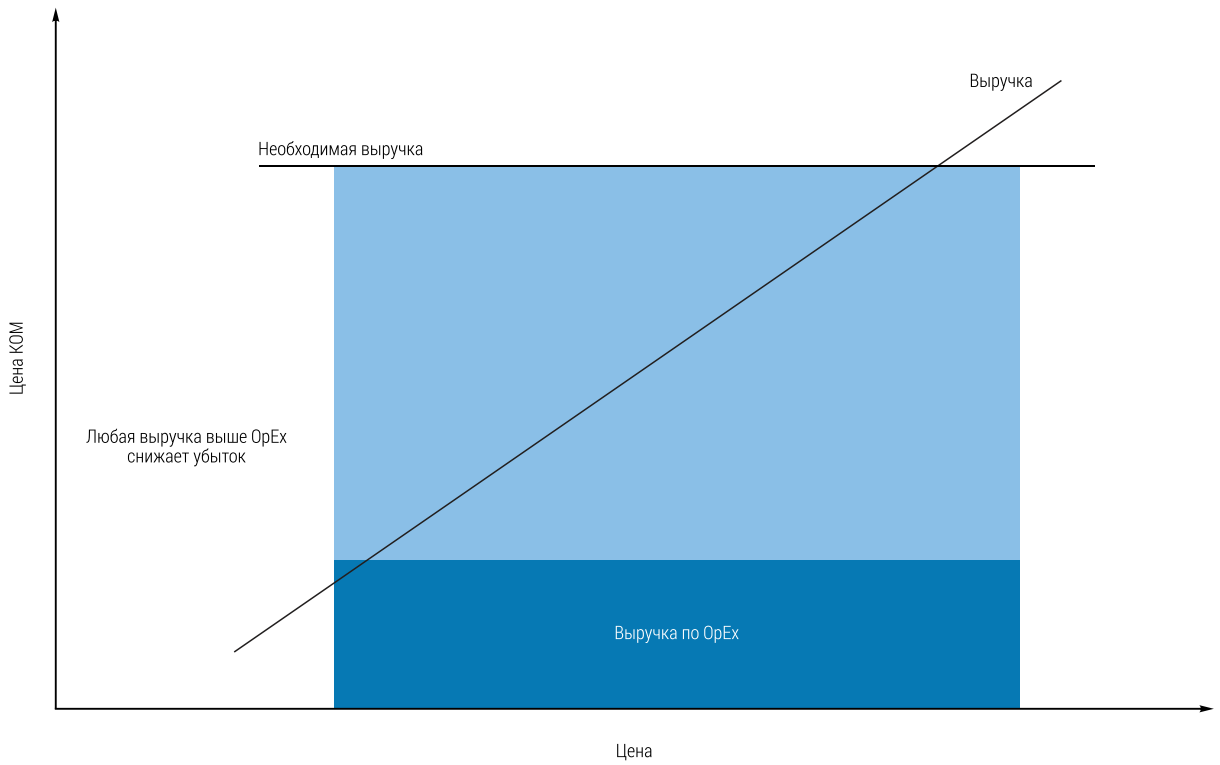


Рис. 10. Рациональная ценовая стратегия при однолетнем отборе мощности

На первом этапе расчета такая заявка учитывается как обычная ценовая. Если в каком-либо году мощность не отбирается, заявку на этот период переводят в категорию «ценопринимающих» и проводят пересчет. При отрицательном итоговом результате заявка исключается из расчета полностью и процедура повторяется без учета заявки.

В условиях конкурентной среды внедрение многолетних отборов и специализированных заявок на денежный поток существенно сокращает премию за риск.

Ограничением служит короткий горизонт планирования большинства участников и рост вычислительной сложности при проведении торгов на длительную перспективу.

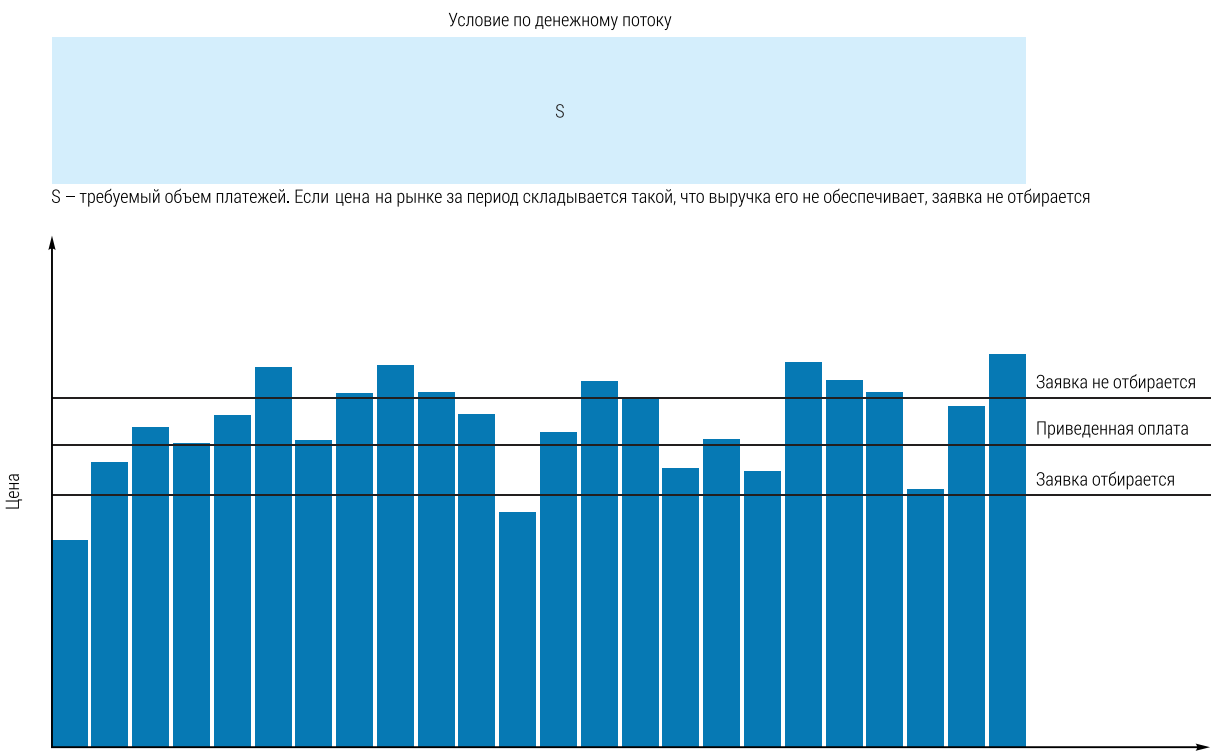
Более долгосрочные отношения следует реализовывать через двусторонние договоры. Среди покупателей мощности на длительный срок можно выделить:

1. Бизнес со стабильными финансовыми показателями, заинтересованный в хеджировании рисков.
2. Энерготрейдеров, прогнозирующих рост спроса и приобретающих мощность для последующей перепродажи.

Адаптация к спросу и обновление мощностей регулируются через рынок мощности, но прогнозирование объемов отбора затруднено из-за неопределенности спроса и отсутствия ответственности потребителя

3. Для проектов с особо длительным сроком службы (ГЭС, АЭС) в роли энерготрейдера может выступать регулятор, заключая двусторонний договор с целью перепродажи мощности ближе к периоду поставки.

Таким образом, развитие фьючерсных и форвардных долгосрочных рынков позволяет значительно снизить риски цено-



S – требуемый объем платежей. Если цена на рынке за период складывается такой, что выручка его не обеспечивает, заявка не отбирается

Рис. 11. Принцип отбора ценовой заявки с условием отбора по денежному потоку

вых скачков и обеспечить стабильность и предсказуемость для всех участников.

Организация розничного рынка

Особую сложность представляет организация торговли со сбытовыми компаниями. Для средних потребителей со стабильным графиком расчет заявок не составит труда. В случае мелких потребителей (МСП, население) достоверно спрогнозировать график потребления невозможно. Для успешной работы сбытовых компаний могут быть востребованы те же механизмы, что и на оптовом рынке, но их внедрение может потребовать новых технических средств.

Между сбытовыми компаниями и малыми потребителями потребуется заключить абонентский договор на определенную мощность и объем потребления за период. При необходимости потребить больше цена на добавочный объем формируется исходя из рыночных цен.

Возможно сальдирование отклонений внутри сбытовой компании. При наличии избытка электроэнергии и зарезервированной мощности потребитель может подать ценовую заявку на отказ от потребления в определенные часы. Потребители, превысившие договорные объемы, оплачивают сверхдоговорной объем так, как будто подали предустановленную в счетчике ценовую заявку, и отключаются, если цена покупки сложится выше цены заявки (страховка от скачков цен). Потребители, не готовые к планированию, могут заключать договор на предоставление невостре-

При биржевом ценообразовании на двухтоварном рынке преимущество имеет генерация с меньшей долей капитальных и постоянных затрат. Она может подавать на рынок мощности более низкие ценовые заявки



Хабаровская ТЭЦ-4 и Артемовская ТЭЦ-2 Источник: Русгидро

бованной мощности с возложением на сбыт обязательств по прогнозированию их совокупного потребления. Для удовлетворения спроса сверх заявки на РСВ сбытовой компании необходимо синхронизировать розничный, балансирующий и вторичный рынок мощности в части учета отклонений.

Правила расторговки отклонений определяются договором со сбытовой компанией и обеспечивают доходность с учетом выкупа отклонений на оптовом рынке. Цена сверхнормативного потребления определяется как минимум из затрат на покупку с ОРЭМ или у потребителей данной сбытовой компании. При продаже избытков в часы низкого спроса мощностная составляющая снижается, мотивируя потребителей к сглаживанию графика.

При отсутствии доступной мощности в энергосистеме объем сверх договора удовлетворяется, только если по цене заявки розничного потребителя найдется необходимый объем предложения у потребителей с гибким графиком.

Для населения потребуются нормативы резервирования мощности и объемов потребления, на которые заключаются регулируемые договоры. Сверхнормативное потребление приравнивается к промышленному потреблению и оплачивается по общим правилам.

В такой системе сможет работать распределенная малая и микрогенерация, поставляя электроэнергию внутри локальной части энергосистемы по рыночным ценам или транслируя ее на оптовый рынок.

Переход на подобные правила открывает возможность создания маркетплейсов для торговли электроэнергией малых потребителей и перехода на smart grid в части создания интернета энергии (EnergyNet) с тесной интеграцией розничных потребителей и производителей в единую энергосистему (рис. 12).

Организация переходного этапа

Для оценки порядка тарифных последствий был проведен модельный расчет проекта электростанции в существующей и предлагаемой модели.

Помимо архитектуры целевой модели рынка электроэнергии и мощности, важно также продумать процесс перехода к ней

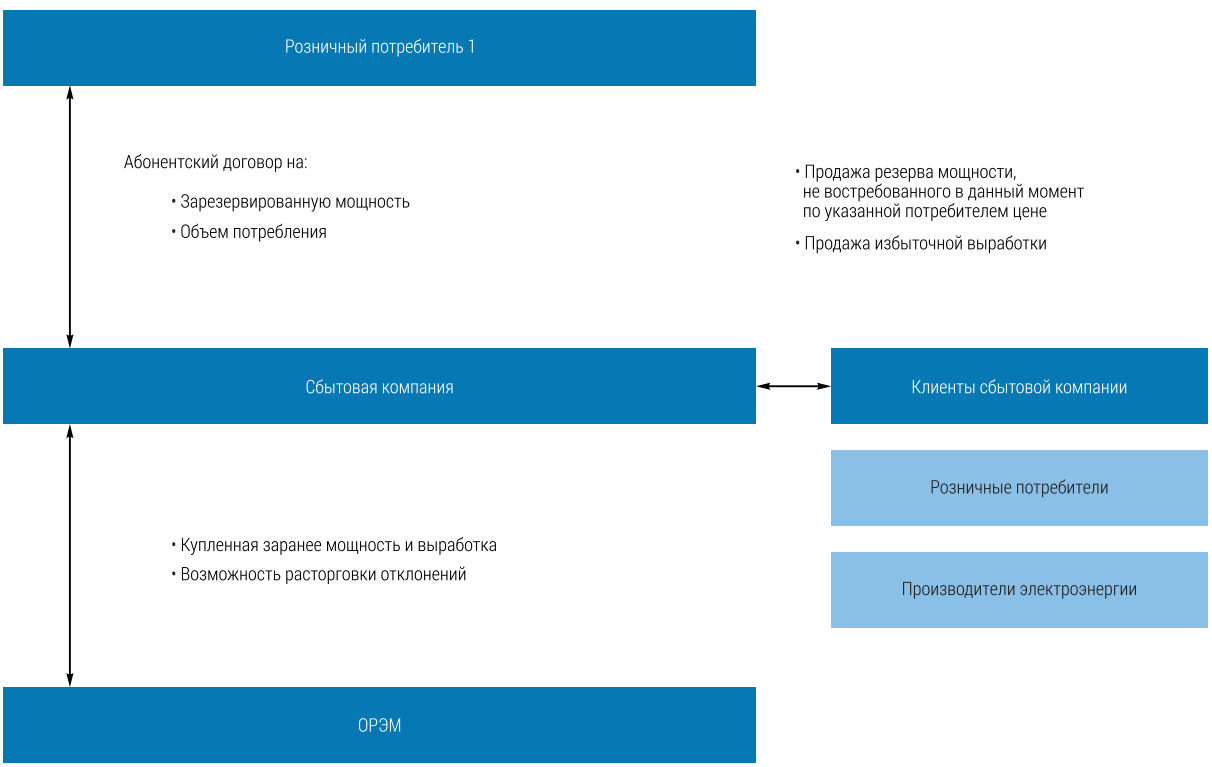


Рис. 12. Интеграция розничного и оптового рынка электроэнергии и мощности



Трансмиссионные вышки ЛЭП Источник: ksenjuk.andrey@gmail.com, depositphotos.com

от существующей модели. На текущий момент строящиеся и недавно построенные по инвестиционным механизмам станции уже несут обязательства (в том числе долговые), которые брали на себя исходя из существующих правил. По общему правилу законы, ухудшающие положение субъектов, не должны иметь обратной силы. В связи с этим для существующих электростанций финансовый поток должен быть не ниже, чем при существующей модели.

Для электростанций, срок выплат по инвестиционным механизмам которых уже закончился, покупатели имеют право определенный период покупать мощность по более низким ценам КОМ (исходя из концепции текущего рынка как совмещения договора о поставке мощности и договора о кредитовании).

Таким образом, потребуются переходные правила, которые пролонгируют существующие права и обязанности сторон.

Среди возможных механизмов, имитирующих существующие условия, можно выделить:

1. Заключение регулируемых договоров по существующим станциям.
2. Заключение контрактов на разницу цен (CFD).

Таким образом, для станций, чей срок инвестиционных договоров еще не прошел, будут заключаться либо регулируемые до-

ЛЭП в полях
Источник: pxhere.com



Ново-Зиминская ТЭЦ
Источник: proza.ru





Рис. 13. Нарушение прав генерирующих компаний и потребителей в случае единомоментного перехода к модели единой цены на мощность

говоры на поставку мощности, либо контракты на разницу цен, по которым потребители ценовых зон будут обязаны оплатить разницу между рыночной ценой на мощность и ценой на мощность, указанной в инвестиционном договоре. После завершения инвестиционного договора на какой-то период (или до достижения какого-то условия) должны заключаться либо регулируемые договоры, либо CFD, денежный поток станциям по которым будет равен денежному потоку при продаже по прогнозным ценам КОМ (рис. 13).

Сложным этическим, юридическим и экономическим вопросом является определение срока, в течение которого мощность будет поставляться по цене КОМ. Диапазон возможных решений выглядит следующим образом:

1. Новые правила торговли мощностью будут распространяться только на мощность, поставляемую по этим механизмам. Старая мощность будет вначале поставляться по ценам КОМ, а после превышения расходов на поддержание станции этой цены — по регулируемым ценам, что будет имитировать вынужденную поставку мощности. После превышения регулируемой цены рыночной станция переходит в полное владение собственнику, который может по собственному усмотрению и на свои средства ей распоряжаться (закрыть, модернизировать, вывести в резерв).
2. Подобно переходу на ОРЭМ необходимо будет установить проценты либерализации. Каждый год будет устанавливаться

В модели заложен конфликт интересов: регулятор должен одновременно сдерживать цены и обеспечивать развитие системы, что ведет к росту затрат. Это может вызывать как перестройку, так и задержки вводов

процент мощности, которая подлежит продаже по новым правилам.

3. Новые правила торговли будут распространяться на существующие станции после прохождения определенного периода времени по завершении инвестиционного договора. Определение такого срока является сложной задачей.
4. Новые правила будут действовать сразу для всей мощности, в том числе старой.

Резкий переход, в рамках которого вся мощность будет продаваться и покупаться по новым правилам, грозит нарушением прав всех сторон рынка и резким ростом цен. От подобного сценария более всего выиграет генерация, построенная недавно, но срок инвестиционных договоров либо завершен, либо подходит к концу, поскольку им будут дважды оплачены капитальные затраты.

В случае установления периода поставки мощности после завершения инвестиционного договора, в течение которого мощность будет поставляться по прогнозным ценам, которые бы сложились в КОМ, финансовое положение улучшат владельцы давно построенных станций, имеющие низкие или отрицательные показатели эффективности при текущих ценах. Эти средства могут быть как направлены на формирование фонда под реинвестирование, так и пойти на выплаты инвесторам. Нагрузка на потребителей возрастет за счет необходимости платить старой генерации полную цену (темпы роста цен будут сильно зависеть от установленного периода).

Установление переходного периода в виде норм либерализации на существующую мощность может позволить снизить темпы роста цен. Однако в этом случае, без дополнительных правил, возможно несправедливое обогащение относительно новых станций, а также отсутствие роста выручки старых станций, более всего в нем нуждающихся. Данная диспропорция, ко-



Абаканская ТЭЦ

Источник: suek.ru



Ветряные мельницы в Адыгее

Источник: yuga.ru

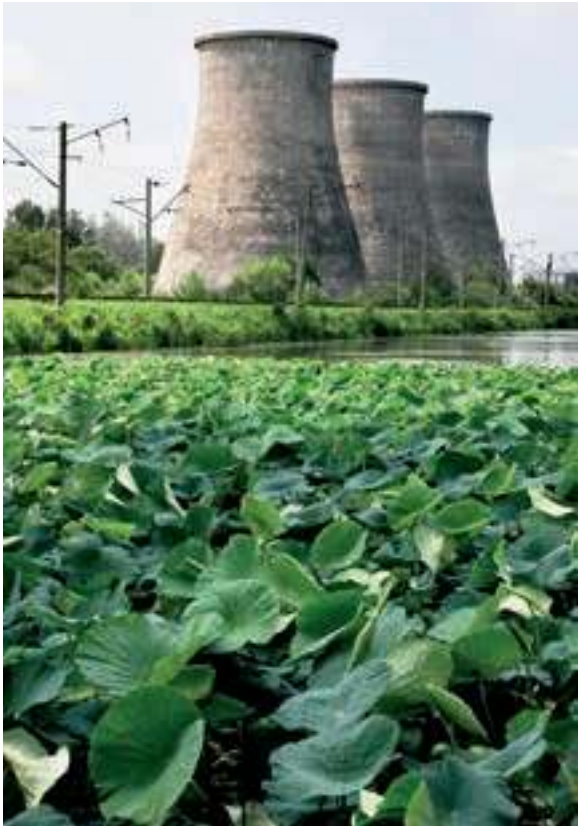
гда одни станции имеют более короткий период продажи по более низким ценам, а другие — более длинный, без каких-то объективных факторов, объясняющих это различие, нарушает правило недискриминационного доступа, в рамках которого разные поставщики за один и тот же товар одинакового качества в одинаковых условиях должны получать одинаковую цену.

В случае, если правила торговли будут распространяться только на новые мощности, а старые будут получать оплату по механизмам, имитирующим существующие, темпы роста цен будут меньше, чем при строительстве новой генерации по текущим правилам, поскольку ввод новых мощностей будет производиться по ценам ниже, чем при инвестиционных механизмах (поставщик сможет рассчитывать, что положительный денежный поток для него сохранится и после 20 лет, которые бы он получал оплату по инвестиционному механизму).

Для моделирования перехода на новую модель рынка использовался укрупненный расчет инвестиционного проекта по условиям конкурса КОМ НГО в ОЭС Юга летом 2024 года. Цены на мощность были приведены в соответствие инфляции и средним значениям за период, что позволило оценить порядок цен при текущей модели. Аналогичным образом была подобрана такая цена на мощность, чтобы при ее ежегодном росте в соответствии с темпами инфляции IRR был равен IRR проекта КОМ НГО (11,72 %).

Порядок цен при текущей был определен путем осреднения цен на мощность (за вычетом инфляции) и составил 1 443 тыс. руб. / МВт в месяц в ценах 2025 года. Цена на мощность (2 528 тыс.руб. / МВт.мес. в ценах 2025 г.) при единой цене установится после переходного периода на 75,15 % выше цены при наличии инвестиционных механизмов. За счет того, что при переходе на новую модель стоимость новой мощно-

Артемовская ТЭЦ-2
Источник: Русгидро



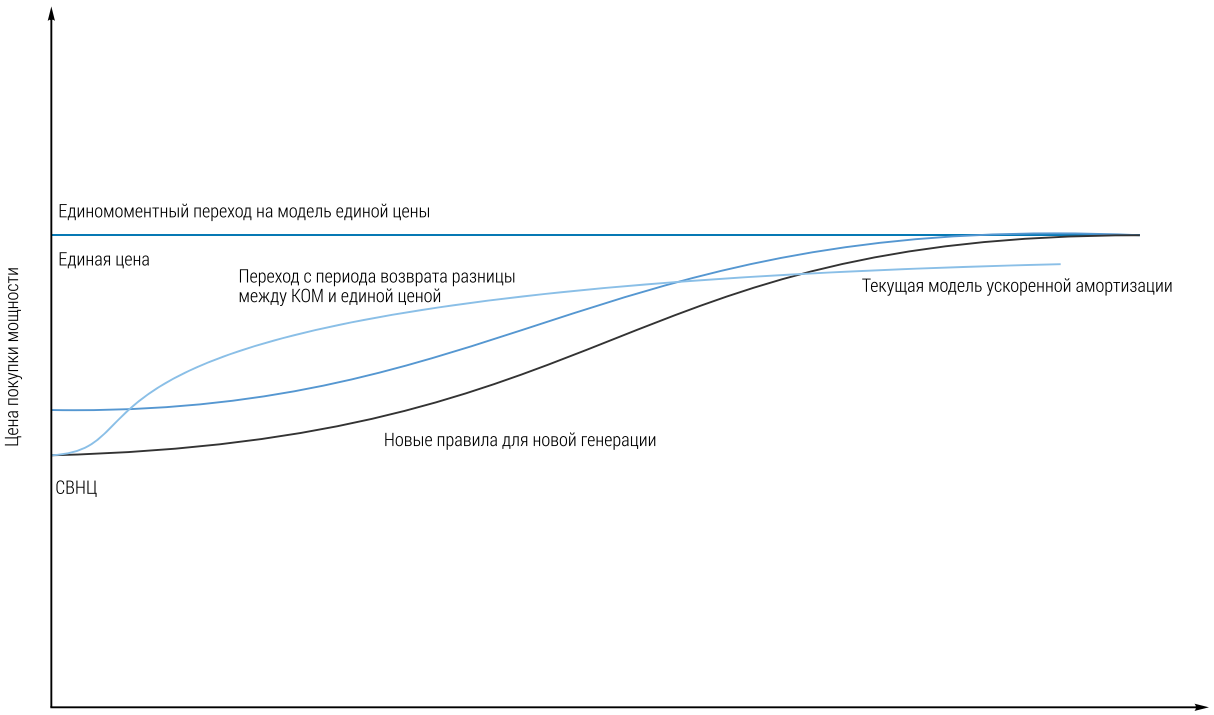


Рис. 14. Графики цен для сценариев переходного периода

сти будет меньше, чем по инвестиционным механизмам, темпы роста средневзвешенных цен будут ниже. В данной модели генерирующие компании, владеющие старыми электростанциями, не смогут сформировать амортизационный фонд под реинвестирование в будущем, что может в дальнейшем грозить шоковым ростом цен после исчерпания ресурса из-за дефицита инвестиционного капитала.

В случае другого граничного случая (переход на новые правила для всех) цена резко увеличится на 52,26 % без учета факторов, связанных с возможным шоковым ростом цен, и удорожания строительства и продукции энергомашиностроительного комплекса.

Таким образом, при проведении реформы рынка мощности необходимо будет определить приоритет:

1. Снижение роста цен в краткосрочной перспективе.
2. Накопление капитала в отрасли.

В зависимости от выбора модели переходного периода динамика цен для потребителя будет отличаться (рис. 14).

Переход на рынок мощности можно провести по широкому диапазону стратегий — от резкого перехода на новую модель до сохранения текущих правил торговли для существующей генерации

Выводы

Существующая модель рынка подвергается обоснованной критике. В нее заложены проблемы, адекватного решения которых пока не было представлено в научной и отраслевой среде. Одним из возможных сценариев выхода из сложившейся ситуации видится перевод секторов генерации, потребления и сбыта на рыночную форму организации.

Перспективная форма организации электроэнергетики включает в себя:

1. Технологически нейтральный рынок мощности с единой ценой на один и тот

же товар в одинаковых условиях.
2. Многоуровневую систему торговли мощностью (фьючерсные и форвардные рынки — однолетний рынок мощности — краткосрочный рынок мощности).
3. Учет в механизмах торговли специфики графиков производства и потребления и ограничений на объемы электроэнергии за период (для ВИЭ, СНЭ и ГЭС с ограничениями).
4. Учет топологии энергосистемы, территориального фактора.
5. Внедрение на розничных рынках механизмов, схожих с механизмами оптового рынка, для обеспечения бесшовной связки между покупателями и продавцами разного уровня.

В случае появления альтернативных предложений по видоизменению модели организации электроэнергетики будет необходим отраслевой и общественный сравнительный аудит всех вариантов и последующее обсуждение в органах законодательной власти с широким привлечением общественности.

Переход на рынок мощности можно провести по широкому диапазону стратегий — от резкого перехода на новую модель до сохранения текущих правил торговли для существующей генерации, вплоть до достижения ею критического состояния. Выбор сценария включает в себя значительную составляющую политического целеполагания, нахождения баланса между наращиванием капитала энергетических компаний и снижением темпов роста цен, что также потребует всестороннего обсуждения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. *ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Москва: Росстандарт, 2022. 330 с.*
2. *Пресс-релиз. Системный оператор: отключения потребления на Юге связаны с повышенной аварийностью на фоне экстремальной жары. 17.07.2024 // Системный оператор Единой энергетической системы. URL: https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/25210/.*
3. *Почти 2,5 млн человек остались без света из-за аварии на юге РФ // Энергетика и промышленность России. URL: https://www.eprussia.ru/news/base/2024/1217026.htm.*
4. *Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года // Сайт Минэнерго РФ. URL: https://minenergo.gov.ru/node/532.*
5. *Об итогах конкурентного отбора мощности новых генерирующих объектов, подлежащих строительству в Юго-Западной части ОЭС Юга // Системный оператор Единой энергетической системы. URL: https://www.so-ups.ru/news/events/events-view/news/25411/.*
6. *Конкурс по отбору новой генерации для покрытия энергодефицита на Дальнем Востоке не состоялся из–за отсутствия заявок // Bigpower Electric. URL: https://www.bigpowernews.ru/markets/document121156.phtml.*
7. *Опубликован предварительный перечень проектов модернизации на 2029 год и проектов модернизации, предусматривающих установку газовых турбин, на 2029–2031 годы // Системный оператор Единой энергетической системы. URL: https://kom.so-ups.ru/Generic/Form_A.aspx?FormMode=View&RecordId=46F370C2-F2FA-4B12-9DF5-8A5602E9BF38&EntityId=Documents.*
8. *Отбор генерации в Ямало-Ненецком округе не состоялся из-за отсутствия заявок // Тасс. 01.10.2025. URL: https://tass.ru/ekonomika/25214985.*
9. *Подхватилин Ю. В. Анализ концепции реформирования электроэнергетики России: целевая структура, субъектный состав и текущее состояние вида экономической деятельности «Производство, передача и распределение электроэнергии» // Вестник ТГУ. 2007. № 10.*
10. *Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации / под ред. О. Г. Баркина. 3-е изд. М.: Перо, 2017. 532 с.*
11. *Информация, необходимая для проведения конкурентного отбора мощности новых генерирующих объектов // Системный оператор Единой энергетической системы. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2024/kom_ngo_070724.pdf.*
12. *Кривая бескупонной доходности // Центральный банк Российской Федерации. URL: https://cbr.ru/hd_base/zcyc_params/?UniDbQuery.Posted=True&UniDbQuery.From=01.06.2024&UniDbQuery.To=30.06.2024.*

ПРОМЫШЛЕННО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ФОРУМ

14-17 сентября 2026
Тюмень, Технопарк
oilgasforum.ru



Здесь встречи ведут к результату!

Промышленно-энергетический форум TNF — главная площадка нефтегазовой отрасли страны

Определяем ключевые тренды нефтегазового и энергетического комплекса страны

Создаем прямой диалог лидеров рынка: заказчиков и производителей

Презентуем новейшие технологии для повышения эффективности отрасли

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Правительство Тюменской области

Реклама ООО «ЦМС», 0+
ИНН 7203205528
ОГРН 1077203058668



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

Оформить подписку на журнал «Энергетическая политика» можно напрямую у издателя ООО «ГУ ИЭС». По вопросам подписки обращаться по адресу energypolicyjournal@yandex.ru. В каждом номере – аналитические обзоры, авторские колонки, материалы научного и научно-прикладного характера.

Будь в курсе основных направлений развития ТЭК!

energy-policy.ru

Уважаемые авторы! С требованиями к оформлению и отправке статей, а также с правилами рецензирования вы можете ознакомиться по ссылке:

https://energy-policy.ru/redakcziya/

НАШИ ПАРТНЕРЫ

ПРОМСЫРЬЕИМПОРТ

ЦЭУ
ЦЕНТР ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛУГ

ГАЗПРОМ НЕФТЬ

ЛУКОЙЛ

РВП
совместная компания

РОССЕТИ

ИНТЕР РАО
ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ

ЗАРУБЕЖНЕФТЬ
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ТРАНСНЕФТЬ

ЭН+

Петербургская Биржа

Российская Энергетическая Неделя 2026

РОСКОНГРЕСС
Пространство доверия

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

ЦВЗ «Манеж»

ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ТЭК

Гостиный двор

МОСКВА, РОССИЯ

14-16 ОКТЯБРЯ 2026 г.

Подробнее на сайте

Реклама 6+