

## Глобальные рынки аммиака: перспективы развития и декарбонизации

*И.А. Башмаков*

Центр энергоэффективности – XXI век,  
Россия, 117418, г. Москва, ул. Новочеремушкинская, д. 61

Адрес для переписки: *bashmako@co.ru*

**Реферат.** В статье рассмотрены сложившиеся тенденции и прогнозные оценки развития мировой аммиачной промышленности, а также основные направления ее декарбонизации. На производство аммиака приходится примерно треть выбросов  $\text{CO}_2$  от мировой химической промышленности. Выбросы динамично растут и к 2022 году достигли по охватам 1 и 2 почти 450 млн т  $\text{CO}_2$ . Это результат наращивания производства аммиака при отсутствии на протяжении последних 40 лет прогресса в декарбонизации. Условием декарбонизации мировой экономики в целом является кратное наращивание производства аммиака к 2050 году за счет формирования новых рынков – использования аммиака в качестве топлива и носителя водорода. Важным условием такого развития является создание и масштабирование необходимой инфраструктуры: сотни ГВт мощности электролизеров; сотни млрд кВт-ч генерации безуглеродной электроэнергии и системы CCS мощностью в десятки Мт $\text{CO}_2$ . Производство низкоуглеродного аммиака обходится заметно дороже, но к концу 2040-х годов ценовая премия сводится к нулю. В сценариях с действующими мерами политики выбросы ПГ от производства аммиака могут немного вырасти до 2030 г., а затем немного сократятся к 2050 г. В сценариях с дополнительными мерами политики выбросы могут сократиться в 3-4 раза к 2050 г., а в сценариях декарбонизации – по меньшей мере на порядок. Достижение углеродной нейтральности в аммиачной промышленности к 2050 г. означает постепенное снижение бенчмарка по выбросам  $\text{CO}_2$  практически до нуля за счет мер по повышению энергоэффективности; замены одних ископаемых топлив другими; наращивания масштабов применения технологии CCUS; электрификации технологических процессов; декарбонизации используемой электрической энергии; использования биомассы и снижения выбросов ПГ при добыче и транспортировке топлива, сырья и готовой продукции.

**Ключевые слова.** Мировая аммиачная промышленность, декарбонизация, прогнозы, парниковые газы, технологии.

## Global ammonia markets: development and decarbonization prospects

*I.A. Bashmakov*

Center for Energy Efficiency – XXI  
61, Novocheremushkinskaya St., 117418, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *bashmako@co.ru*

**Abstract.** The paper explores the current trends and development projections in the global ammonia industry and the key decarbonization pathways. Ammonia production is responsible for about one third of CO<sub>2</sub> emissions from the global chemical industry. The emissions are growing dynamically and by 2022 they approached 450 Mt CO<sub>2</sub> in Scopes 1 and 2. This was a result of scaling up ammonia production with no progress in its decarbonization over the past 40 years. Many-fold increase in ammonia production on the 2050 horizon to provide feedstock to the emerging markets of ammonia fuel use and hydrogen carrier is the pre-requisite for the global economy decarbonization. An important condition for this is scaling up the necessary infrastructure: hundreds of GW of electrolyzer capacity; hundreds of billions of kWh of no-carbon electricity generation, and dozens of Mt CO<sub>2</sub> of CCS systems. Transition to low-carbon ammonia production comes at a price, but the price premium shrinks to zero in the late 2040s. In current policies scenarios, GHG emissions from ammonia production may slightly increase in 2030 to go down a bit by 2050. In scenarios with additional policies, the emissions may go down 3- or 4-fold in 2050, or by an order of magnitude in decarbonization scenarios. Achieving carbon neutrality in the ammonia industry in 2050 means a gradual reduction in the CO<sub>2</sub> emission benchmark to near zero through energy efficiency improvements; fuel shifts; scaling up CCUS deployment; electrification of technological processes; decarbonized electricity use; use of biomass and reduction of GHG emissions across the whole supply chain, including extraction and transportation of fuel, raw materials and products.

**Keywords.** Global ammonia industry, decarbonization, projections, greenhouse gases, technologies.

### Ретроспектива динамики глобальных выбросов ПГ при производстве аммиака

На производство аммиака приходятся самые большие (примерно треть, MPP, 2022) выбросы CO<sub>2</sub> в мировой химической промышленности. Оценки масштабов выбросов заметно разнятся. Оценки на 2010 год находятся в диапазоне 340 (The Royal Society, 2020) – 451 МтСО<sub>2</sub>,<sup>1)</sup> или 2.16-2.87 тСО<sub>2</sub>/т аммиака. Оценка на 2018 год равна 500 МтСО<sub>2</sub>,<sup>2)</sup> или 2.84 тСО<sub>2</sub>/т. Оценка Mission Possible Partnership составляет 2.6 тСО<sub>2</sub>/т (охват 1 и 2). На охват 1 пришлось 480 МтСО<sub>2</sub>, на охват 2 – 100 МтСО<sub>2</sub> (MPP, 2022). Выбросы по охвату 3 (поставки топлива и сырья) оценены в 110 МтСО<sub>2</sub>экв (в основном выбросы и утечки в процессах добычи и транспортировки газа и угля). МЭА дает более скромную оценку по охвату 3 – 70 МтСО<sub>2</sub>экв (IEA, 2021). Прямые выбросы по охвату 1 оценены в 430 МтСО<sub>2</sub>экв, а по охвату 2 – в 40 МтСО<sub>2</sub>экв, т.е. в сумме по охватам 1 и 2 – 470 МтСО<sub>2</sub>экв. Мировой экономический форум дает сред-

<sup>1)</sup> Industrial ammonia production emits more CO<sub>2</sub> than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that (acs.org) со ссылкой на Institute for Industrial Productivity.

<sup>2)</sup> Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. 2020. POLICY BRIEFING. The Royal Society. February 2020; Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store (royalsociety.org).

нюю оценку удельных выбросов (сумма охватов 1 и 2) за последние 5 лет также на уровне 2.6 тСО<sub>2</sub>/т, а суммарных выбросов – 420 МтСО<sub>2</sub> по охвату 1<sup>3)</sup> и 460 по охватам 1 и 2.<sup>4)</sup>

Есть и более низкие оценки удельных выбросов по охватам 1 и 2 – 1.9 тСО<sub>2</sub>/т (Ausfelder et al., 2022). МЭА оценивает выбросы на 2020 год в 450 МтСО<sub>2</sub>, из которых прямые выбросы от промышленных процессов равны 250 МтСО<sub>2</sub>, в т.ч. 130 МтСО<sub>2</sub> используется на производство мочевины (IEA, 2021). Тогда на выбросы от сжигания топлива приходится 200 МтСО<sub>2</sub>. IRENA and AEA (2022) оценивают выбросы в 500 МтСО<sub>2</sub>. База данных EDGAR6.0 дает оценку выбросов от промышленных процессов на 2019 год, равную 347 МтСО<sub>2</sub>, из которых 59 МтСО<sub>2</sub> используется на производство карбамида (мочевины). (Crippa et al., 2021). Необходимо разобраться в этих оценках. Часть оценок разнится из-за использования различных метрик.

Согласно методике МГЭИК,<sup>5)</sup> при расчете выбросов от производства аммиака не делается разделения на выбросы от сжигания и от процессов; все выбросы относятся на промышленные процессы (разделы инвентаризации 2B1gfossil, Ammonia production, gross CO<sub>2</sub> и 2B1sfossil, CO<sub>2</sub>-ammonia stored in urea). В расчетах используется удельный расход топлива на 1 т аммиака и коэффициенты выбросов для этих видов топлива. По умолчанию для природного газа в зависимости от технологии на современных заводах используются коэффициенты удельных выбросов 1.666-1.694 тСО<sub>2</sub>/т (29.7-30.2) ГДж/т\*0.056 тСО<sub>2</sub>/ГДж), для мазута – 2.772 тСО<sub>2</sub>/т, а для угля вмененные коэффициенты в методике не приводятся.

Для природного газа среднее по миру значение удельных выбросов получается равным 1.9 тСО<sub>2</sub>/т (34 ГДж/т\*0.056 тСО<sub>2</sub>/ГДж). Для угля среднее значение получается равным 4.8-5.14 тСО<sub>2</sub>/т (50.6 ГДж/т\*(0.946÷0.101) тСО<sub>2</sub>/ГДж) в зависимости от видов использованных углей. В отношении мочевины указано, что расход составляет 0.733 тСО<sub>2</sub>/т мочевины. Ее производство в мире в 2020 году составило 181 млн т, в 2021 году – 180 млн т, в 2022 году – 184 млн т. Если допустить, что вся мочевина производится с использованием только СО<sub>2</sub>, захваченного в процессе производства аммиака, то получается близкая к МЭА оценка – 132-135 МтСО<sub>2</sub>.

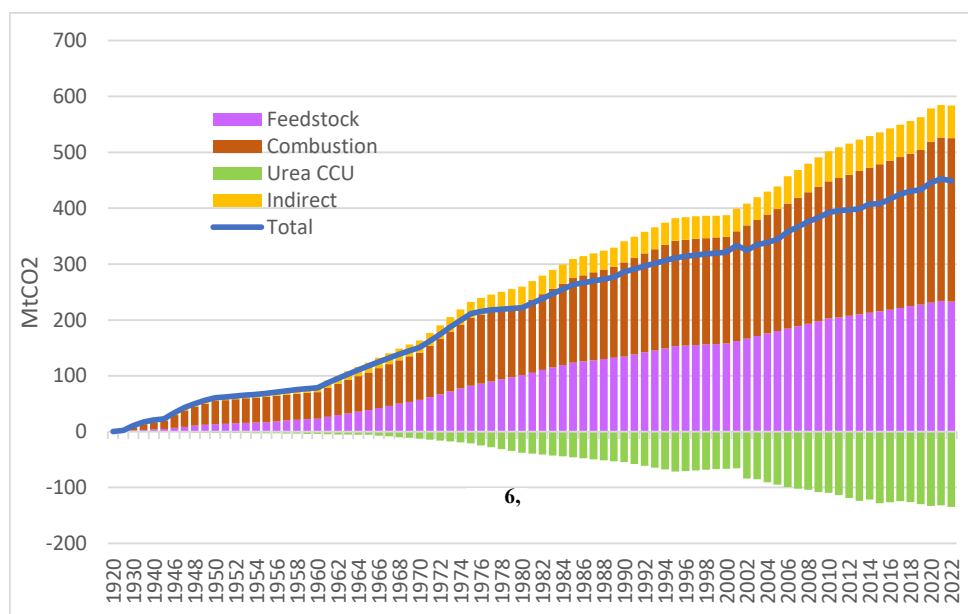
На основе данных по производству аммиака, мочевины, потреблению топлива с разбиением на сырье и сжигаемое топливо, оценок потребления электроэнергии и удельных выбросов СО<sub>2</sub> на производство электроэнергии автором получена динамика и структура выбросов СО<sub>2</sub> от производства аммиака в 1920-2022 гг. (рис. 1).

---

<sup>3)</sup> Ammonia industry net-zero tracker – Net-Zero Industry Tracker 2023, World Economic Forum (weforum.org).

<sup>4)</sup> Там же.

<sup>5)</sup> В 2019 году в раздел по аммиаку изменения не вносились, поэтому сохранилась методика расчетов 2006 года: 2006 IPCC Guidelines Vol.3 IPPU Chapter 3 Sections 3.1-3.8 (iges.or.jp).



**Рисунок 1.** Ретроспективная динамика глобальных выбросов CO<sub>2</sub> при производстве аммиака  
*Источники: построено автором по данным Glibert et al., 2006; Pinto et al., 2022; базы данных МЭА; Rouwenhorst et al., 2022*

**Figure 1.** Historical dynamics of global CO<sub>2</sub> emissions from ammonia production  
*Source: reconstructed by the author based on Glibert et al., 2006; Pinto et al., 2022; IEA database; Rouwenhorst et al., 2022*

Анализ данных рис. 1 позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В 2022 г. суммарные нетто-выбросы CO<sub>2</sub> по охватам 1 и 2 составили 449 млн т, что практически совпадает с оценкой МЭА.

2. Выбросы по охвату 3, сопряженные в основном с утечками метана в процессах добычи и транспортировки угля и природного газа, оценены равными 70-110 МтCO<sub>2</sub>экв. Таким образом, нетто-выбросы по охватам 1, 2 и 3 равны 520-560 МтCO<sub>2</sub>экв, или 2.8-3 тCO<sub>2</sub>экв/т аммиака.

3. Прямые выбросы от использования топлива равны 525 млн тCO<sub>2</sub>. Они почти в равной пропорции делятся на выбросы от сжигания топлива (261 млн тCO<sub>2</sub>) и выбросы от технологических процессов (265 млн тCO<sub>2</sub>). При использовании коэффициента МЭА (расход на сырьевые цели 18.6 ГДж/т аммиака) пропорция меняется на 292:233 млн тCO<sub>2</sub>.

4. Утилизация CO<sub>2</sub> для производства мочевины составляет 134.5 млн тCO<sub>2</sub>, что близко к оценке МЭА.

5. Косвенные выбросы при производстве электроэнергии, используемой при производстве аммиака (охват 2), составили 58 млн тCO<sub>2</sub>.

6. Кумулятивно с 1920 года нетто-выбросы от производства аммиака по охватам 1 и 2 составили 18.5 Гт CO<sub>2</sub>.

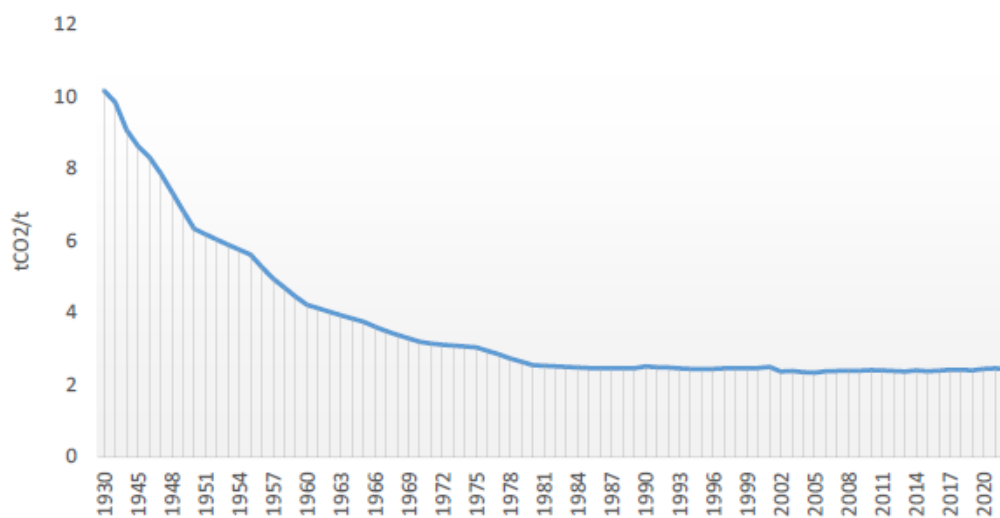
Полученные оценки позволяют также оценить удельные выбросы (рис. 2). Можно сформулировать следующие выводы:

1. В последние 40 лет не наблюдается прогресса в декарбонизации производства аммиака: удельные нетто-выбросы CO<sub>2</sub> стагнировали на уровне 2.4-2.5 тCO<sub>2</sub>/т аммиака.

2. Нетто-выбросы CO<sub>2</sub> слепо следовали за наращиванием потребления энергии, которое, в свою очередь, четко следовало за изменениями объемов производства аммиака, растущими довольно динамично.

3. Эта ситуация резко контрастирует с периодом 1930-1980 гг., когда удельные выбросы снизились по меньшей мере в 4 раза.

4. Таким образом, отрасль однажды уже решила задачу кратного снижения удельных выбросов CO<sub>2</sub> в течение полувека. Этот опыт требуется повторить, возможно, на более сжатом временном интервале.



**Рисунок 2.** Ретроспективная динамика среднемировых удельных выбросов CO<sub>2</sub> при производстве аммиака

*Источники: построено автором по данным рис. 1*

**Figure 2.** Historical dynamics of global average CO<sub>2</sub> emissions per ton of ammonia production

*Source: reconstructed by the author based on the data in Figure 1*

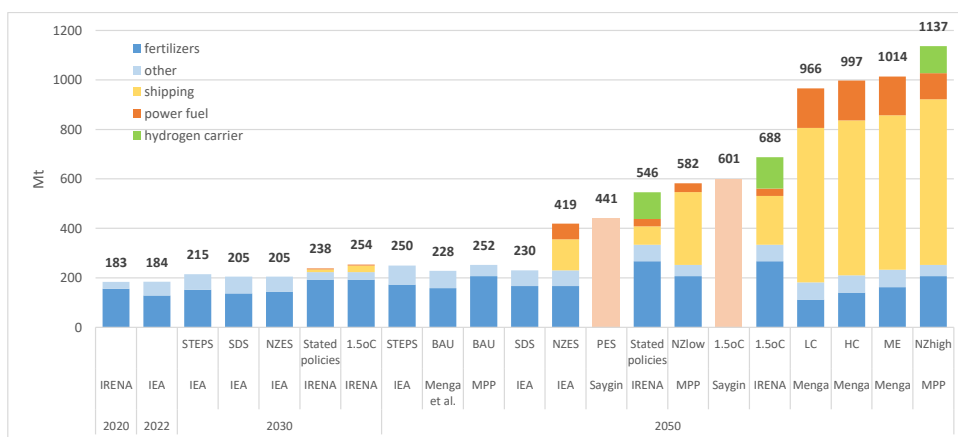
### **Перспективы развития производства аммиака в мире до 2050 года**

Одним из условий декарбонизации мировой экономики является кратное (в 3-6 раз) наращивание производства аммиака к 2050 году, основная часть которого должна производиться на безуглеродной основе. Сформировались два видения будущего мирового рынка аммиака (рис. 3 и 4):

- традиционное развитие с ростом до 80% к 2050 г. (IRENA и АЕА в сценарии 1.5°C) или до 2.1% в год, определяемым в большей степени спросом на азотные удобрения и другие традиционные направления использования аммиака;

• 3-6-кратный рост до 2050 г. (на 4-6.7% в год, или примерно так же быстро, как в 1950-е и 1970-е годы) за счет динамичного формирования новых рынков использования аммиака в качестве топлива и носителя водорода.

Роль новых применений аммиака растет постоянно: если в 2010-2020 годы спрос на азотные удобрения в мире рос на 1.7% в год, то спрос на использование аммиака для других целей рос в среднем на 4% в год (IEA, 2021). Назовем эти рынки традиционными. На традиционных рынках потребление аммиака на душу населения в разных сценариях либо немного растет, либо очень медленно снижается. В сценарии МЭА *Заявленные меры политики* предполагается рост производства аммиака к 2050 году на 37% – немногим выше 250 млн т – за счет роста экономики, сельхозпроизводства и населения (на 25%). В сценарии *Устойчивое развитие* реализация пакета мер по повышению эффективности конечного использования азотных удобрений, рециклирование пластиков и резин позволяет ограничить рост производства уровнем 23%, или примерно до 230 млн т. К 2030 г. диапазон прогнозов использования аммиака на цели производства удобрений равен 137-193 Мт, а в 2050 г. – 116-267 млн т (рис. 3). Для прочих традиционных рынков аммиака в прогнозах заложен рост до 30-68 млн т к 2030 г. и до 45-78 Мт к 2050 г. Для них самые высокие оценки дают IEA (2021) и Menga et al. (2023). В итоге за счет традиционных рынков спрос на аммиак может к 2030 г. составить 205-223 Мт, а к 2050 г. – 184-334 Мт. Наиболее высокие оценки дают IRENA и АЕА (2022).

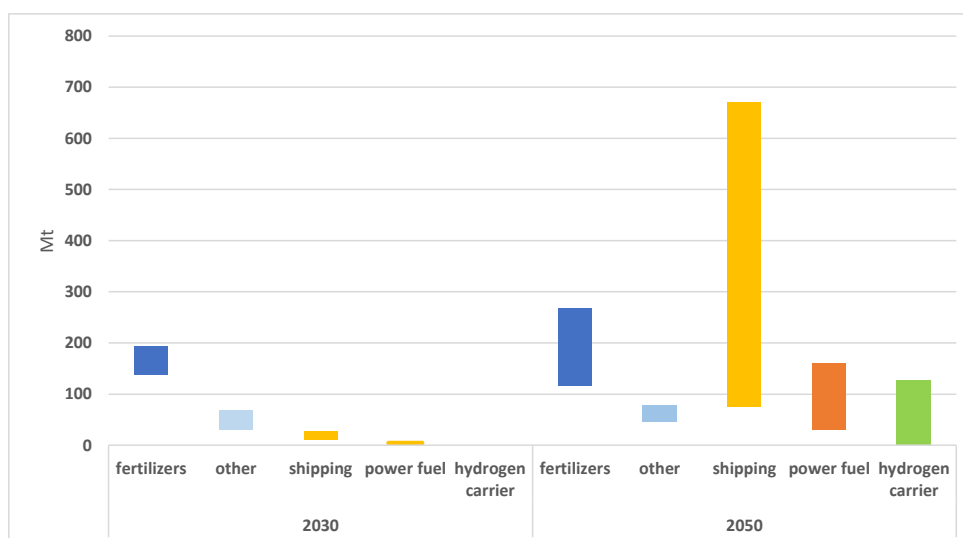


**Рисунок 3.** Прогнозы глобального потребления аммиака до 2050 года  
 Источники: IEA. 2021; IRENA u AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021;  
 Menga et al., 2023

**Figure 3.** Global ammonia use projections to 2050  
 Source: IEA. 2021; IRENA and AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021;  
 Menga et al., 2023

С учетом новых рынков аммиака объем его производства может в середине XXI века приблизиться к 1 млрд т (Argus Media, 2020). В части основных

нетрадиционных рынков использования аммиака рассматриваются использование в качестве топлива для судов и электростанций и в качестве носителя водорода. К 2030 г. эти рынки только начинают формироваться, достигая в сценариях IRENA и АЕА 11-27 млн т для судового топлива и 4 млн т для электростанций. К 2050 г. новые рынки могут стать доминирующими. Рынок аммиака как топлива для электростанций может вырасти до 30-160 млн т (верхняя граница дана в Menga et al., 2023). МЭА оценивает масштабы использования на электростанциях (совместное сжигание с углем) в 2050 г. на уровне 60 млн т в сценарии *Устойчивое развитие* и 85 млн т в сценарии *Нетто-нулевые выбросы*. Самым значительным – 74-670 Мт – может стать рынок судового топлива. Сейчас на эти нужды используется заметно меньше 1% аммиака (IRENA и АЕА, 2022). Но в отношении масштабов именно этого рынка неопределенность крайне высока. МЭА оценивает рынок судового топлива в 125 млн т в сценарии *Устойчивое развитие* и в 240 млн т в сценарии *Нетто-нулевые выбросы*. В сценарии 1.5°C IRENA и АЕА дана оценка 197 млн т. Самые высокие оценки даны в сценариях Menga et al. (2023).



**Рисунок 4.** Диапазоны прогнозов масштабов отдельных рынков аммиака  
*Источники: построено по данным рис. 3*

**Figure 4.** Scales of some ammonia markets: projection range  
*Source: based on data from Figure 3*

Рынок аммиака как носителя водорода может к середине века достичь 108-127 млн т. Такие оценки приведены в сценариях IRENA и АЕА (2022) – 108-127 млн т и MPP (2022) – 110 млн т. В итоге технологические цепочки и картина рынка аммиака в середине века могут заметно отличаться от нынешней. Привлекательность использования аммиака в качестве носителя водорода объясняется высокой эффективностью синтеза аммиака и его последующего разделения на водород и азот. В расчете на 1 кВт-ч можно получить 0.0197 кг водорода и с учетом потерь во всех звеньях преобразова-

ний (из водорода в аммиак и затем из аммиака в водород) получить на выходе 0.0146 кг водорода (эффективность цикла 74%) (Saygin et al., 2023).

Возможным и неожиданным направлением развития аммиачной промышленности мира является ее децентрализация и организация производства азотных удобрений по месту их использования с применением небольших модульных технологий в масштабах фермы на базе солнечной агроэлектрической системы при наличии дешевой энергии от ВИЭ. Это снижает уязвимость от волатильности цен на ископаемое топливо, упрощает цепочки поставок и исключает расходы на транспорт. Принимая во внимание эти факторы, уже к 2030 году децентрализованное производство аммиака может достичь паритета по затратам с централизованным для объемов его производства, равных 96% от нынешнего мирового спроса. Это может стать революцией в отрасли производства удобрений и решить проблемы в регионах, сталкивающихся с нехваткой продовольствия (Tonelli et al., 2024).

### **Объемы производства низкоуглеродного аммиака и необходимые условия их наращивания**

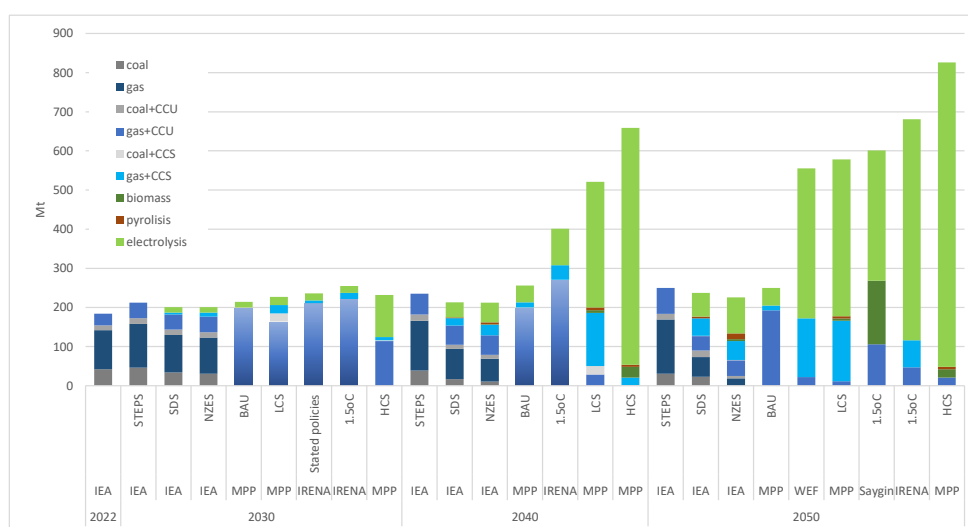
Пять цветов палитры аммиака включают: *серый, голубой, зеленый, желтый и бирюзовый*. Цветовая терминология в части окраски аммиака в зависимости от технологии его производства еще не полностью устоялась. Под *серым* понимают производство аммиака по традиционной технологии с высоким углеродным следом. Иногда традиционные технологии производства аммиака называют коричневыми (Argus Media, 2020). *Голубой* аммиак – производство на основе паровой конверсии метана с CCS. *Зеленый* – производство электролитического аммиака на базе безуглеродной электроэнергии. Иногда он разделяется на *зеленый-on-site* (с удельными выбросами CO<sub>2</sub>/кВт-ч) для установки по производству водорода на месте производства аммиака) и *зеленый-grid* (Ausfelder et al., 2022) или *желтый* – производство электролитического аммиака на базе сетевой электроэнергии (со средним по энергосистеме удельным выбросом CO<sub>2</sub>).<sup>6)</sup> *Бирюзовый* – производство на основе пиролиза метана с CCS (American Bureau of Shipping, 2020).

Необходимые условия для обеспечения кратного роста рынка аммиака включают: прогресс в развитии и коммерциализации технологий производства аммиака на основе электролиза и с применением CCUS; рост цен на углерод при снижении затрат на производство аммиака на базе безуглеродных технологий; масштабное развитие генерации «зеленой» электроэнергии, мощностей электролизеров, транспортной инфраструктуры и систем хранения CO<sub>2</sub>, а в конечном счете – способность привлекать инвестиции на формирование всех этих необходимых условий. Анализ перспектив развития технологической структуры производства аммиака до 2050 года показывает (рис. 5), что объемы производства на базе нынешних технологий в сценариях

---

<sup>6)</sup> Паритет по выбросам CO<sub>2</sub> с зеленым аммиаком достигается при удельных выбросах от сетевой электроэнергии около 150 гCO<sub>2</sub>/кВт-ч.

BAU и уже принятых мер политики не превысят 271 млн т в 2040 г. (в сценарии IRENA 1.5°C) и 192 млн т к 2050 г. (в сценарии BAU MPP). Базой для декарбонизации судоходства, электро- и водородной энергетики является обеспечение конкурентоспособности низкоуглеродных технологий производства аммиака (American Bureau of Shipping, 2020). Объемы производства аммиака на базе технологии паровой конверсии метана с CCS достигают 5-36 млн т в 2030 г., 13-136 млн т в 2040 г. и 13-154 млн т в 2050 г. (рис. 6). Предполагается использовать технологию CCS в процессах газификации угля в масштабах 2-21 млн т в 2030 г., 1-21 млн т в 2040 г. и до 1 млн т в 2050 г. В работе Saygin and Gielen (2021) заложена возможность наращивания производства аммиака на основе биомассы в объеме 162 млн т в 2050 г. Технология пиролиза играет ограниченную роль: 2-7 млн т в 2040 г. и 5-15 млн т в 2050 г.

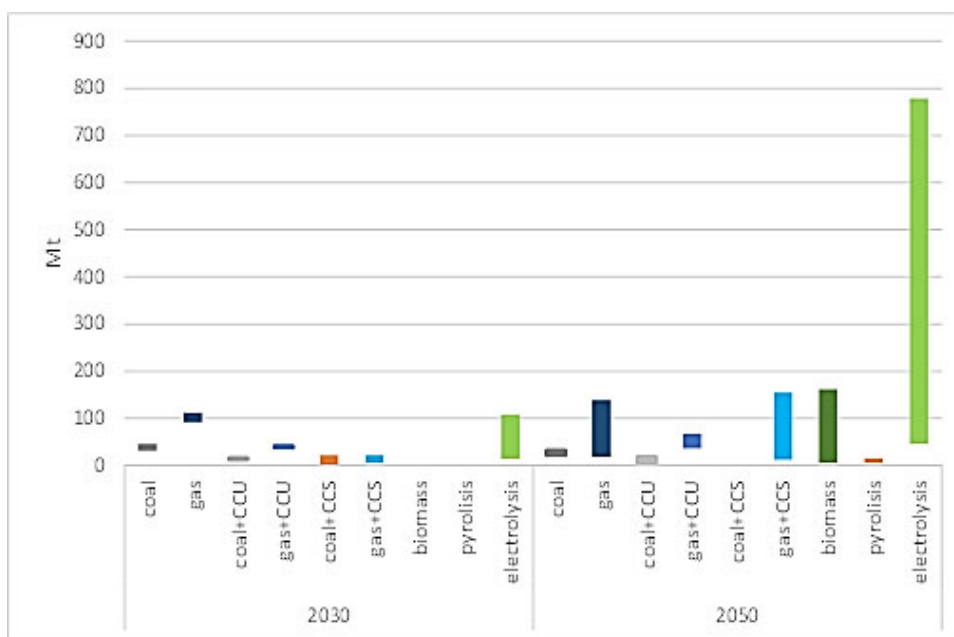


**Рисунок 5.** Сценарные прогнозы технологической структуры глобального производства аммиака до 2050 года  
Источники: IEA, 2021; IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021; Menga et al., 2023

**Figure 5.** Scenario projections of global ammonia production technologies to 2050  
Source: IEA, 2021; IRENA and AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021; Menga et al., 2023

Перед отраслью стоят две задачи: первая – декарбонизация производства аммиака, потребляемого на традиционных рынках, вторая – заметное масштабирование производства низкоуглеродного аммиака для обеспечения потребностей новых рынков. На поиск путей решения первой задачи нацелены сценарии МЭА, а второй – IRENA и AEA, MPP, WEF, Saygin and Gielen. Технология гидролиза играет важную роль в декарбонизации традиционных рынков аммиака и ключевую – в декарбонизации экономики. В первом случае масштабы ее использования растут до 14-21 млн т аммиака в 2030 г., 38-50 млн т в 2040 г. и 45-92 млн т в 2050 г. Во втором случае – до 18-107 млн т в 2030 г.,

93-605 млн т в 2040 г. и 333-778 млн т в 2050 г. Для решения первой задачи уже к 2030 г. должны работать 40-140 заводов по технологии производства «зеленого» аммиака и 15-25 заводов по производству «голубого» аммиака (MPP, 2022). Необходимо, чтобы уже к 2025 г. до 15 заводов были оснащены системами CCS для захвата до 12 млн т/год CO<sub>2</sub> технологических выбросов с высоким уровнем концентрации<sup>7)</sup> и чтобы несколько заводов были оснащены установками электролиза. К 2030 г. уже 15-25 заводов должны быть оснащены системами CCS, а производство «зеленого» аммиака как минимум на 30 заводах должно превысить 14 млн т.<sup>8)</sup> Уровень готовности этих технологий довольно высок – 8-9 (коммерческая демонстрация, полномасштабное внедрение в окончательном виде и коммерческая эксплуатация, требующая эволюционных улучшений для повышения конкурентоспособности). Коммерческое использование технологии гидролиза имело место еще в 1960-х годах. Ожидается, что на имеющихся и объявленных проектах к 2030 г. будет производиться около 4 млн т (IEA, 2021). Технология пиролиза метана находится в стадии демонстрации, а технологии на базе газификации биомассы – на стадии крупных прототипов (IEA, 2021).



**Рисунок 6.** Диапазоны прогнозов масштабов производства аммиака по разным технологиям и уровень их готовности

*Источники: построено по источникам к рис. 5*

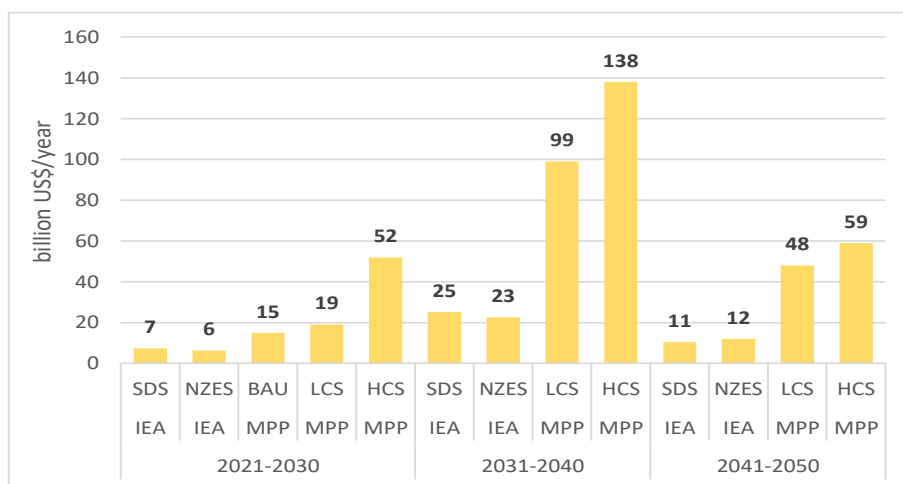
**Figure 6.** Ammonia production technologies: scales and maturity projection range

*Source: based on sources to Figure 5*

<sup>7)</sup> На уже имеющихся и объявленных проектах ожидается захват в объеме 4 млн тCO<sub>2</sub> (IEA, 2021).

<sup>8)</sup> Перечень реализуемых и планируемых проектов приведен в IRENA и AEA (2022).

Суммарные капитальные вложения до 2050 г., необходимые для решения первой задачи, составляют 400-500 млрд долл. (рис. 7). Их основная часть направляется на наращивание производства «голубого» и «зеленого» аммиака. По мере движения к 2050 г. доля последних растет. Эти капитальные вложения достигают пика в 2030-х годах на уровне 23-25 млрд долл. Это обеспечивает своевременное решение задачи декарбонизации отрасли. В 2040-х годах они составляют только половину от уровней 2030-х годов (IEA, 2021). Срок службы оборудования азотного завода составляет около 50 лет. Средний срок службы заводов в мире равен 25 годам (без Китая – 29 годам), а в ЕС – 40 годам (IEA, 2021). К 2050 г. основная часть мощностей подлежит замене. Эта замена может и должна производиться на низкоуглеродной основе. Отмена бесплатной выдачи квот на выбросы в ECT и введение механизма СВМ делают такую модернизацию императивом. Поэтому вероятность мобилизации капитала на решение первой задачи можно оценить как высокую.



**Рисунок 7.** Средние годовые инвестиции в производство аммиака по десятилетиям до 2050 года

*Источники: построено по источникам к рис. 5*

**Figure 7.** Average annual investment in ammonia production to 2050 by decades

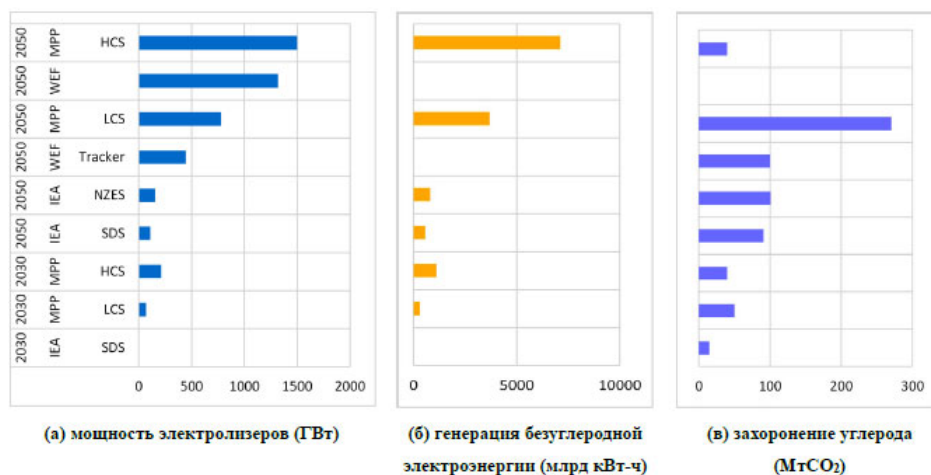
*Source: based on sources to Figure 5*

Дополнительные суммарные капитальные вложения до 2050 г., необходимые для решения второй задачи, составляют 360-2500 млрд долл. Их основная часть направляется на кратное масштабирование производства электролитического аммиака для декарбонизации судоходства, электроэнергетики и развития водородной энергетики. При различии в масштабах временной профиль динамики инвестиций сходный – пик достигается в 2030-х годах. Сравнительно низкая норма прибыли в отрасли и высокие цены привлечения капитала делают мобилизацию инвестиций в масштабах, необходимых для решения второй задачи, проблематичной.<sup>9)</sup>

<sup>9)</sup> Ammonia industry net-zero tracker – Net-Zero Industry Tracker 2023 | World Economic Forum.

Важным условием решения обеих задач является создание и масштабирование необходимой инфраструктуры: сотни ГВт мощности электролизеров; сотни млрд кВт-ч генерации безуглеродной электроэнергии и системы CCS мощностью в десятки МтCO<sub>2</sub> (рис. 8). Для производства требуемого объема низкоуглеродного аммиака необходимы следующие мощности электролизеров:

- для решения первой задачи – 110 ГВт к 2050 г.;
- для решения второй задачи – 70-210 ГВт к 2030 г. и 447-1500 ГВт к 2050 г.



**Рисунок 8.** Прогнозные оценки необходимых масштабов развития инфраструктуры для производства низкоуглеродного аммиака  
 Источники: построено по источникам к рис. 5

**Figure 8.** Projected infrastructure development needs for low carbon ammonia production  
 Source: based on sources to Figure 5

Для обеспечения работы электролизеров необходимо достичь следующих показателей выработки безуглеродной электроэнергии:

- для решения первой задачи – 570 млрд кВт-ч к 2050 г.;
- для решения второй задачи – 300-1100 млрд кВт-ч к 2030 г. и 3700-7100 млрд кВт-ч к 2050 г.<sup>10)</sup> (15-30% от объема глобальной выработки электроэнергии в 2023 г. (IEA, 2024).

Для производства необходимого объема «голубого» аммиака необходимы следующие мощности систем CCS:

- для решения первой задачи – 15 МтCO<sub>2</sub> к 2030 г. и 90 МтCO<sub>2</sub> к 2050 г.;
- для решения второй задачи – 40-50т МтCO<sub>2</sub> к 2030 г. и 40-270 МтCO<sub>2</sub> к 2050 г. Чем выше доля производства «зеленого» аммиака, тем ниже потребность в мощностях систем CCS.

<sup>10)</sup> Производство «зеленого» аммиака требует в 25 раз больше электроэнергии, чем «голубого». Согласно оценкам, около 90% возобновляемой электроэнергии, используемой в химической промышленности в 2050 г., будет использоваться для производства зеленого водорода, большая часть которого (>98%) будет использоваться в качестве сырья для производства аммиака и метанола (Menga et al., 2023).

Хотя рост затрат на производство низкоуглеродного аммиака остается вызовом для декарбонизации отрасли, ожидаемый в 2030 г. и 2050 г. диапазон приведенных затрат на производство аммиака по любой технологии остается в пределах диапазона «естественной» эволюции цен, верхняя граница которого резко выросла в 2022 г. из-за взлета цен на газ. В период 2000-2015 гг. (в 2008 г.) цена зашкаливала за 700 долл./т (Beckman and Riche, 2015), на протяжении нескольких месяцев в 2012 г. – за 500 долл./т, на протяжении долгого времени в 2011-2014 гг. цена превышала 400 долл./т (Fasihi et al., 2021). В 2017-2020 гг. верхняя граница диапазона цен аммиака на региональных рынках не превышала 380 долл./т.<sup>11)</sup> В 2021-2023 гг. цены на аммиак в порту Тампа (Флорида, США) на протяжении 19 месяцев превышали 600 долл./т.<sup>12)</sup> В 2022 г. пиковое значение цен на отдельных региональных рынках достигало 1720 долл./т. Приведенные затраты на производство аммиака (LCOA) по любой из представленных на рис. 9 технологий с большим запасом укладываются в этот предел.

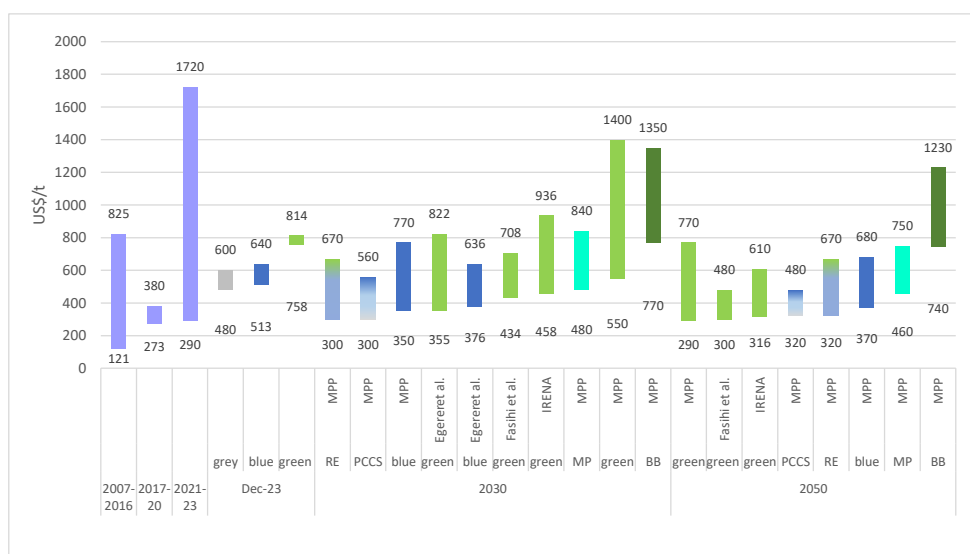
Переход на производство аммиака с низким уровнем выбросов увеличивает средневзвешенную приведенную стоимость производства аммиака на 13-41% в 2030 г. относительно BAU, но к концу 2040-х годов ценовая премия на аммиак сводится к нулю (MPP, 2022). Для оптимизации затрат на декарбонизацию отрасли она может начаться с переходных технологий с низкими LCOA – технология модернизации традиционных предприятий с установкой электролизеров ограниченной мощности, производящих примерно 10% зеленого водорода, подаваемого в смеси на установки синтеза аммиака, и технология с применением CCS только для высококонцентрированных технологических выбросов. До 2030 г. эти технологии имеют наиболее низкие LCOA (рис. 9). Накопление опыта их использования позволит более уверенно реализовывать масштабные проекты в последующие десятилетия. Ближе к 2050 г. полномасштабные проекты по производству «голубого» и «зеленого» аммиака становятся конкурентоспособными с «серыми» и переходными технологиями (Ausfelder et al., 2022; Egerer et al., 2023; Fasihi et al., 2021; IEA, 2021; MPP, 2022).

В 2023 г. в ценах аммиака практически всех мировых производителей отсутствовала цена углерода. Каждые 10 долл./тCO<sub>2</sub> цены на углерод приводят к удорожанию аммиака на базе паровой конверсии метана на 19 долл./т, а на базе газификации угля – примерно на 50 долл./т. Поэтому при высоких ценах на углерод «серые» технологии теряют конкурентоспособность. Повышение цен на газ в ЕС в 2022 г. до 1156 долл./1000 м<sup>3</sup> на время уже сделало «зеленый» аммиак привлекательной опцией на этом рынке. Более высокие цены на газ в декабре 2023 г. по сравнению с диапазоном 2017-2020 гг. создали эффект, аналогичный введению цены на углерод в размере 110 долл./тCO<sub>2</sub>, и привели к

<sup>11)</sup> Yara International, S&P Rating report 7 December 2022.

<sup>12)</sup> [imgurl:https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS - Search \(bing.com\)](https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS - Search (bing.com)).

дрейфу диапазона LCOA для «серого» аммиака вплотную к зоне для «голубого» и «зеленого» (рис. 9).



**Рисунок 9.** Приведенные затраты на производство аммиака по разным технологиям и сценариям

\* диапазоны в основном определяются разными условиями производства аммиака в разных регионах мира

\*\* RE – модернизация предприятия с установкой электролизера, производящего примерно 10% «зеленого» водорода для установки синтеза; PCCS – применение CCS только для технологических выбросов; MP – пиролиз метана; BB – производство аммиака на базе газификации биомассы

Источники: Перспективные данные – Yara International, S&P Rating report 7 December 2022; Interactive: Ammonia price chart (platts live.com): [imgurl:https://www.dtnpf.com/mydtm-public-core-portal/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search\(bing.com\)](https://www.dtnpf.com/mydtm-public-core-portal/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search(bing.com)); перспективные данные – IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Fasihi et al., 2021; Egerer et al., 2023

**Figure 9.** Levelized costs of ammonia production by technologies and scenarios

\* the ranges are basically determined by different ammonia production conditions in different world regions

\*\* RE – plant upgrade to install an electrolyzer to produce some 10% of green hydrogen for the synthesis unit; PCCS – CCS use for process emissions only; MP – methane pyrolysis; BB – ammonia production based on biomass gasification

Source: Historical data – Yara International, S&P Rating report 7 December 2022; Interactive: Ammonia price chart (platts live.com): [imgurl:https://www.dtnpf.com/mydtm-public-core-portal/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search\(bing.com\)](https://www.dtnpf.com/mydtm-public-core-portal/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search(bing.com)); Perspective data – IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Fasihi et al., 2021; Egerer et al., 2023

Производство «голубого» аммиака может постепенно смещаться в Россию и США, а «зеленого» – в сторону регионов с большим потенциалом дешевых ВИЭ. Россия на рынке «зеленого» аммиака не имеет рыночных преимуществ. В разных регионах мира существует и сохранится на перспективу значительный разброс LCOA для каждой из технологий. Это определяется наличием дешевых ресурсов природного газа или ВИЭ. Снижение затрат на производство «зеленого» аммиака прогнозируется во всех регионах мира, но

заметная разница в LCOA сохраняется (Fasihi et al., 2021). Эта разница и стоимость транспортировки аммиака будут определять региональные сдвиги в его производстве.

По мере обучения и совершенствования низкоуглеродных технологий, а также повышения цен на углерод, низкоуглеродный аммиак сначала выходит на ценовой паритет с «серым», а затем становится более экономически привлекательным вариантом. Если потенциал рынка аммиака в 2050 г. ограничен 250-270 млн т, то замыкающие затраты на производство «зеленого» аммиака на основе оптимизированных по стоимости гибридных фотоэлектрических и ветровых электростанций снижаются с 550 долл./т в 2020 г. до 300 долл./т к 2050 г. и слабо зависят от масштабов рынка, даже если он достигнет 1 млрд т. Одна лишь низкая стоимость электроэнергии еще не решает проблемы. Важным условием является существенное снижение затрат на электролизеры (IEA, 2021).

При отсутствии цен на углерод «зеленый» аммиак выходит на ценовой паритет с «серым» к 2050 г. при цене газа 6-8 долл./МБТЕ, или 210-280 долл./1000 м<sup>3</sup>. В 2020 г. для этого нужна была цена газа не ниже 540 долл./1000 м<sup>3</sup>. На время на многих рынках этот уровень был превышен: в 2022 г. в ЕС средняя цена составила 1156 долл./1000 м<sup>3</sup>, а в Японии – 569 долл./1000 м<sup>3</sup>. В 2030 г. для выхода на паритет при отсутствии цены на углерод нужна цена газа 400-500 долл./1000 м<sup>3</sup>, а при цене углерода 75 долл./тCO<sub>2</sub> – 180-290 долл./1000 м<sup>3</sup>. В сценарии STEPS МЭА дает цены на газ на разных региональных рынках (без США) на 2030 г. в диапазоне 247-337 долл./1000 м<sup>3</sup>, а на 2050 г. – 254-280 долл./1000 м<sup>3</sup>. В этой ценовой зоне «зеленый» аммиак в 2050 г. конкурентоспособен даже при отсутствии цены на углерод. На нишевых рынках «зеленый» аммиак может стать конкурентоспособным уже к 2030 г. (Fasihi et al., 2021). Для окупаемости затрат в системы CCS нужна цена на углерод 30 долл./тCO<sub>2</sub> (IEA, 2021).

### **Перспективная динамика выбросов ПГ от производства аммиака**

Согласно имеющимся прогнозам, в сценариях с действующими мерами политики выбросы ПГ от производства аммиака могут немного вырасти до 2030 г., а затем немного сократятся к 2050 г. В сценариях с дополнительными мерами политики выбросы могут сократиться в 3-4 раза к 2050 г., а в сценариях декарбонизации – по меньшей мере на порядок. Исследований по декарбонизации мирового производства аммиака довольно много, но лишь в немногих даны оценки перспективной динамики выбросов ПГ от производства аммиака до 2050 г. В других исследованиях в основном приводятся оценки удельных выбросов.

МЭА (IEA, 2021) рассматривает три сценария:

- STEPS (реализация только действующих мер политики);
- SDS (устойчивое развитие с реализацией значимого пакета дополнительных мер политики);

- *NZE* (сценарий выхода на углеродную нейтральность к 2050 г.).

В сценарии *STEPS* возможен небольшой рост выбросов  $\text{CO}_2$  до 2030 г., когда они выходят на пик с последующим снижением. Даже в этом сценарии выбросы в 2050 г. ниже уровня ковидного 2020 г. В двух прочих сценариях выбросы снижаются: почти вчетверо в сценарии *SDS* и более чем в 20 раз в сценарии *NZE*. В сценарии *SDS* углеродоемкость производства аммиака снижается на 78% к 2050 г. за счет использования технологий электролиза и *CCS*. Они используются в еще больших масштабах в сценарии *NZE*, где углеродоемкость падает на 96%.

По прогнозу Mission Possible Partnership, к 2050 г. выбросы, связанные с производством аммиака, могут быть сокращены на 92-99% относительно уровня 2020 г. В этой работе (MPP, 2022) рассмотрены три сценария декарбонизации отрасли с говорящими названиями:

- *Business-as-usual scenario* (отсутствие какого-либо давления на производителей в сторону декарбонизации);
- *Lowest Cost scenario* (выход на объем углеродного бюджета, соответствующего сценарию ограничения потепления уровнем  $1.5^\circ\text{C}$  с наименьшими затратами); и
- *Fastest Abatement scenario* (выход на объем углеродного бюджета с максимально возможной скоростью).

В сценарии *BAU* выбросы остаются примерно на одном уровне до 2050 г. с небольшим трендом к снижению. В сценарии *Lowest Cost* выбросы несколько растут до 2030 г., затем падают ниже 100 млн  $\text{tCO}_2$  к 2040 г., до примерно 50 млн  $\text{tCO}_2$  к 2045 г. и остаются на этом уровне до 2050 г. В сценарии *Fastest Abatement* выбросы падают почти до нуля уже к 2037 г. Снижение выбросов на 50% от уровня 2020 г. наступает соответственно в 2037 г. и в 2033 г. Главным драйвером снижения выбросов является наращивание производства «зеленого» аммиака.

### **Потенциал снижения удельных расходов энергии на производство аммиака**

Во всех работах по бенчмаркингу только на одном предприятии мира удельный расход энергии при производстве аммиака самый низкий – 23.5-23.8 ГДж/т. В практических целях *BAT*<sup>13)</sup> можно принимать на уровне 26.7 ГДж/т. Международный опыт бенчмаркинга по удельным расходам энергии при производстве аммиака ограничен. Имеется только несколько работ, основная часть которых выполнена до 2014 г. На середину 1990-х годов на основе бенчмаркинга предприятий разных стран *BAT* составил немногим менее 30 ГДж/т,

---

13) Best available technology – наилучшая из имеющихся на рынке технологий. Показатель *BAT* определяется либо равным показателю самой эффективной из имеющихся на рынке технологий, либо значению для технологии, которая замыкает 10% суммарного выпуска продукции на кривой бенчмаркинга. Эта кривая ранжирует объемы производства по удельному показателю (например, энергоемкость или удельные выбросы ПГ).

а разрыв между ВАТ и худшим показателем был почти двукратный (Phylipsen et al., 2022).

International Fertilizer Industry Association (IFA) в 2008 г. провела бенчмаркинг по уровню энергоёмкости по выборке из 93 предприятий из 33 стран (Tavares et al., 2013). Производственные мощности проанализированных заводов по производству аммиака варьировали от 91 до 750 тыс. т/год. Именно в этой работе был определен самый низкий уровень ВАТ – 23.8 ГДж/т, но только для одного предприятия. Следующее за ним предприятие уже имело удельный расход энергии 28 ГДж/т, а самое высокое значение в выборке составило 51.9 ГДж/т, что в 2.2 раза выше ВАТ. Эта работа также показала, что:

- ВАТ для малых, средних и крупных предприятий довольно близки, но кривые распределения заметно отличаются: для средних предприятий кривая проходит выше, чем для крупных, а для малых – заметно выше, чем для средних;

- лучшие уровни для новых заводов мало отличаются от лучших уровней для средних и возрастных. Кривая для новых заводов почти совпадает с кривой для старых, что лишний раз свидетельствует о стагнации процесса повышения энергоэффективности. Кривая для средневозрастных заводов проходит выше. По-видимому, это результат того, что в то время строились заводы средней мощности.

В работе Ecofys (2009) построена кривая для стран ЕС по данным за 2007-2008 гг. и определено, что для лучшего предприятия удельный расход энергии равен 27.6 ГДж/т, среднее значение для 10% лучших предприятий – 28.7 ГДж/т, а среднее для всех – 35.7 ГДж/т. В работе UNIDO со ссылкой на IFA показано еще несколько кривых бенчмаркинга. На правых кривых ВАТ находится в диапазоне 23.5-27 ГДж/т, а самый высокий уровень равен 60 ГДж/т. В рамках этой работы была сформирована кривая бенчмаркинга для Египта для 2012 г. ВАТ на этой кривой равен 26.68 ГДж/т, а худший показатель – 57.33 ГДж/т. В исследовании для Канады самый низкий удельный расход энергии за 2002 г. составил 29.7 ГДж/т, а самый высокий – 42.3 ГДж/т (Canadian Industry Program for Energy Conservation, 2008). В этой работе указано, что для предприятия, замыкающего лучшие 10% в мире, значение в начале века равнялось 36.6 ГДж/т. В одной публикации утверждается, что минимальное значение удельного расхода энергии равно 15.4 ГДж/т (Karali et al., 2024).

Расходы энергии на производство аммиака разделяются на расходы топлива на технологические нужды (сырье), расходы топлива на сжигание для обеспечения высокотемпературных процессов производства водорода и синтеза аммиака и расходы электроэнергии, обеспечивающие работу компрессоров и других механизмов. Кроме того, в процессах утилизируется избыточное тепло, которое используется в других процессах, включая производство мочевины. Для обеспечения сопоставимости важно сравнивать потоки энергии в сходных границах процессов. В ряде публикаций указываются только расходы топлива; но для оценки удельного расхода энергии

важно также учитывать расходы электроэнергии. В сумме эти компоненты дают *валовый расход энергии*. Его коррекция на экспорт утилизируемого избыточного тепла за границы процесса позволяет оценить *нетто-расходы энергии*. Удельные расходы энергии существенно зависят от технологии производства, единичной мощности агрегата и возраста предприятия. Для современных предприятий они представлены в табл. 1 по составляющим.

**Таблица 1.** Удельные расходы энергии на производство аммиака (ГДж/т)

**Table 1.** Energy consumption for ammonia production (GJ/t)

Технология	Тип предприятия	Потенциал снижения	Валовый расход	Сырье	Топливо	ЭЭ* прочее	ЭЭ электролиз	Тепло	Нетто-расход
метан (SMR)	старый ВАО		32.1	20.7	11.1	0.3		-4.8	27.3
	типовое предприятие		31.7	20.7	9.8				30.5
	новое предприятие	26.0	27.7	20.7	6.8				27.5
метан (ATR)***	новое предприятие	26.0	29.4	25.8	2.1	1.5			29.4
метан (SMR с CCS)	новое предприятие	29.0	32.9	20.7	11.2	1.0		-3.1	29.8
нафта	типовое предприятие	29.0	33.0						33.0
мазут	типовое предприятие	36.0	37.4	18.6	15.1	3.7		-1.3	36.1
уголь	ВАО	38.6	38.6	18.6	15.1	4.9		2.6	41.2
уголь с CCS	ВАО	26.0	30.6				30.6		30.6
гидролиз	ВАО	26.0	30.0				30.0		30.0
пролиз метана с CCS	ВАО	46.0	54.3	42.0		12.3			54.3
биомасса	ВАО	37.0	42.0						42.0

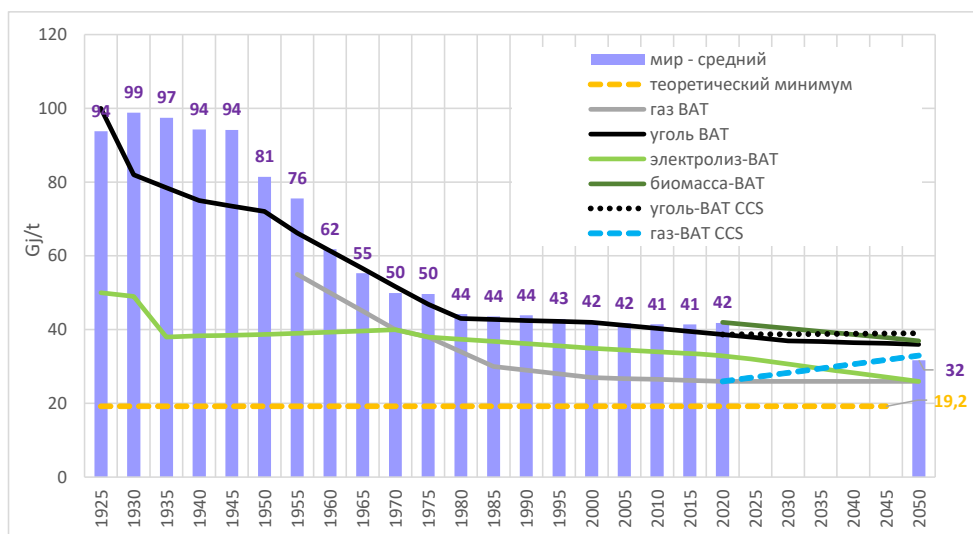
\* ЭЭ-электроэнергия.

\*\* Также дается значение -3.9.

\*\*\* Автотермический риформинг.

Источники: IRENA и AEA (2022); Sandalow et al., 2022; IEA, 2021; del Pozo, Cloete, 2022; Ausfelder et al., 2022; Saygin et al., 2023; UNIDO, 2014.

Согласно отдельным источникам, лучшие в мире значения удельных расходов энергии равны 23.5-23.8 ГДж/т аммиака (UNIDO, 2014), хотя в литературе чаще упоминаются значения 27-29 ГДж/т. Оценка 27-29 ГДж/т была дана еще в 2002 г. на основе данных на середину 1990-х годов (Phylipsen et al., 2002). С тех пор на протяжении четверти века она не менялась. МЭА в 2007 г. дало оценку 28 ГДж/т (IEA, 2007). Эта же оценка использована в работе Global Energy Assessment (IIASA, 2012). На близком уровне она остаётся и в последних публикациях (табл. 1). Оценки теоретического (термодинамического) минимума удельного расхода энергии, необходимого для производства аммиака, разнятся: IRENA и AEA (2022) оценивают его равным 22,5 ГДж/т, Worrell et al. (2008) – 19.2 ГДж/т, а IFA (2009) – примерно 19 ГДж/т.



**Рисунок 10.** Удельные расходы энергии на производство аммиака  
Источники: см. источники к табл. 1. Оценка значений на 2050 г. – IEA, 2021

**Figure 10.** Specific energy consumption for ammonia production  
Source: see the source to Table 1. 2050 estimates – IEA, 2021

Потенциал снижения удельных расходов энергии в основном уже реализован в 1925-1980 гг. (рис. 10). После этого на протяжении четырех десятилетий удельные расходы энергии стагнировали. Оставшийся потенциал для каждой технологии сравнительно невелик – 7-12%. Он увеличивается при замене угля газом, но снижается при росте доли низкоуглеродных технологий (табл. 1). Для производства «голубого» аммиака (SMR+CCS) с улавливанием 90% CO<sub>2</sub> дополнительные потребности в тепле и электроэнергии составляют 2.5 ГДж/т и 0.4 ГДж/т. (Saugin et al., 2023). Для технологий гидролиза удельный расход энергии для BAT равен 30-36 ГДж/т, что выше уровня BAT для паровой конверсии метана. Для пиролиза и производства аммиака на базе газификации биомассы удельные расходы заметно выше.

### Потенциал снижения удельных выбросов ПГ при производстве аммиака

Бенчмарки по удельным выбросам CO<sub>2</sub> при производстве аммиака в ЕС снижаются очень медленно. Они являются неотъемлемой частью двух механизмов регулирования выбросов: ECT и СВММ. Для этих систем бенчмарк прямых выбросов CO<sub>2</sub> на 2021-2025 гг. установлен на уровне 1.57 тCO<sub>2</sub>экв/т, что соответствует самому низкому уровню в ЕС на кривой бенчмаркинга, построенной по данным за 2016-2017 гг. Уровень бенчмарка, по данным за 2007-2008 гг., был установлен равным 1.61 тCO<sub>2</sub>/т (Ecofys, 2009). В ETC на 2013-2020 гг. бенчмарк был установлен на более высоком уровне – 1.619 тCO<sub>2</sub>экв/т. По данным за 2016-2017 гг., среднее значение удельных выбросов для предприятий, входя-

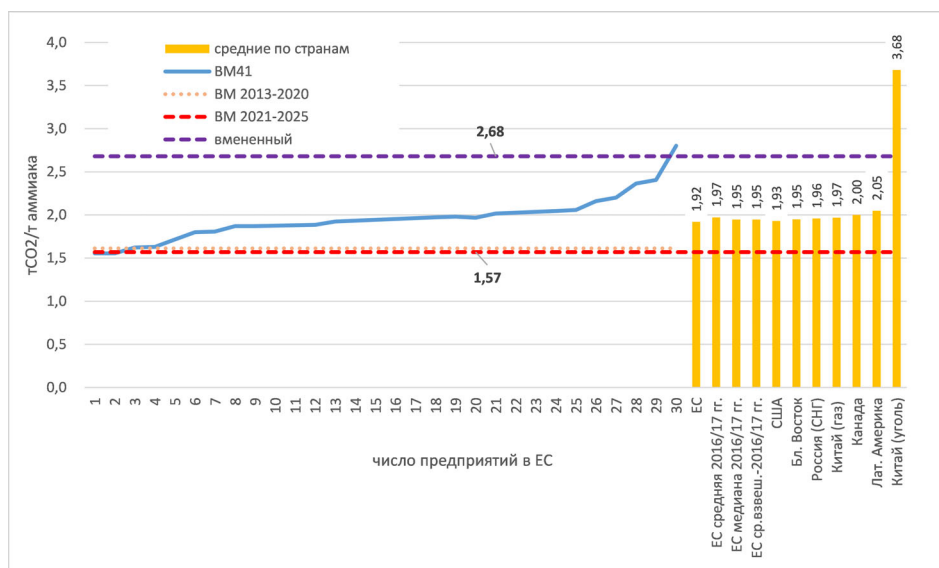
ших в 10% лучших, было равно 1.604 тСО<sub>2</sub>экв/т, а для самого лучшего – 1.57 тСО<sub>2</sub>экв/т. В среднем, по сравнению с уровнем, установленным для 2011 г., бенчмарк снижался только на 0.11% в год. То есть снижение углеродоемкости производства аммиака в ЕС в течение 10 лет практически стагнировало. Для достижения уровня 1.57 тСО<sub>2</sub>экв/т необходима реализация проектов по повышению энергоэффективности, включая регенерацию водорода из продувочного газа, минимизацию потерь пара, повышение эффективности генератора, котла и печи (Elshishini, 2024). Достижение уровня ВАТ по технологическим выбросам (1.24 т СО<sub>2</sub>/т) за счет максимального увеличения производства аммиака при замене катализаторов для повышения эффективности конверсии, рекуперации аммиака из продувочного газа, оптимизации условий эксплуатации реакторов позволяет снизить выбросы до 1.42 т СО<sub>2</sub>/т (Elshishini, 2024). Согласно регулированию по СВМ, до конца 2024 г. у компаний-импортеров есть возможность выбора отчетности из трех вариантов:

- полная отчетность по новой методологии (метод ЕС);
- отчетность на основе эквивалентного метода (три варианта); или
- отчетность на основе вмененных значений по умолчанию (только до июля 2024 г., т.е. за четвертый квартал 2023 г. и первый и второй кварталы 2024 г.).

Установлены следующие вмененные значения для аммиака: прямые выбросы – 2.68 тСО<sub>2</sub>/т аммиака; косвенные выбросы – 0.14 тСО<sub>2</sub>/т; суммарные выбросы – 2.82 тСО<sub>2</sub>/т. Они установлены на 3% ниже уровня предприятия с самыми высокими удельными выбросами в ЕС в 2016/17 гг. (рис. 11). В документе утверждается, что эти значения представляют собой средние «мировые» значения, взвешенные по объемам производства. Учитывая высокую долю Китая и Индии, в которых производство аммиака базируется на угле, это может быть и так. Начиная с 2026 г. будет применяться уже другой набор значений по умолчанию. При углеродоемкости электроэнергии 260 гСО<sub>2</sub>/кВт-ч (среднее значение для ЕС) допустимый максимальный расход электроэнергии получается равным 538 кВт-ч.

Введение СВМ для аммиака сначала практически не дает преимуществ компаниям ЕС, поскольку разница в удельных выбросах с другими странами, использующими в качестве сырья в основном природный газ, невелика (рис. 11). В 2021 г. в ЕС бесплатно было выдано 78% квот на выбросы СО<sub>2</sub> от производства аммиака (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Эта доля будет постепенно падать и сойдет на нет к 2032 г. Затем все производящие аммиак компании ЕС будут платить цену за 1 т на углерод в системе торговли квотами, умноженную на удельные выбросы соответствующего года. Все импортеры аммиака из других стран будут платить разницу в цене на углерод в ЕТС и на их внутреннем рынке, умноженную на углеродоемкость в стране происхождения аммиака (ЦЭНЭФ-XXI, 2021). В итоге аммиак на рынке ЕС подорожает на средневзвешенную углеродоемкость, умноженную на цену углерода. При цене углерода 100 евро/тСО<sub>2</sub> и при сохранении нынешней разности в средних уровнях углеродоемкости разница цен на аммиак, поставленный из США, Ближнего Востока или России, по сравнению с ценой аммиака,

произведенного в ЕС, не превысит 1-4 евро/т CO<sub>2</sub>. Значимый негативный эффект получит только Китай (рис. 11).



**Рисунок 11.** Уровни бенчмарков валовых выбросов CO<sub>2</sub> при производстве аммиака в ЕС и других странах

Источники: кривая бенчмаркинга и вмененные значения – EUROPEAN COMMISSION, 2023.  
Значения для разных стран – FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW, 2021/2022;  
Fertilizer Canada, 2023

**Figure 11.** Gross CO<sub>2</sub> emission benchmarks for ammonia production in the EC and other countries  
Source: benchmarking curve and embodied values – EUROPEAN COMMISSION, 2023. Values by countries – FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW, 2021/2022;  
Fertilizer Canada, 2023

В системе бенчмаркинга ЕС используется показатель валовых прямых выбросов CO<sub>2</sub> (*generated emissions*) от производства аммиака. Канада использует показатель нетто-выбросов с учетом стоков при производстве мочевины, закачки CO<sub>2</sub> в нефтяные пласты или использования в парниках (Fertilizer Canada, 2023). В среднем для Канады валовые выбросы в 2018-2020 гг. равны 2 тCO<sub>2</sub>/т аммиака, использование на производство мочевины и другие цели составляет 0.76 тCO<sub>2</sub>/т, а значит, средние нетто-выбросы равны 1.2 тCO<sub>2</sub>/т. Минимальное значение для одного из предприятий Канады – 0.8 тCO<sub>2</sub>/т. Средний уровень утилизации CO<sub>2</sub> в Канаде равен 61%, а для предприятий с самыми низкими нетто-выбросами – 89%. Сравнение результатов бенчмаркинга в Канаде в 2018-2020 гг. с результатами за 2000-2002 гг. показало отсутствие прогресса в снижении удельных выбросов. Специалисты Канады утверждают, что их страна имеет самые низкие нетто-выбросы. Однако сравнение данных по странам с данными на рис. 11 показывает, что для других стран используется показатель валовых выбросов, поэтому такой вывод неправомерен.

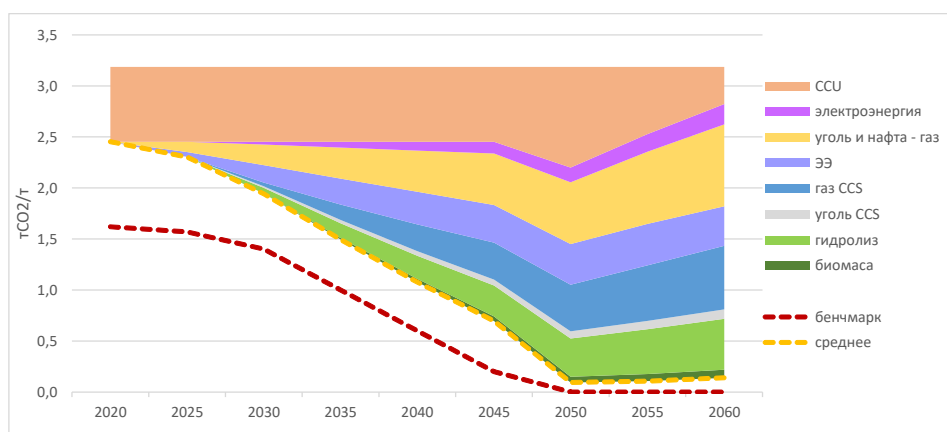
Оставшийся углеродный бюджет для мировой промышленности по производству аммиака оценен равным 11 ГтCO<sub>2</sub> (5-16 ГтCO<sub>2</sub>) (MPP, 2022). По оценкам МЭА, если существующие заводы проработают до 2040 г., то кумулятивные выбросы составят 4.4 ГтCO<sub>2</sub>, при продлении их службы на каждые 10 лет добавляется 3.6-3.7 ГтCO<sub>2</sub> (IEA, 2021). Таким образом, к 2060 г. углеродный бюджет будет полностью истощен только действующими предприятиями, а все новые предприятия должны вводиться по технологиям с околонулевыми выбросами ПГ.

Достижение углеродной нейтральности в аммиачной промышленности к 2050 г. означает постепенное снижение бенчмарка по выбросам CO<sub>2</sub> практически до нуля. Пропорции вкладов отдельных групп мер в снижение бенчмарка зависят от готовности технологий и их стоимости. Основными направлениями декарбонизации в аммиачной промышленности, как и в химической промышленности в целом (рис. 12), являются:

- управление спросом и повышение материальной эффективности – повышение эффективности использования продукции, которая изготавливается с применением аммиака (в первую очередь, азотных удобрений). Этот фактор позволяет снижать выбросы за счет снижения объемов производства, но не влияет на удельные выбросы. По оценкам МЭА, за счет этого фактора выбросы CO<sub>2</sub> могут быть снижены на значимые 21% (IEA, 2021). Другие источники дают более скромные оценки – до 4% (MPP, 2022);
- повышение энергоэффективности – приближение средних удельных расходов энергии к уровням ВАТ. Однако многие низкоуглеродные технологии имеют более высокие удельные расходы энергии (см. табл. 1), поэтому по мере роста их доли вклад этого фактора сначала стабилизируется, а затем сокращается (IEA, 2021);
- замена одних ископаемых топлив другими (угля, нефти и мазута – природным газом) дает не только снижение выбросов, но и значимое повышение энергоэффективности;
- рост масштабов применения технологии CCS. Захваченный высококонцентрированный углерод во многих случаях может использоваться в качестве сырья для производства мочевины, закачки в нефтяные пласты и др. Сложнее обстоит дело с захватом CO<sub>2</sub> от установок сжигания топлива;
- электрификация технологических процессов – гидролиз на базе сетевой или локально производимой безуглеродной электроэнергии, или электрокаталитическое восстановление (электрохимический Хабер-Бош может производить аммиак с меньшими затратами энергии и выбросами CO<sub>2</sub>, Kyriakou et al., 2020). Процесс замены природного газа может происходить постепенно. Так, замена 15% природного газа «зеленым» водородом приводит к сокращению выбросов до 1.37 тCO<sub>2</sub>/т (Elshishini, 2024). Эта опция имеет особенность: при полном переходе на безуглеродный электролиз пропадает сток CO<sub>2</sub> для произ-

водства мочевины (рис. 12). Для компенсации потерь нужен захват  $\text{CO}_2$  в других процессах или секторах. Если же использование топлива сохраняется и захваченный углерод используется как сырье для мочевины на месте, то проблемы географического дисбаланса между CCS и CCU можно избежать;

- декарбонизация используемой электрической энергии для основных и вспомогательных процессов за счет ее поставок от безуглеродных источников, включая ВИЭ, ГЭС АЭС, а также от ТЭС, оснащенных системами CCUS;
- использование биомассы. Эти возможности ограничены объемами доступной биомассы ввиду конкуренции за посевные или лесные площади с другими сферами ее применения при высокой энергоемкости процессов;
- снижение выбросов ПГ при добыче, транспортировке топлива, другого сырья и готовой продукции.



\* ЭЭ – энергоэффективность

**Рисунок 12.** Вклад отдельных факторов в снижение среднемировых выбросов  $\text{CO}_2$  при производстве аммиака и возможная динамика уровня бенчмарка в ЕС

*Источник: расчеты автора*

**Figure 12.** Contributions from various factors to the reduction of average global  $\text{CO}_2$  emissions from ammonia production and potential benchmark evolution in the EC

*Source: estimated by the author*

К 2050 г. бенчмарк по удельным выбросам  $\text{CO}_2$  при производстве аммиака в ЕС может снизиться до нуля. За ним с запаздыванием примерно в 10 лет могут следовать и среднемировые удельные выбросы. Задача сводится к тому, чтобы снять удельные выбросы с мели стагнации, на которой они застряли в последние 40 лет, и повторить рывок в их снижении, отмеченный в 60-70-х годах XX века. Огромное множество комбинаций перечисленных выше факторов позволяет заметно снизить среднемировой удельный уровень выбросов  $\text{CO}_2$ . На рис. 12 показана только одна из возможных комбинаций декарбониза-

ции аммиачной промышленности. Удельные выбросы снижаются до 0.1 тCO<sub>2</sub>/т к 2050 г. и остаются на этом уровне. По оценкам МЭА, в сценариях STEPS, SDS и NZE средние по миру удельные выбросы CO<sub>2</sub> снижаются до 1.6; 0.5 и 0.1 тCO<sub>2</sub>/т. В сценарии SDS это происходит на 12% за счет замены угля и жидких топлив газом и еще на 30% за счет совершенствования технологий, включая повышение энергоэффективности. В прогнозе ММР (2022) рассмотрены три сценария снижения удельных выбросов CO<sub>2</sub>:

- базовый, в котором выбросы снижаются с исходного уровня 2.6 (охваты 1 и 2) до 1.8 тCO<sub>2</sub>/т (на 17% за счет роста производства зеленого аммиака, на 12% за счет повышения энергоэффективности и замены угля и жидкого топлива на газ и на 2% за счет роста доли переходных технологий);
- сценарий с низкими издержками (LCS), в котором выбросы снижаются до 0.1 тCO<sub>2</sub>/т, в т.ч. на 67% за счет роста производства «зеленого» аммиака; на 26% за счет роста производства «голубого»; на 3% за счет повышения энергоэффективности и замены угля и жидкого топлива на газ и на 1% за счет роста доли переходных технологий;
- сценарий с быстрым снижением выбросов (FAS), в котором выбросы снижаются до нуля, в т.ч. на 91% – за счет роста производства «зеленого» аммиака; на 1% – за счет роста производства «голубого»; на 3% – за счет повышения энергоэффективности и замены угля и жидкого топлива на газ; на 1% – за счет роста доли переходных технологий) и еще на 4% – за счет повышения материальной эффективности.

После перехода на полное приобретение квот на выбросы на аукционной основе в ЕСТ значимость бенчмарка для системы торговли квотами утрачивается, но она сохраняется для схемы СВМ и для схемы контрактов на разницу (CCfD). По данным IRENA, диапазоны удельных выбросов для природного газа равны 1.75-2.62 тCO<sub>2</sub>/т (бенчмарк ЕС 1.57 тCO<sub>2</sub>/т); для нефти и мазута – 2.54-3.33 тCO<sub>2</sub>/т; для угля – 3.61-4.36 тCO<sub>2</sub>/т; для топлива с CCS – 0.2-1.2 тCO<sub>2</sub>/т; для пиролиза метана – 0.2-0.55 тCO<sub>2</sub>/т; для электролиза – 0.16-0.83 тCO<sub>2</sub>/т; для биомассы – 0.32-1.11 тCO<sub>2</sub>/т (IRENA и АЕА, 2022). В работе Ausfelder et al. (2022) ожидается снижение удельных выбросов в 2020-2050 гг. с 2 до 1.8 тCO<sub>2</sub>/т для традиционной технологии паровой конверсии метана (при сохранении уровня 1.58 тCO<sub>2</sub>/т для лучшей); с 0.8 до 0.6 тCO<sub>2</sub>/т – для «голубого» аммиака; с 4.2 тCO<sub>2</sub>/т до нуля – для «желтого»; с 1.3 тCO<sub>2</sub>/т до нуля – для пиролиза метана и с 0.8 тCO<sub>2</sub>/т до нуля – для «зеленого». В Sandalow et al. (2022) даны следующие значения ВАТ для удельных выбросов: 1.8 тCO<sub>2</sub>/т – для паровой конверсии метана, 3.2 тCO<sub>2</sub>/т – для газификации угля, 0.2 тCO<sub>2</sub>/т – для газификации угля с CCS и 0.1 тCO<sub>2</sub>/т – для паровой конверсии метана с CCS. Для технологии криогенной дистилляции удельные выбросы оценены в 1.73 тCO<sub>2</sub>/т, адсорбции при переменном давлении – 0.3 тCO<sub>2</sub>/т; для низкотемпературного электролиза – 0.22 тCO<sub>2</sub>/т; высокотемпературного электролиза – 0.25 тCO<sub>2</sub>/т; получения аммиака в качестве побочного продукта хлор-щелочных процессов – 0.37 тCO<sub>2</sub>/т, или в качестве

побочного продукта на установках парового крекинга – 1.82 тCO<sub>2</sub>/т (Liu et al., 2020).

Схема контрактов на разницу (CCfD) вводится в Германии для поддержки производства низкоуглеродных базовых материалов, включая производство аммиака (Lösch et al., 2022). В ее рамках для оценки снижения удельных выбросов за счет применения низкоуглеродных технологий используются базовые уровни удельных выбросов, которые приравниваются к бенчмаркам, установленным для схемы ЕСТ на момент заключения контракта. Контракты на разницу заключаются сроком на 15 лет, поэтому эта схема сохранится за пределами 2032 г. Наряду с СВМ она будет опираться на сохранение практики формирования бенчмарков.

### Список литературы

ЦЭНЭФ-XXI (2021) *СВМ: последствия для российской экономики*, Москва, август 2021 г., URL: Cz\_ENEF\_XXI\_СВМ\_4c0a2fb4a3.pdf (cenef-xxi.ru).

Argus Media (2020) *Green shift to create 1 billion tonne 'green ammonia' market?* June 2020, URL: Argus White Paper – Green Ammonia.pdf (argusmedia.com).

American Bureau of Shipping (2020) *Sustainability whitepaper. Ammonia as marine fuel*, October 2020.

Ausfelder, F., Herrmann, E.O., López González, L.F. (2022) Perspective Europe 2030. Technology options for CO<sub>2</sub>-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production, *Dechema Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.*, January 2022, URL: Studie+ Ammoniak.pdf (dechema.de).

Beckman, J., Riche, S. (2015) Changes to the natural gas, corn, and fertilizers price relationships from the biofuels era, *Journal of Agricultural and Applied Economics*, vol. 47, pp. 494-509, doi:10.1017/aae.2015.22, URL: changes\_to\_the\_natural\_gas\_corn\_and\_fertilizer\_pri.pdf.

Canadian Industry Program for Energy Conservation (2008) *Canadian ammonia producers: benchmarking energy efficiency and carbon dioxide emissions*, Prepared for the Canadian Fertilizer Institute and Natural Resources Canada.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v 6.0, Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent. [Dataset]*, doi: http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b.

Del Pozo, C.A., Cloete, S. (2022) Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future, *Energy Conversion and Management*, vol. 255, 115312.

Ecofys (2009) *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012*, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research and Öko-Institut Sector, report for the chemical industry, November 2009.

---

Egerer, J., Grimm, V., Niazmand, K., Runge, P. (2023) The economics of global green ammonia trade – Shipping Australian wind and sunshine to Germany, *Applied Energy*, vol. 334, 120662.

Elshishini, S. (2024) Product carbon footprint methodology for ammonia production by conventional steam reforming – A case study, *European Journal of Sustainable Development Research*, vol. 8 (1), em0241, URL: <https://doi.org/10.29333/ejosdr/13889>.

EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL (2023) *Climate action. Directorate B European and international carbon markets. Update of benchmark values for the years 2021-2025 of phase 4 of the EU ETS Benchmark curves and key parameters*, Updated final version issued on 12 October 2021, URL: [policy\\_ets\\_allowances\\_bm\\_curve\\_factsheets\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf) (europa.eu).

Fasihi, M., Weiss, R., Savolainen, J., Breyer, C. (2021) Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants, *Applied Energy*, vol. 294, 116170.

Fertilizer Canada (2023) *Ammonia Production Greenhouse Gas Emissions Benchmarking*. October 2023, URL: [Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf](https://www.fertilizercanada.ca/Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf) (fertilizercanada.ca).

*FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW* (2021/2022) Climate Policy, URL: [climate.pdf](https://www.fertilizerseurope.com/climate.pdf) (fertilizerseurope.com).

Glibert, P.M., Harrison, J.A., Heil, C.A., Seitzinger, S. (2006) Escalating Worldwide Use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication, February 2006, *Biogeochemistry*, vol. 77 (3), pp. 441-463, doi: 10.1007/s10533-005-3070-5.

IEA (2007) *Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions*, *Energy Indicators*.

IFA (2009) *Energy Efficiency and CO<sub>2</sub>*, Paris, France, International Fertilizer Industry Association.

IEA (2021) *Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertiliser production*, October 2021.

IEA (2024) *Electricity 2024, Analysis and forecast to 2026*.

IIASA (2012) *Global Energy Assessment. Towards a Sustainable Future*, Cambridge University Press.

IRENA and AEA (2022) *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

Karali, N., Khanna, N., Shah, N. (2024) *Climate Impact of Primary Plastic Production*, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2024, URL: <https://escholarship.org/uc/item/12s624vf>.

---

---

Kyriakou, V., Garagounis, I., Vourros, A., Vasileiou, E., Stoukides, M. (2020) *An Electrochemical Haber-Bosch Process*, Joule 4, pp. 142-158, January 15, Elsevier Inc., URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.006>.

Lösch, O., Eckstein, J., Friedrichsen, N., Richstein, J.C. (2022) *Carbon Contracts for Difference as essential instrument to decarbonize basic materials industries*, ECEEE summer study proceedings, September 2022, content (fraunhofer.de).

Liu, X., Elgowainy, A., Wang, M. (2020) Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from 2 renewable resources and industrial by-products, *Green Chemistry*, Issue 17.

Menga, F., Wagner, A., Kremer, A.B., Kanazawa, D., Leung, J.J., Goult, P., Guan, M., Herrmann, S., Speelman, E., Sauter, P., Lingeswaran, S., Stuchtey, M.M., Hansen, K., Masanet, E., Serrenho, A.C., Ishii, N., Kikuchi, Y., Cullen, J.M. (2023) Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry, *PNAS*, vol. 120, no. 8, e2218294120, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

MPP (2022) *Making Net-Zero Ammonia Possible: An Industry-Backed, 1.5°C-Aligned Transition Strategy*, Mission Possible Partnership.

Pinto, R., Henriques, S., Brockway, P., Heun, M., Sousa, T. (2022) *The rise and stall of world electricity efficiency: 1900-2017, results and implications for the renewables transitions*, 15 March 2022, MPRA Paper, no. 112530, posted 23 Mar 2022 17:03 UTC, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/112530/>, а после 1971 – база данных МЭА.

Phylipsen, D., Blok, K., Worrell, E., de Beer, J. (2002) Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, *Energy Policy*, vol. 30, pp. 663-679.

Rouwenhorst, K.H.R., Travis, A.S., Lefferts, L. (2022) 1921-2021: A Century of Renewable Ammonia Synthesis, *Sustain. Chem.*, vol. 3, pp. 149-171, URL: <https://doi.org/10.3390/suschem3020011>.

The Royal Society (2020) *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*, POLICY BRIEFING, February 2020, URL: [royalsociety.org](https://royalsociety.org).

Sandalow, D., Aines, R., Fan, Z., Friedmann, J., McCormick, C., Merz, A.-K., Scown, C. (2022) *Low-Carbon Ammonia Roadmap*, ICEF Innovation Roadmap Project, November 2022.

Saygin, D., Gielen, D. (2021) Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector, *Energies*, vol. 14 (13), 3772, doi:10.3390/en14133772.

Saygin, D., Blanco, H., Boshell, F., Cordonnier, J., Rouwenhorst, K., Lathwal, P., Gielen, D. (2023) The Role of Green Ammonia in Transitioning the Non-Energy Use of Natural Gas, *Sustainability*, vol. 15, 1623, URL: <https://doi.org/10.3390/su15021623>.

---

Tavares Flavio, Luciane, V., Monteiro, P.C., Mainier, Fernando B. (2013) Indicators of energy efficiency in ammonia production plants, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 02, Issue 07, pp. 116-123, URL: [www.ajer.org](http://www.ajer.org).

Tonelli, D., Rosa, L., Gabrielli, P., Parente, A., Contino, F. (2023) Cost-competitive decentralized ammonia fertilizer production can increase food, *Nature Food*, vol. 5 (6), pp. 469-479, URL: <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00979-y>.

UNIDO (2014) *Energy Efficiency*, Benchmarking Report for Fertilizer Sector.

Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., Nan, Z. (2008) *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*, Berkeley, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, URL: [World\\_Best\\_Practice\\_Energy\\_Intensity\\_Values\\_for\\_Se.pdf](#).

## References

CENEF-XXI (2021) *SVAM: posledstviya dlya rossiyskoy ekonomiki* [SVAM: Consequences for the Russian Economy], August 2021, Moscow, Russia, URL: [Cz\\_ENEF\\_XXI\\_CBAM\\_4c0a2fb4a3.pdf](#) (cenef-xxi.ru).

Argus Media (2020) *Green shift to create 1 billion tonne 'green ammonia' market?* June 2020, URL: [Argus White Paper - Green Ammonia.pdf](#) (argusmedia.com).

American Bureau of Shipping (2020) *Sustainability whitepaper. Ammonia as marine fuel*, October 2020.

Ausfelder, F., Herrmann, E.O., López González, L.F. (2022) Perspective Europe 2030. Technology options for CO<sub>2</sub>-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production, *Dechema Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.*, January 2022, URL: [Studie+ Ammoniak.pdf](#) (dechema.de).

Beckman, J., Riche, S. (2015) Changes to the natural gas, corn, and fertilizers price relationships from the biofuels era, *Journal of Agricultural and Applied Economics*, vol. 47, pp. 494-509, doi:10.1017/aae.2015.22, URL: [changes\\_to\\_the\\_natural\\_gas\\_corn\\_and\\_fertilizer\\_pri.pdf](#).

Canadian Industry Program for Energy Conservation (2008) *Canadian ammonia producers: benchmarking energy efficiency and carbon dioxide emissions*, Prepared for the Canadian Fertilizer Institute and Natural Resources Canada.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v 6.0, Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent.* [Dataset], doi: <http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>.

Del Pozo, C.A., Cloete, S. (2022) Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future, *Energy Conversion and Management*, vol. 255, 115312.

---

Ecofys (2009) *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012*, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research and Öko-Institut Sector, report for the chemical industry, November 2009.

Egerer, J., Grimm, V., Niazmand, K., Runge, P. (2023) The economics of global green ammonia trade – Shipping Australian wind and sunshine to Germany, *Applied Energy*, vol. 334, 120662.

Elshishini, S. (2024) Product carbon footprint methodology for ammonia production by conventional steam reforming – A case study, *European Journal of Sustainable Development Research*, vol. 8 (1), em0241, URL: <https://doi.org/10.29333/ejosdr/13889>.

EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL (2023) *Climate action. Directorate B European and international carbon markets. Update of benchmark values for the years 2021-2025 of phase 4 of the EU ETS Benchmark curves and key parameters*, Updated final version issued on 12 October 2021, URL: [policy\\_ets\\_allowances\\_bm\\_curve\\_factsheets\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf) (europa.eu).

Fasihi, M., Weiss, R., Savolainen, J., Breyer, C. (2021) Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants, *Applied Energy*, vol. 294, 116170.

Fertilizer Canada (2023) *Ammonia Production Greenhouse Gas Emissions Benchmarking*. October 2023, URL: [Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf](https://www.fertilizercanada.ca/Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf) (fertilizercanada.ca).

*FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW* (2021/2022) Climate Policy, URL: [climate.pdf](https://www.fertilizerseurope.com/climate.pdf) (fertilizerseurope.com).

Glibert, P.M., Harrison, J.A., Heil, C.A., Seitzinger, S. (2006) Escalating Worldwide Use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication, February 2006, *Biogeochemistry*, vol. 77 (3), pp. 441-463, doi: 10.1007/s10533-005-3070-5.

IEA (2007) *Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions*, *Energy Indicators*.

IFA (2009) *Energy Efficiency and CO<sub>2</sub>*, Paris, France, International Fertilizer Industry Association.

IEA (2021) *Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertiliser production*, October 2021.

IEA (2024) *Electricity 2024, Analysis and forecast to 2026*.

IIASA (2012) *Global Energy Assessment. Towards a Sustainable Future*, Cambridge University Press.

IRENA and AEA (2022) *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

---

Karali, N., Khanna, N., Shah, N. (2024) *Climate Impact of Primary Plastic Production*, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2024, URL: <https://escholarship.org/uc/item/12s624vf>.

Kyriakou, V., Garagounis, I., Vourros, A., Vasileiou, E., Stoukides, M. (2020) *An Electrochemical Haber-Bosch Process*, *Joule* 4, pp. 142-158, January 15, Elsevier Inc., URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.006>.

Lösch, O., Eckstein, J., Friedrichsen, N., Richstein, J.C. (2022) *Carbon Contracts for Difference as essential instrument to decarbonize basic materials industries*, ECEEE summer study proceedings, September 2022, content (fraunhofer.de).

Liu, X., Elgowainy, A., Wang, M. (2020) Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from 2 renewable resources and industrial by-products, *Green Chemistry*, Issue 17.

Menga, F., Wagner, A., Kremer, A.B., Kanazawa, D., Leung, J.J., Goult, P., Guan, M., Herrmann, S., Speelman, E., Sauter, P., Lingeswaran, S., Stuchtey, M.M., Hansen, K., Masanet, E., Serrenho, A.C., Ishii, N., Kikuchi, Y., Cullen, J.M. (2023) Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry, *PNAS*, vol. 120, no. 8, e2218294120, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

MPP (2022) *Making Net-Zero Ammonia Possible: An Industry-Backed, 1.5°C-Aligned Transition Strategy, Mission Possible Partnership*.

Pinto, R., Henriques, S., Brockway, P., Heun, M., Sousa, T. (2022) *The rise and stall of world electricity efficiency: 1900-2017, results and implications for the renewables transitions*, 15 March 2022, MPRA Paper, no. 112530, posted 23 Mar 2022 17:03 UTC, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/112530/>, а после 1971 – база данных МЭА.

Phylipsen, D., Blok, K., Worrell, E., de Beer, J. (2002) Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, *Energy Policy*, vol. 30, pp. 663-679.

Rouwenhorst, K.H.R., Travis, A.S., Lefferts, L. (2022) 1921-2021: A Century of Renewable Ammonia Synthesis, *Sustain. Chem.*, vol. 3, pp. 149-171, URL: <https://doi.org/10.3390/suschem3020011>.

The Royal Society (2020) *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*, POLICY BRIEFING, February 2020, URL: [royalsociety.org](https://royalsociety.org).

Sandalow, D., Aines, R., Fan, Z., Friedmann, J., McCormick, C., Merz, A.-K., Scown, C. (2022) *Low-Carbon Ammonia Roadmap*, ICEF Innovation Roadmap Project, November 2022.

Saygin, D., Gielen, D. (2021) Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector, *Energies*, vol. 14 (13), 3772, doi:10.3390/en14133772.

Saygin, D., Blanco, H., Boshell, F., Cordonnier, J., Rouwenhorst, K., Lathwal, P., Gielen, D. (2023) *The Role of Green Ammonia in Transitioning the*

---

Non-Energy Use of Natural Gas, *Sustainability*, vol. 15, 1623, URL: <https://doi.org/10.3390/su15021623>.

Tavares Flavio, Luciane, V., Monteiro, P.C., Mainier, Fernando B. (2013) Indicators of energy efficiency in ammonia production plants, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 02, Issue 07, pp. 116-123, URL: [www.ajer.org](http://www.ajer.org).

Tonelli, D., Rosa, L., Gabrielli, P., Parente, A., Contino, F. (2023) Cost-competitive decentralized ammonia fertilizer production can increase food, *Nature Food*, vol. 5 (6), pp. 469-479, URL: <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00979-y>.

UNIDO (2014) *Energy Efficiency, Benchmarking Report for Fertilizer Sector*.

Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., Nan, Z. (2008) *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*, Berkeley, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, URL: [World\\_Best\\_Practice\\_Energy\\_Intensity\\_Values\\_for\\_Se.pdf](#).

Статья поступила в редакцию (Received): 22.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 22.09.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

#### **Для цитирования / For citation:**

Башмаков, И.А. (2024) Глобальные рынки аммиака: перспективы развития и декарбонизации, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 510-540, doi: 10.21513/0207-2564-2024-4-510-540.

Bashmakov, I.A. (2024) Global ammonia markets: development and decarbonization prospects, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 510-540, doi: 10.21513/0207-2564-2024-4-510-540.