

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 662.769.21

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48

Классификация и анализ локализации проектов по производству водорода*

А.В. КАЗАРИНОВ^а, М.Ю. ДЕРЕВЯНОВ^б, Ю.Э. ПЛЕШИВЦЕВА^с

443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный
технический университет

^а artemrus987@gmail.com ^б mder2007@mail.ru ^с yulia_pl@mail.ru

Анализ водородных проектов основан на информации, представленной в открытой базе данных Международного энергетического агентства (МЭА), в которой представлено 1327 проектов по производству водорода и продуктов на его основе, реализуемых более чем в 100 странах мира. Для выявления сложившихся трендов развития водородных проектов предложено использовать два классификационных подхода. Первый подход основан на классификации проектов согласно периоду их реализации, а второй использует предлагаемую в базе МЭА классификацию стадий реализации проектов. Комплексное применение описанных подходов позволяет провести системный анализ представленных в базе МЭА данных. Проекты, использующие электролизные технологии производства водорода, рассматриваются отдельно от проектов, использующих альтернативные технологии. Проведен анализ географической локализации проектов в соответствии с местом их реализации в одном из четырех регионов мира: Европе, Азии, Америке или Океании и Африке. Для каждого из указанных регионов представлено распределение мощностей проектов по странам. Установлено, что глобальная мощность электролизных проектов для производства водорода достигла 310 МВт, и при успешной реализации разрабатываемых в настоящее время 350 перспективных проектов их суммарная мощность может достичь 65 ГВт к 2030 году. Кроме этого, около 80 концептуальных проектов общей мощностью более 230 ГВт находится на ранних стадиях разработки. Если все эти перспективные проекты будут реализованы, суммарные объемы производства водорода с учетом электролизных проектов могут достичь более 50 млн тонн уже к 2030 году, что будет способствовать выполнению глобальных целей по декарбонизации. Результаты анализа позволяют сделать вывод, что в настоящее время проекты по производству водорода и продуктов на его основе стремительно развиваются в мире в основном благодаря амбициозным водородным стратегиям стран Европейского союза и Великобритании.

Ключевые слова: МЭА, IEA, классификация, анализ, база данных, регионы мира, водород, водородные технологии

* Статья получена 28 сентября 2022 г.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы одним из наиболее стремительно развивающихся направлений в сфере энергетики стало применение низкоуглеродных технологий производства и потребления энергии. Актуальность проблемы декарбонизации энергетического сектора связана с тем, что основной причиной аномально высокого роста среднегодовой температуры и других экологических проблем являются парниковые газы, основным источником которых является энергетический сектор промышленности [1].

Одной из основных целей борьбы с климатическими изменениями остается предотвращение экстремального повышения температуры. Парижское соглашение, подписанное 22 апреля 2016 года многими странами – членами ООН, включая Россию, содержит в себе различные обязательства по сдерживанию роста и снижению выбросов парниковых газов. Каждые пять лет эти обязательства пересматриваются в направлении их постоянного ужесточения на последующий период. В настоящее время 48 стран, производящих более 46 % мировых выбросов парниковых газов, поставили цель к 2050–2060 годам достигнуть углеродной нейтральности своих экономик [2].

Многие развитые страны начинают внедрение планов по плавному отказу от использования ископаемых ресурсов в качестве энергоносителей и источников энергии. Помимо использования возобновляемых ресурсов, экономически развитые страны возлагают большие надежды на водород. Использование водорода является одним из наиболее перспективных направлений движения энергетики на пути декарбонизации. Водород имеет высокий потенциал применения в различных отраслях экономики и сферах человеческой деятельности: в нефтеперерабатывающей и химической промышленности, в энергетике, в жилищно-коммунальном и транспортном секторах. Экологическая «чистота» водорода обусловлена тем, что при его сгорании выделяется только вода [3]. Некоторые аналитики прогнозируют существенное увеличение мирового потребления водорода к 2030 году [4].

Технологически развитые страны интенсивно поддерживают выдвигаемые инициативы формирования водородной энергетики. Для этих стран инвестиции в создание высокотехнологичного водородного сектора, ориентированного на экспорт, являются перспективными [5].

На данный момент декарбонизация промышленности и транспорта не является центральной стратегической задачей развития экономики Российской Федерации. Технологии производств водорода разрабатываются в России, главным образом, для импорта водорода в другие страны и сохранения лидирующих позиций на энергетическом рынке, для чего имеются все необходимые предпосылки, в первую очередь практически неограниченные сырьевые ресурсы и достаточная технологическая инфраструктура [6, 7].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Обзор водородных проектов основан на полном наборе данных, представленном в опубликованной 4 октября 2021 года открытой базе данных Международного энергетического агентства (МЭА; англ. International Energy Agency, IEA), которая включает 1327 проектов по производству водорода и продуктов

на его основе. МЭА – международная организация, основанная для решения энергетических проблем, которая с момента создания занимается сбором и анализом официальной энергетической статистики из более чем 100 стран мира. МЭА была и остается наиболее влиятельной энергетической организацией, представляющей самые полные объемы аналитической информации и выпускающей признанные наиболее авторитетными отчеты по энергетической статистике [8].

Исследуемая в статье база данных МЭА, несмотря на полноту, не содержит все необходимые для проведения анализа данные по каждому из 1327 проектов [9]. По этой причине для достоверности и объективности проводимого исследования были приняты следующие условия:

- проекты без указанной страны происхождения и сроков реализации исключены из классификации по статусу реализации и географической локализации, но учтены в общем анализе, если известны их основные характеристики (электрическая мощность, нормализованная производительность, объем улавливаемого CO₂);
- проекты, основанные на применении электролизных технологий, по которым отсутствуют данные об электрической мощности и (или) нормализованной производительности, исключаются из анализа;
- проекты, основанные на применении альтернативных технологий, по которым отсутствуют данные об объеме улавливаемого CO₂, исключаются из анализа.

С учетом вышеизложенных условий была проведена обработка представленной в базе данных МЭА информации, в результате которой для анализа были отобраны 768 (57,8 %) проектов, реализуемых в 62 странах мира в 1975–2050 годах. Таким образом, 559 (42,2 %) проектов из-за отсутствия необходимых данных были исключены из дальнейшего анализа на данном этапе исследований.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЕКТОВ

Данный раздел содержит основные характеристики представленных в базе МЭА проектов. Проекты были разделены на группы электролизных (722 проекта) и альтернативных технологий (46 проектов).

Для выявления сложившихся трендов в области реализации водородных проектов предлагается использовать два классификационных подхода.

Первый подход предполагает следующие правила классификации периодов реализации проектов.

- Завершенными предлагается считать проекты, период реализации которых закончился не позднее 2021 года включительно.
- Действующими предлагается считать проекты, начало периода реализации которых указано в базе МЭА, а окончание этого периода не установлено.
- Планируемыми предлагается считать проекты, период реализации которых начинается не ранее 2022 года.
- К группе с неизвестным периодом реализации относятся проекты, данные о временных рамках реализации которых отсутствуют.

Второй подход основан на классификации проектов согласно следующим указанным в базе МЭА стадиям их реализации:

- Concept – стадия представления инновационной идеи проекта, направленная на улучшение характеристик технологий.
- Decommissioned – стадия вывода проекта из эксплуатации.
- Demo – стадия демонстрации возможностей используемой в проекте технологии.
- Feasibility study – стадия анализа экономической целесообразности и исследования возможностей проекта.
- FID (Final investment decision) – стадия принятия окончательного инвестиционного решения.
- Operational – рабочая стадия проекта.
- Other/Unknown – неизвестная стадия реализации проекта.
- Under construction – стадия технологической разработки.

В табл. 1 содержатся данные об электрической мощности и нормализованной производительности проектов в зависимости от периодов реализации. В табл. 2 представлены подробные данные об электрической мощности и нормализованной производительности проектов в зависимости от стадии их реализации.

Проведенный анализ периодов реализации проектов показывает, что в настоящий момент завершено 66 проектов, 235 проектов реализуется в настоящее время, 337 проектов запланировано к реализации в ближайшее десятилетие и для 130 проектов информация о сроках реализации отсутствует (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики проектов в зависимости от периодов реализации

Main characteristics of projects depending on the implementation periods

Характеристика	Завершенные (до 2021 года)	Действующие	Планируемые (2022–2050)	Сроки неизвестны	Всего
Электролизные технологии					
Количество проектов	65	221	311	125	722
Общая установленная электрическая мощность, МВт	277,20	389,46	168 854,03	128 571,33	298 092
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. нм ³ H ₂ /ч	60,08	83,30	37 256,05	28 514,86	65 914,29
Средняя установленная электрическая мощность, МВт/проект	4,26	1,76	542,94	1028,57	412,87
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. нм ³ H ₂ /ч/проект	0,92	0,38	119,79	228,12	91,29

Окончание табл. 1

End of Tab. 1

Характеристика	Завершенные (до 2021 года)	Действующие	Планируемые (2022–2050)	Сроки неизвестны	Всего
Альтернативные технологии					
Количество проектов	1	14	26	5	46
Общий уловленный объем CO ₂ , млн т	0,10	10,45	60,45	13,77	84,77
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. нм ³ H ₂ /ч	12,54	939,93	6770,17	1697,48	9420,12
Средний уловленный объем CO ₂ , млн т/проект	0,10	0,75	2,33	2,75	1,84
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. нм ³ H ₂ /ч/проект	12,54	67,14	260,39	339,50	204,79
Все проекты					
Количество проектов	66	235	337	130	768
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. нм ³ H ₂ /ч	72,62	1023,24	44 026,22	30 212,34	75 334,42
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. нм ³ H ₂ /ч/проект	1,10	4,35	130,64	232,40	98,09

В группе проектов, основанных на электролизных технологиях (см. табл. 1), наблюдается типичная ситуация, когда по суммарной электрической мощности завершенные проекты уступают действующим проектам, однако по средней электрической мощности завершенные проекты (4,26 МВт/проект) превосходят действующие проекты более чем в 2 раза (1,76 МВт/проект). Средняя производственная мощность (0,92 тыс. нм³ H₂/ч/проект) действующих проектов больше, чем средняя мощность завершенных проектов (0,38 тыс. нм³ H₂/ч/проект). Данную ситуацию можно объяснить тем, что 96,7 % завершенных электролизных проектов являлись демонстрационными (табл. 3). Однако в группе альтернативных технологий наблюдается типичная для современного технологического прогресса ситуация: завершенные проекты по всем показателям уступают действующим проектам.

В группе электролизных технологий по средней электрической мощности (4,26 МВт/проект) и средней производственной мощности

(0,92 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$) завершённые проекты уступают планируемым проектам: 542,94 МВт/проект и 119,79 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{час/проект}$ соответственно (см. табл. 1). Аналогичная ситуация наблюдается для проектов, использующих альтернативные технологии: средний объем уловленного CO_2 (0,1 млн т/проект) и средняя производственная мощность (12,54 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$) завершённых водородных проектов гораздо меньше, чем соответствующие показатели планируемых проектов: 2,33 млн т /проект и 260,39 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$ соответственно.

В группе действующих неэлектролизных проектов средний объем уловленного CO_2 и средняя производительность превосходят показатели завершённых проектов на 650 % и 435,4 % соответственно.

Проекты с неизвестными сроками реализации характеризуются достаточно высокими значениями общей и средней мощности проектов (см. табл. 1), поэтому можно предположить, что они относятся к перспективным планируемым проектам.

Анализируя стадии реализации представленных в базе данных МЭА проектов (табл. 2), можно выявить следующие закономерности.

Действующие проекты (Operational) со средней электрической мощностью (1,26 МВт/проект) и средней производственной мощностью (0,26 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$) существенно превосходят демонстрационные проекты (Demo) (0,31 МВт/проект) и (0,06 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$), но заметно уступают проектам, находящимся в процессе разработки (Under construction) (5,4 МВт/проект) и (1,13 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$). Закономерно, что действующие проекты (Operational) сильно уступают проектам, находящимся в стадии окончательного инвестиционного решения (FID) (44,02 МВт/проект) и (9,38 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$).

Подобная ситуация имеет место и в группе проектов с альтернативными технологиями, при этом они не отличаются таким стремительным ростом средней мощности, как электролизные проекты. По среднему уловленному объёму CO_2 (0,73 млн т/проект) и средней производственной мощности (64,41 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$) реализуемые в настоящее время проекты (Operational) превосходят демонстрационные проекты: 0,1 млн т/проект и 12,54 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$ соответственно. Однако, сравнивая реализуемые в настоящее время проекты (Operational) с проектами, находящимися в процессе технологической разработки (Under construction), необходимо отметить отсутствие существенных отличий в средней производительности проектов по среднему объёму улавливаемого CO_2 (0,92 млн т/проект) и средней производственной мощности (55,06 тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч/проект}$). Проекты, находящиеся в статусе анализа экономической целесообразности и исследования возможностей проекта (Feasibility study), и концептуальные проекты (Concept) показывают существенный рост средней производительности по сравнению с действующими проектами. В целом проекты на основе электролизных технологий демонстрируют больший рост средней производительности по сравнению с альтернативными технологиями. Это можно объяснить тем, что электролизным проектам уделяется значительно большее внимание в западных странах благодаря их экологической безопасности [5, 10].

Таблица 2

Table 2

Характеристики проектов по стадиям их реализации
Characteristics of projects by stages of their implementation

Характеристики	Concept	Decom- misio- ned	Demo	Feasibi- lity study	FID	Opera- tional	Under con- struc- tion	Other/ Un- known	Всего
Электролизные технологии									
Количество проектов	82	2	122	219	73	167	56	1	722
Общая установленная электрическая мощность, МВт	232 539,9	265	37,5	61 518,02	3213,8	213,99	302,3	1,5	298 092,02
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}$	51 616,25	57,61	7,85	13 440,98	684,40	43,35	63,53	0,33	65 914,3
Средняя установленная электрическая мощность, МВт/проект	2835,85	132,50	0,31	280,90	44,02	1,28	5,40	1,50	412,87
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$	629,47	28,80	0,06	61,37	9,38	0,26	1,13	0,33	91,29
Альтернативные технологии									
Количество проектов	4	–	1	23	–	15	3	–	46
Общий уловленный объем CO_2 , млн т	6,50	–	0,10	64,52	–	10,89	2,76	–	84,8
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}$	814,95	–	12,54	7461,32	–	966,15	165,17	–	9 420,1
Средний уловленный объем CO_2 , млн т/проект	1,63	–	0,10	2,81	–	0,73	0,92	–	1,84
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$	203,74	–	12,54	324,41	–	64,41	55,06	–	204,79
Все проекты									
Количество проектов	86	2	123	242	73	182	59	1	768
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}$	52 431,19	57,61	20,39	20 902,30	684,40	1009,50	228,70	0,33	75 334,4
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$	609,67	28,80	0,17	86,37	9,38	5,55	3,88	0,33	98,09

Соотнесение средней расчетной нормализованной производительности водородных проектов со стадиями и сроками их реализации представлено в табл. 3–6, где суммарные показатели производительности по всем проектам представлены как средневзвешенные значения.

В проектах, находящихся на стадии Demo, альтернативные технологии не применяются независимо от сроков их реализации, следовательно, либо перспективные разработки новых альтернативных технологий производства водорода не ведутся в анализируемых странах, либо информация об этих технологиях отсутствует в открытых источниках.

Замечен существенный рост средней расчетной нормализованной производительности всех планируемых проектов по сравнению с действующими и завершенными проектами. Кроме того, необходимо отметить высокую среднюю нормализованную производительность проектов с неизвестными сроками реализации.

Средняя расчетная нормализованная производительность проектов с альтернативными технологиями заметно выше аналогичного показателя электролизных проектов. Однако разрыв между данными показателями заметно сокращается в группе планируемых проектов, находящихся на стадиях Concept и Feasibility study, что свидетельствует о стремительном развитии перспективных электролизных проектов.

Таблица 3

Table 3

**Средняя расчетная производительность завершенных проектов,
тыс. $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$**

Average estimated productivity of completed projects, thousand $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{hour}/\text{project}$

Статус Технологии	Concept	De-commissioned	Demo	Feasibility study	FID	Operational	Under construction	Other/Unknown	Все проекты
Электролизные	–	28,80	0,04	–	–	–	–	–	0,92
Альтернативные	–	–	12,54	–	–	–	–	–	12,54
Все проекты	–	28,80	0,23	–	–	–	–	–	1,10

Таблица 4

Table 4

**Средняя расчетная производительность действующих проектов,
тыс. $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$**

Average estimated productivity of existing projects, thousand $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{hour}/\text{project}$

Статус Технологии	Concept	De-commissioned	Demo	Feasibility study	FID	Operational	Under construction	Other/Unknown	Все проекты
Электролизные	–	–	0,05	–	3,76	0,26	–	–	0,38
Альтернативные	–	–	–	–	–	67,14	–	–	67,14
Все проекты	–	–	0,05	–	3,76	5,49	–	–	4,35

Таблица 5

Table 5

Средняя расчетная нормализованная производительность планируемых проектов, тыс. $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$

Average calculated normalized productivity of planned projects, thousand $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{hour}/\text{project}$

Статус Технологии	Con- cept	Decom- missioned	Demo	Feasibi- lity study	FID	Opera- tional	Under con- struction	Other/ Un- known	Все проекты
Электролизные	652,29	–	0,16	70,99	11,43	–	1,15	–	119,79
Альтернативные	203,74	–	–	304,74	–	–	55,06	–	260,39
Все проекты	610,57	–	0,16	96,23	11,43	–	3,94	–	130,64

Таблица 6

Table 6

Средняя расчетная нормализованная производительность проектов с неизвестными сроками реализации, тыс. $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{ч}/\text{проект}$

Average estimated normalized productivity of projects with unknown implementation dates, thousand $\text{nm}^3 \text{H}_2/\text{hour}/\text{project}$

Статус Технологии	Con- cept	Decom- missioned	Demo	Feasibi- lity study	FID	Opera- tional	Under construc- tion	Other/ Un- known	Все проекты
Электролизные	608,76	–	0,30	37,01	4,09	0,05	0,13	0,33	228,12
Альтернативные	–	–	–	417,82	–	26,21	–	–	339,50
Все проекты	608,76	–	0,30	60,09	4,09	8,77	0,13	–	232,40

3. АНАЛИЗ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ

Для проведения анализа географического расположения все заявленные страны происхождения проектов были разделены на 4 региона: Европа, Азия, Америка и Океания совместно с Африкой. На рис. 1–4 представлены общие характеристики электролизных проектов для стран в рассматриваемых регионах.

Анализ европейских водородных проектов показал (рис. 1), что Германия лидирует по количеству реализуемых проектов в регионе и мире (116 проектов) с общей электрической мощностью 15,602 ГВт, что составляет 6,99 % от общей мощности всех анализируемых проектов в мире и 25,18 % от общей мощности в Европе. Нидерландам удалось превзойти Германию по общей электрической мощности на 20,1 % и по показателю расчетной нормализованной производительности – на 115,6 %, тем самым она обеспечила себе абсолютное лидерство по этим показателям в регионе.

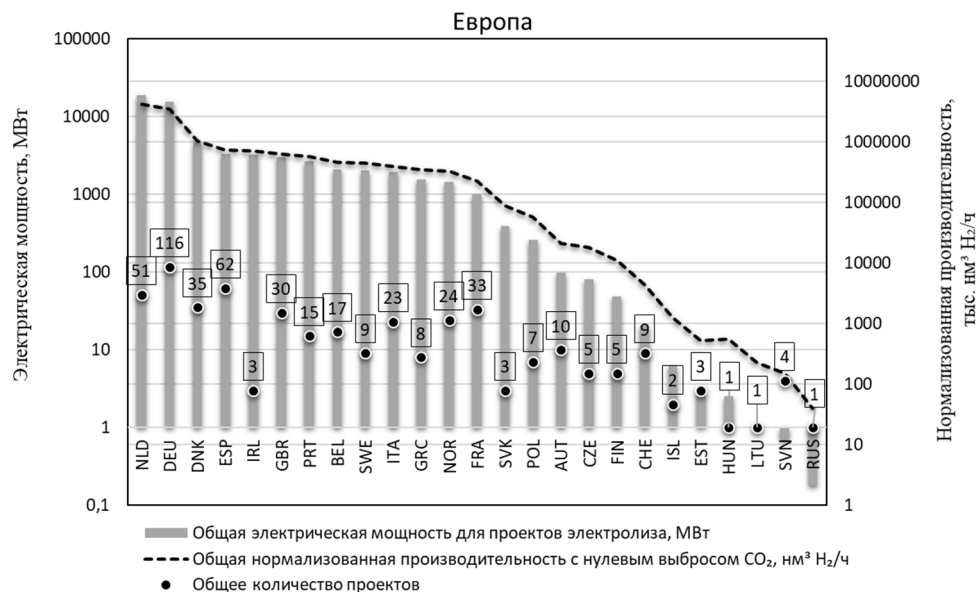


Рис. 1. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Европы

Fig. 1. Total capacity and number of electrolysis projects in European countries

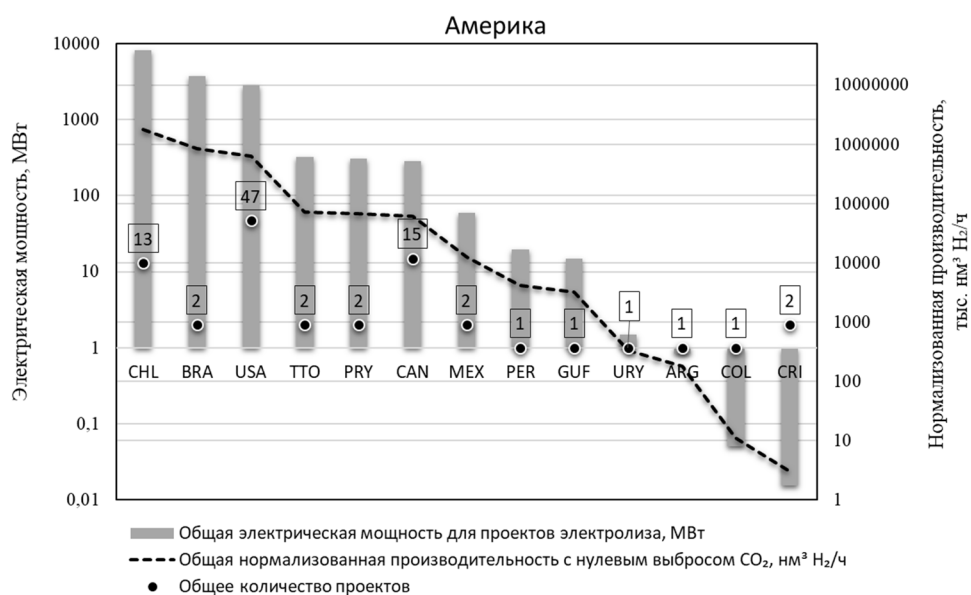


Рис. 2. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Америки

Fig. 2. Total capacity and number of electrolysis projects in the Americas

Россия, несмотря на принятые меры по развитию водородной энергетики [11], не демонстрирует существенно высокого уровня реализуемых проектов. Единственный представленный в базе проект «Kola Nuclear Power Plant» относится к электролизным технологиям, имеет сроки реализации 2020–2022 гг.

со статусом рабочего состояния Демо, его электрическая мощность составляет 0,18 МВт, а общая нормализованная производительность – 40 нм³ Н₂/ч [9].

Благодаря амбициозным водородным стратегиям Европейского союза и Великобритании Европа лидирует по разворачиванию мощностей электролизных проектов, на нее приходится более 40 % мировой установленной мощности, и в ближайшей перспективе она останется крупнейшим потенциальным рынком водорода [10, 12].

В Америке по количеству реализуемых электролизных проектов лидирует США (рис. 2), в которых реализуются 47 проектов общей мощностью 2,869 ГВт, что составляет 0,96 % общей мощности всех мировых проектов. По данному показателю ближайший конкурент США – Канада, в которой разрабатывается 15 электролизных проектов. Среди стран этого региона мощности всех проектов США составляют 18,18 %, однако по данному показателю США заметно уступают Чили, где реализуется 13 проектов мощностью 51,54 % от всех проектов Америки. По общей нормализованной производительности в данном регионе также лидирует Чили, в которой данный показатель (1,8 млн нм³ Н₂/ч) более чем в 2 раза превосходит показатель ближайшего конкурента – Бразилии (0,836 млн нм³ Н₂/ч). По величине средней мощности в группе электролизных технологий лидирует Бразилия (1,882 ГВт/проект), далее следуют Чили (0,624 ГВт/проект) и США (0,061 ГВт/проект). США на данный момент не являются лидером по общей и средней мощности электролизных проектов. Однако ранее (с 2000 г.) в США было запущено более 16 демонстрационных маломощных проектов, в то время как лидирующие по общей и средней мощности проектов Чили и Бразилия имеют множество незапущенных перспективных и концептуальных проектов.

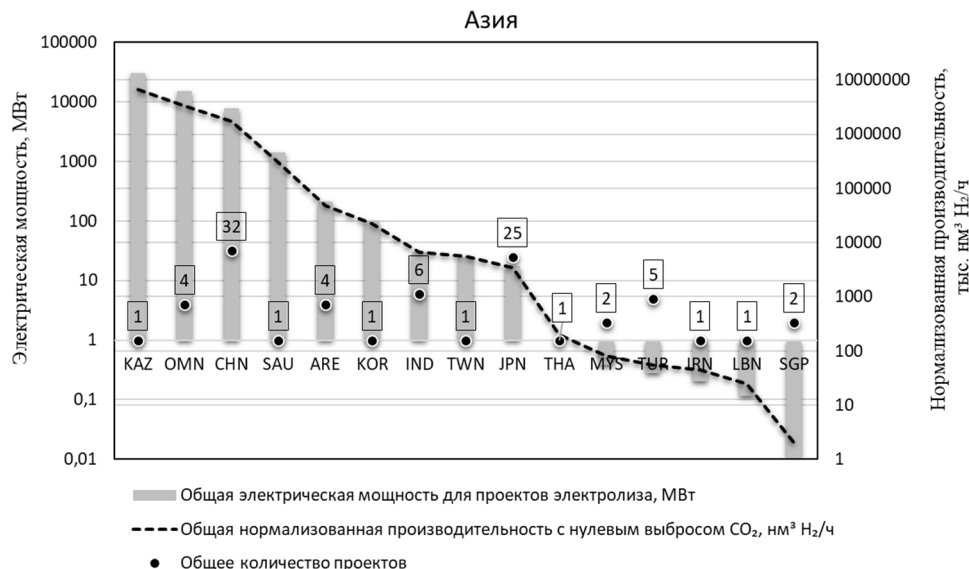


Рис. 3. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Азии

Fig. 3. Total capacity and number of electrolysis projects in Asian countries

В Азии по общему количеству проектов лидирует Китай (см. рис. 3), развивающий 32 проекта мощностью 7,76 ГВт, что составляет 14,17 % от общей мощности проектов в регионе. Ближайший конкурент Китая по количеству проектов – Япония (25 проектов) с общей электрической мощностью 17,18 МВт, что составляет лишь 0,031 % от общей мощности реализуемых в регионе проектов. Необходимо отметить высокую мощность единственного азиатского проекта, реализуемого в Казахстане, – Kazakhstan green hydrogen project (30 ГВт), поскольку на данный момент это наиболее мощный в мире электролизный проект, находящийся в стадии Concept [9].

Казахстан и Оман, занимающие в регионе лидирующие позиции по общей электрической мощности и нормализованной производительности, имеют проекты, находящиеся только на стадии Concept. Китай, занимающий 3-е место, реализует свои проекты в настоящее время, поэтому именно Китай можно считать лидером в Азии. Следует также отметить интенсивное развитие водородных проектов в странах Азиатского региона, на данный момент в этом регионе реализуются проекты, имеющие 24,54 % общемировой мощности.



Рис. 4. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Океании и Африки

Fig. 4. Total capacity and number of electrolysis projects in Oceania and Africa

Страны Океании и Африки анализируются совместно из-за малого количества стран, разрабатывающих водородные проекты (рис. 4). Электролизные проекты Австралии занимают лидирующую позицию по всем показателям в регионе: количество электролизных проектов – 51; их общая установленная электрическая мощность – 59,49 ГВт, что составляет 65,76 % от мощности проектов в данном регионе и 18,28 % от общей мощности всех мировых проектов. Ближайший по данному показателю конкурент в регионе, Мавритания,

обеспечивает 30 ГВт общей электролизной мощности, однако представленный проект (Aman – Green Hydrogen Project) находится на стадии реализации Concept без указанных сроков реализации. Австралия имеет как перспективные, так и уже реализованные проекты [9]. Помимо этого, водородные проекты в Австралии обеспечивают самую высокую общую расчетную нормированную производственную мощность 13,06 млн $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}$, это составляет 26,5 % от общей мощности всех анализируемых проектов.

Необходимо отметить, что наибольшей средней мощностью в группе завершенных проектов (Decommissioned, табл. 1) обладают 2 проекта в Африке: проект «KIMA – Aswan electrolyser» мощностью 165 МВт в Египте и проект «Zimbabwe NH3 plant» мощностью 100 МВт в Зимбабве. Эти две страны ввели в эксплуатацию свои проекты в 1975 и 2000 годах соответственно, однако данные о других характеристиках и итогах реализации проектов отсутствуют [9].

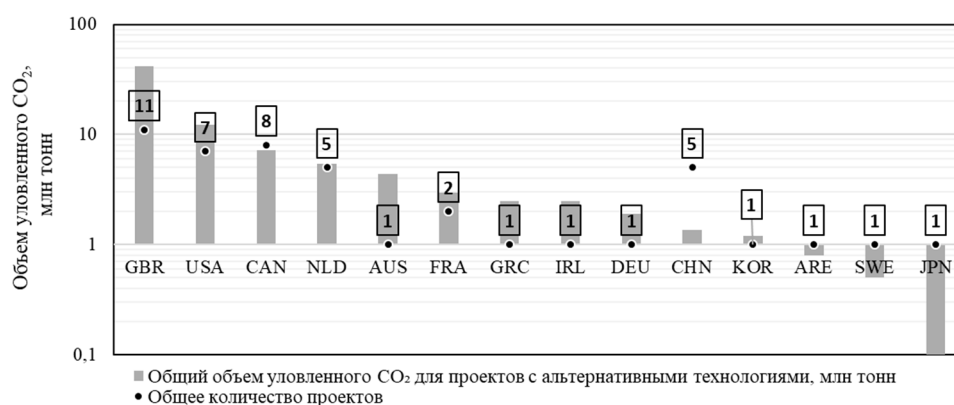


Рис. 5. Общий объем уловленного CO₂ и количество проектов с альтернативными технологиями

Fig. 5. The total amount of CO₂ captured and the number of projects with alternative technologies

В группе альтернативных технологий (рис. 5) водородные проекты Великобритании лидируют по величине общего объема улавливаемого CO₂. В Стране разрабатывается 11 проектов с 41,73 млн т уловленного CO₂, что составляет 49,23 % от мощности всех анализируемых проектов. По среднему объему уловленного CO₂ Великобритания также остаётся лидером (3,794 млн т/проект), ближайший конкурент – США – заметно уступает (1,75 млн т/проект).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что в настоящее время водородные технологии развиваются в стремительном темпе. Разрабатывается множество перспективных водородных проектов, для качественной оценки тенденций развития которых необходимо совместно учитывать как временные рамки, так и стадии реализации разрабатываемых проектов.

Спрос на водород в 2020 г. составлял 90 млн т, большая часть этого объема использовалась в нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности. Этот водород производился в основном из ископаемого топлива, в результате чего выбросы CO_2 составили около 830 млн т [13].

Глобальная мощность электролизных проектов для производства водорода в настоящий момент (согласно последнему обновлению базы данных в октябре 2021 г.) достигла более 310 МВт. В случае успешной реализации 350 разрабатываемых в настоящее время перспективных проектов суммарная мощность электролизных проектов может достичь 65 ГВт в 2030 г. Кроме того, около 80 концептуальных проектов общей мощностью более 230 ГВт находятся на ранних стадиях разработки. Если все эти перспективные проекты будут реализованы, суммарные объемы производства водорода с учетом электролизных проектов могут достичь более 50 млн тонн уже к 2030 году.

Европа лидирует по объему общей мощности электролизных проектов, на нее приходится около 40 % мировой установленной мощности, поэтому в ближайшей перспективе она останется крупнейшим рынком водорода благодаря совместным амбициозным стратегиям развития водородной энергетики в Европейском союзе и Великобритании. Водородные планы Австралии нацелены на то, чтобы догнать Европу в течение нескольких лет. Многие страны уже заинтересованы в развертывании водородных проектов, имеющих большие мощности и ориентированных на экспорт. Китай медленно запускает свои проекты, однако, несмотря на это, количество разрабатываемых проектов стремительно растет.

Применение водорода является ключевым условием обезуглероживания промышленности, несмотря на то что большинство технологий его производства, которые могут выйти на промышленный уровень, всё еще находятся в ранней стадии разработки. Однако можно сказать, что в настоящее время наблюдаются серьезные успехи на пути декарбонизации экономики [14].

Ключевым барьером для массового применения «зеленого» водорода является его высокая стоимость по сравнению с водородом, полученным на основе ископаемого топлива. В настоящее время производство водорода из ископаемого топлива остается наиболее дешевым вариантом в большей части мира [15]. Несмотря на ускоренные темпы внедрения водорода в качестве «зеленого» топлива, всё еще не могут быть выполнены требования, необходимые для снижения объема выбросов CO_2 к 2050 г. Благодаря множеству развиваемых перспективных проектов и разрабатываемых современных технологий имеются все возможности для того, чтобы низкоуглеродный водород стал конкурентоспособным энергетическим и сырьевым ресурсом в течение следующего десятилетия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия низкоуглеродного развития России: возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии / АНО «Центр экологических инноваций». – М.: ТЕИС, 2016. – 47 с.

2. Веселов Ф., Соляник А., Урванцева Л. Низкоуглеродная перестройка электроэнергетики России до 2035 года: потенциал снижения эмиссии CO₂ и его «цена» для потребителя // Энергетическая политика. – 2021. – № 11. – С. 30–33.
3. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 р.
4. Водородная лихорадка: аналитический обзор / Национальное рейтинговое агентство. – М., 2022, февраль. – URL: https://www.ra-national.ru/sites/default/files/analytic_article/Hydrogen_0.pdf (дата обращения: 05.12.2022).
5. Соловьев Д.А. Направления развития водородных энергетических технологий // Энергетическая политика. – 2020. – № 3 (145). – С. 64–71.
6. Westphal K., Zabanova Y. Russland im globalen Wasserstoff-Wettlauf: Überlegungen zur deutsch-russischen Wasserstoffkooperation. – Berlin: SWP-Aktuell, 2021. – 8 p.
7. Белов В.Б. Европейский альянс чистого водорода // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. – 2020. – № 5 (17). – С. 52–59.
8. Анализ политики энергоэффективности в Международном энергетическом агентстве (МЭА) / Международное энергетическое агентство. – OECD / IEA, 2008. – URL: <https://view.ckceest.cn/AllFiles/ZKBG/Pages/210/6889b26924a00315ec23def8d1bb7e0ecec6ec327.pdf> (дата обращения: 05.12.2022).
9. Hydrogen Projects Database, October 2021. – URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database> (accessed: 05.12.2022).
10. Копытин И.А., Попадьюко А.М. Водородные стратегии крупнейших европейских энергетических компаний // Современная Европа. – 2021. – № 4. – С. 83–94.
11. Якубсон К.И. Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 12. – С. 1675–1695. – DOI: 10.31857/S0044461820120014.
12. Белов В.Б. ЕС: новые стратегии обеспечения климатически нейтральной экономики // Европейский союз: факты и комментарии. – 2020. – № 101. – С. 5–10.
13. Жизнин С.З., Тимохов В.М. Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2019. – № 1–6. – С. 40–59.
14. Водород как топливо / С.В. Беляев, Г.А. Давыдков, А.А. Селиверстов, С.Н. Перский // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 21. – С. 79–82.
15. Водород – энергоноситель и реагент. Технологии его получения / Н.Л. Солодова, Е.И. Черкасова, И.И. Салахов, В.П. Тутубалина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 11–12. – С. 39–50.

Казаринов Артем Витальевич, младший научный сотрудник кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета. Основное направление исследований – системный анализ, управление и обработка информации. E-mail: artemrus987@gmail.com.

Деревянов Максим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», руководитель регионального учебно-научного центра энергетической эффективности Самарского государственного технического университета. Основное направление исследований – системный анализ, управление, обработка информации и автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: mder2007@mail.ru.

Плешивцева Юлия Эдгаровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета. Основное направление исследований – системный анализ, управление, обработка информации и автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 300 печатных работ. E-mail: yulia_pl@mail.ru.

Kazarinov Artem V., a junior researcher at the Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Socio-technical complexes in Samara State Technical University. Currently, his research interests are focused on system analysis, management and information processing. E-mail: artemrus987@gmail.com

Derevyanov Maksim Y., PhD (Eng.), Associate Professor at the Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes, Head of the Regional Educational and Scientific Center for Energy Efficiency, Samara State Technical University. The main direction of his scientific research is system analysis, management, information processing and automation of technological processes and productions. He has more than 60 publications. E-mail: mder2007@mail.ru.

Pleshivtseva Yuliya E., Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Socio-technical Complexes, Samara State Technical University. Her research interests are currently focused on system analysis, management, information processing and automation of technological processes and productions. She has more than 300 publications. E-mail: yulia_pl@mail.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48

Classification and localization analysis of hydrogen production projects*

A.V. KAZARINOV^a, M.YU. DEREVYANOV^b, YU.E. PLESHIVTSEVA^c

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya Street, Samara, ^a443100, Russian Federation

^a artemrus987@gmail.com ^b mder2007@mail.ru ^c yulia_pl@mail.ru

Abstract

The analysis of hydrogen projects is based on the information presented in the open database of the International Energy Agency (IEA) which contains 1327 projects for the production of hydrogen and products based on it, implemented in more than 100 countries around the world. It is proposed to use two classification approaches to identify the current trends in the development of hydrogen projects. The first approach is based on the project classification according to their implementation period, and the second one uses the classification of project implementation stages proposed in the IEA database. The complex application of the described approaches makes it possible to carry out a systematic analysis of the data presented in the IEA database. Projects using electrolysis technologies for hydrogen production are considered separately from projects using alternative technologies. The geographical localization of projects was analyzed following the place of their implementation in one of the four regions of the world: Europe, Asia, America, and Oceania with Africa. The distribution of project capacities by country is presented for all regions. It has been established that the global capacity of electrolysis projects for hydrogen production has reached 310 MW, and, with the successful implementation of 350 promising projects currently being developed, their total capacity can reach 65 GW by 2030. In addition, about 80 concept projects with a total capacity of more than 230 GW are in the early stages of development. If all these promising projects are implemented, the total volume of hydrogen production, taking into account electrolysis projects, can reach more than 50 million tons by 2030, which will contribute to the achievement of global decarbonization goals. The results of the analysis allow us to conclude that currently, projects for hydrogen production and products based on it are rapidly developing in the world, mainly due to the ambitious hydrogen strategies of the countries of the European Union and the UK.

Keywords: IEA, classification, analysis, database, regions of the world, hydrogen, hydrogen technologies

* Received 28 September 2022.

REFERENCES

1. *Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya Rossii: vozmozhnosti i vygody zameshcheniya iskopaemogo topliva «zelenymi» istochnikami energii* [Low-carbon development strategy of Russia: Opportunities and benefits of replacing fossil fuels with "green" energy sources]. Autonomous non-profit organization Center for Environmental Innovation. Moscow, TEIS Publ., 2016. 47 p.
2. Veselov F., Solyanik A., Urvantseva L. Nizkouglerodnaya perestroika elektroenergetiki Rossii do 2035 goda: potentsial snizheniya emissii SO₂ i ego «tsena» dlya potrebitelya [Low-carbon transition of the russian power industry until 2035: potential of emission reduction and its "cost" for consumers]. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2021, no. 11, pp. 30–33.
3. Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tyul'pa V.V. *Vodorod v energetike* [Hydrogen in the energy industry]. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2014. 229 p.
4. National Rating Agency. *Vodorodnaya likhoradka* [Hydrogen fever]. Moscow, February 2022. Available at: https://www.ranational.ru/sites/default/files/analitic_article/Hydrogen_0.pdf (accessed 05.12.2022).
5. Solov'ev D.A. Napravleniya razvitiya vodorodnykh energeticheskikh tekhnologii [Directions for the development of hydrogen energy technologies]. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2020, no. 3 (145), pp. 64–71.
6. Westphal K., Zabanova Y. *Russland im globalen Wasserstoff-Wettlauf: Überlegungen zur deutsch-russischen Wasserstoffkooperation*. Berlin, SWP-Aktuell, 2021. 8 p.
7. Belov V.B. Evropeiskii al'yans chistogo vodoroda [The European clean hydrogen alliance]. *Nauchno-analiticheskii vestnik Instituta Evropy RAN = Scientific and Analytical Herald of the Institute of Europe RAS*, 2020, no. 5 (17), pp. 52–59.
8. *Analiz politiki energoeffektivnosti v Mezhdunarodnom energeticheskom agentstve (MEA)* [Analysis of energy efficiency policy at the International Energy Agency (IEA)]. OECD / IEA, 2008. (In Russian). Available at: <https://view.ckcest.cn/AllFiles/ZKBG/Pages/210/6889b26924a00315ec23def8d1bb7e0eec6ec327.pdf> (accessed 05.12.2022).
9. Hydrogen Projects Database, October 2021. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database> (accessed 05.12.2022).
10. Kopytin I.A., Popad'ko A.M. Vodorodnye strategii krupneishikh evropeiskikh energeticheskikh kompanii [Hydrogen strategies of the largest European energy companies]. *Sovremennaya Evropa = Contemporary Europe*, 2021, no. 4, pp. 83–94.
11. Yakubson K.I. Perspektivy proizvodstva i ispol'zovaniya vodoroda kak odno iz napravlenii razvitiya nizkouglerodnoi ekonomiki v Rossiiskoi Federatsii [Prospects for production and use of hydrogen as one of directions of the development of low-carbon economy in the Russian Federation]. *Zhurnal prikladnoi khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 2020, vol. 93, no. 12, pp. 1675–1695. DOI: 10.31857/S0044461820120014. (In Russian).
12. Belov V.B. ES: novye strategii obespecheniya klimaticheskoi neutral'noi ekonomiki [EU: new strategies to ensure a climate-neutral economy]. *Evropeiskii soyuz: fakty i kommentarii = The European Union: facts and comments*, 2020, no. 101, pp. 5–10.
13. Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. Ekonomicheskie aspekty razvitiya yadernogo vodorodnoi energetiki v mire i v Rossii [Economic aspects of nuclear and hydrogen energy development in the world and Russia]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya = International scientific journal for Alternative energy and ecology*, 2019, no. 1–6, pp. 40–59. (In Russian).
14. Belyaev S.V., Davydov G.A., Seliverstov A.A., Persky S.N. Vodorod kak toplivo [Hydrogen fuel]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii = New materials and technologies in mechanical engineering*, 2015, no. 21, pp. 79–82.
15. Solodova N.L., Cherkasova E.I., Salakhov I.I., Tutubalina V.P. Vodorod – energonositel' i reagent. Tekhnologii ego polucheniya [Hydrogen is an energy carrier and reagent. Technologies for its production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2017, vol. 19, no. 11–12, pp. 39–50.

Для цитирования:

Казаринов А.В., Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э. Классификация и анализ локализации проектов по производству водорода // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 31–48. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48.

For citation:

Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Klassifikatsiya i analiz lokalizatsii proektov po proizvodstvu vodoroda [Classification and localization analysis of hydrogen production projects]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 31–48. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48.