



ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА
HYDROGEN ECONOMY

Статья поступила в редакцию 16.06.20. Ред. Пер. №11-05

The article has entered in publishing office 16.06.20 Ed. Reg. No. 11-05

УДК 620.9:332.02(5-18)

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОВОДОРОДНОЙ СИСТЕМЫ
В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ**

С.П. Попов

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
664033, г.Иркутск, ул. Лермонтова 130
тлф. +7(3952) - 500- 646 доп.312, e-mail: popovsp@isem.irk.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.09.008

Заключение совета рецензентов: 23.08.20

Заключение совета экспертов: 23.08.20

Принято к публикации: 29.08.20

В статье предложен методологический подход к разработке инструментария для исследований, связанных с созданием международной электроводородной системы в Северо-восточной Азии. Введён в оборот сам термин «водородоноситель» и дано его определение. Рассмотрены ресурсные, экономические и технологические предпосылки создания единой региональной инфраструктуры для производства, транспортирования, преобразования и использования электроэнергии и «водородоносителей» в качестве энергоносителей для потребителей энергетических услуг.

Указывается на необходимость комплексного рассмотрения технологических, экономических, социальных и политических факторов при создании такой сложной технической системы, затрагивающей интересы различных акторов. При этом основой поиска баланса интересов заинтересованных акторов является оценка эффективности создания такой системы, а инструментом для такой оценки являются экономико-математические модели, описывающие создание и функционирование международной электроводородной системы в Северо-восточной Азии.

Кратко описаны результаты выполненного обзора моделей, в которых рассматриваются проблемы интеграции в системы энергоснабжения водородных технологий совместно с ВИЭ. Выделены основные типы моделей, используемых для описания таких технико-экономических систем, сделан вывод о необходимости применения двухуровневой системы моделей. Основное место в предлагаемой системе моделей должны занимать производственно-транспортные модели на верхнем (международном) уровне. На нижнем уровне (объекты по производству «зелёных» водородоносителей) требуются модели оптимального управления ресурсами для решения задач определения состава и параметров технологического оборудования.

Для поэтапной разработки такой системы моделей предлагается начать с наиболее простого сценария, когда учитываются только такие источники энергии, как солнечные и ветровые ВИЭ. На этом этапе возможно отсеивать неэффективные технологии, и определять целевые технологии и механизмы многостороннего регионального сотрудничества. Для определения баланса интересов акторов потребуются модели второго этапа, в которых наряду с традиционными ВИЭ (биомасса, ГЭС и ГАЭС) будут рассматриваться углеродная (тепловая) и атомная генерация электроэнергии, а также углеродные технологии производства водорода и водородоносителей. Заключительный, третий этап развития инструментария научного исследования и оценки взаимовыгодных вариантов построения международной электроводородной системы в Северо-восточной Азии потребует раздельного учёта «зелёной» и «углеродной» энергии для исследования механизмов сертификации и ценообразования на энергоносители.

В заключение представлена структура производственно-транспортной модели первого этапа, которая позволит оценить сравнительную эффективность применения различных электроэнергетических и водородных технологий для обеспечения потребителей стран Северо-восточной Азии «зелёными» энергоносителями.



Ключевые слова: водородные технологии, водородоносители, электроводородные системы, Северо-Восточная Азия, международное сотрудничество, экономико-математические модели, оптимизация, эффективность.

METHODOLOGICAL APPROACH TO THE STUDY OF THE ELECTRO-HYDROGEN SYSTEM IN NORTHEAST ASIA

Sergei P. Popov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk
130 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russian Federation
tel.: +7(3952) - 500- 646 ext.312, e-mail: popovsp@isem.irk.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.09.008

Referred: 23.08.20

Received in revised form: 23.08.20

Accepted: 29.08.20

The article proposes a methodological approach to the development of the tools for studying the international electro-hydrogen system creation in Northeast Asia. The term "hydrogen carrier" was introduced and its definition was given. The resource, economic and technological prerequisites for the development of the unified regional infrastructure to produce, transfer, transform and utilise both electricity and "hydrogen carriers" for consumers of energy services are considered.

The author points out the need for a comprehensive consideration of technological, economic, social and political factors when developing such a complex technical system, which affects the diverse actors' interests. In order to create mutual understanding and balance the stakeholders' interests, the tool to evaluate the efficiency of such a system is necessary. The use of mathematical models is becoming one of the most vital and widespread techniques employed for this purposes. Thereby, the article deals with the structure and the development stages of the regional electro-hydrogen model for Northeast Asia.

The review of the models that address the issues of hydrogen technologies and renewable energy integration into energy supply systems is given. The main types of the models used to describe such technical and economic systems are identified and it is concluded that the development of the two-level models system is necessary. The production and transport models at the upper (international) level should be the core of the proposed models system. At the lower level (the "green hydrogen carriers" production), the models of optimal resource management are required to determine the composition and parameters of the technological equipment.

Step-by-step development of the models system is proposed. The first stage is the simplest scenario where only solar and wind energy is considered as an energy source. At this stage, it is possible to weed out inefficient technologies and identify targeted technologies and mechanisms for multilateral regional cooperation. The second stage should balance the interests of the actors and stakeholders. Here, the traditional renewable energy (biomass, hydro and pumped storage) along with carbon (thermal) and nuclear power generation, as well as other ("carbon") hydrogen technologies will become available for consideration. The final, third stage of the research tools development, will require separate accounting of "green" and "carbon" energy to consider certification mechanisms and energy pricing when building the international hydrogen system in Northeast Asia.

In conclusion, the structure of the first stage production and transport model is described. This model will allow estimating the comparative effectiveness of different electric and hydrogen technologies to deliver green energy to the consumers in the Northeast Asian economies.

Keywords: hydrogen technologies, hydrogen carriers, electric hydrogen systems, Northeast Asia, international cooperation, economic and mathematical models, optimisation, efficiency.





Попов Сергей
Петрович
Sergei P. Popov

Сведения об авторе: к.т.н., директор Международного Исследовательского Центра «энергетическая инфраструктура в Азии», Отдел комплексных и региональных проблем энергетики, Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, г. Иркутск.

Образование: Иркутский политехнический институт, кибернетический факультет по специальности «Автоматизированные системы управления» и «Большие системы энергетики» (1982).

Область научных интересов: страны Восточной Азии, энергетические рынки Северо-Восточной Азии, формирование потребности в энергетических услугах, моделирование пространственно-распределенных региональных энергетических систем, энергетическая политика, институты многостороннего энергетического сотрудничества.

Публикации: более 70, в том числе глав и разделов в 12 коллективных монографиях

ORCID 0000-0002-9060-2317; Researcher ID J-4311-2018; Author ID Scopus 57197368997

индекс Хирша 11

Information about the author: PhD engineering, Head of the International Research Centre "Energy Infrastructure in Asia", Department of Complex and Regional Problems in Energy, Melentiev Energy Systems Institute (ESI) SB RAS, Irkutsk.

Education: Cybernetic faculty of the Irkutsk Polytechnic Institute with two specialisations: in Computer-aided Management and Large Energy Systems (1982).

Research area: East Asian countries, North-East Asian energy markets, formation of the energy services demand, modeling of spatially distributed regional energy systems, energy policy, and multilateral energy cooperation institutions.

Publications: more than 70 publications including chapters and sections in 12 collective monographs. ORCID 0000-0002-9060-2317

Researcher ID J-4311-2018

Author ID Scopus 57197368997

Hirsch index 11

Введение

Промышленно развитые страны Восточной Азии¹ – Китай, Япония, и Республика Корея, являются одними из наиболее перспективных импортёров «зелёных» энергоносителей в мире. Вместе с тем, в силу природно-географических, исторических, политических причин в регионе СВА практически отсутствует межгосударственная инфраструктура, обеспечивающая торговлю электроэнергией. Учитывая большой потенциал развития водородных технологий в мире, и в странах ВА, в частности, имеются основания ожидать создания регионального рынка энергоносителей, обеспечивающих страны-импортёры энергии экологически «чистыми» энергоресурсами на основе энергии ВИЭ. Россия и Монголия обладают значительным потенциалом возобновляемых энергоресурсов, и могут воспользоваться преимуществами существования в едином регионе с крупнейшими импортёрами энергии для создания региональной инфраструктуры торговли электроэнергией и «зелёным» водородом на основе баланса интересов всех акторов. Текущее соотношение стоимости энергии и технико-экономические показатели технологий указывают на экономическую неэффективность водородных систем накопления энергии, используемых для регулирования генерации ВИЭ [1]. Вместе с тем необходимо учитывать перспективу изменения через несколько десятилетий показателей технологий и цен на энергоносители, которые окажут влияние на конкуренцию технологий, конъюнктуру энергетических рынков, требования по обеспечению свойств

экологичности, экономической эффективности и энергетической безопасности, которые формулируют различные акторы. Для обеспечения исследований перспективных направлений совместного развития пространственно-распределённых электроэнергетических и водородных систем в регионе СВА необходим научный инструментарий. Его назначение – оценка возможных направлений сотрудничества стран СВА в создании и развитии технологической инфраструктуры, обеспечивающей функционирование рынка «зелёных» энергоносителей на перспективу в 30 и более лет. Основная задача - исследование условий, ограничений, критериев и механизмов для создания экономически эффективных взаимодействующих систем производства, транспортировки электроэнергии и водородсодержащих энергоносителей. Очевидно, что при этом должна рассматриваться совокупность технических, экономических, социальных и политических аспектов, характеризующих пока виртуальный объект, описываемый математической моделью. Адекватность такой модели должна соответствовать требованиям решаемых задач и сценариям предполагаемого будущего. Модель объекта составляет ядро научного инструментария исследований регионального рынка «зелёных» энергоносителей, а данная статья посвящена содержанию и последовательности его создания.

Название инструментария соответствует определению объекта исследований - международной электроводородной системы в регионе СВА, сокращённо – ЭЛВИС (*ЭлектроВодородная Инфраструктура Северо-Восточной Азии*).



| | |
|--------------------|---------------------------------|
| Список обозначений | |
| Единицы измерения | |
| ТВт·ч | Тераватт-час |
| Аббревиатуры | |
| ВА | Восточная Азия |
| ВИЭ | Возобновляемые энергоисточники |
| Р.Корея | Республика Корея |
| СВА | Северо-восточная Азия |
| ЭЛВИС | международная электроводородная |

| | |
|------------|--|
| | система в регионе СВА |
| CCUS | системы улавливания, захоронения и использования углерода |
| ЛОHC (ЖОВ) | Liquid organic hydrogen carrier (жидкие органические водородоносители) |
| PtX | технологии трансформация электроэнергии в топливо, (power to e-fuels) |

1. Предпосылки создания международной электроводородной инфраструктуры в регионе северо-восточной Азии

Страны Восточной Азии играют значительную роль в мировом промышленном производстве, в том числе легковых автомобилей и морских судов, а следовательно, имеют благоприятные возможности для участия в глобальном процессе электрификации

транспорта. Они занимают лидирующие места в производстве энергоёмкой продукции, в то же время являются крупнейшими импортёрами энергоресурсов. Зависимость от импорта угля, нефти и газа составляет 85-95 процентов потребляемой первичной энергии для Японии, Р.Корея и китайской провинции Тайвань (рисунок 1). Китай неуклонно увеличивает свою зависимость от импорта ископаемых топлив с 1997г.

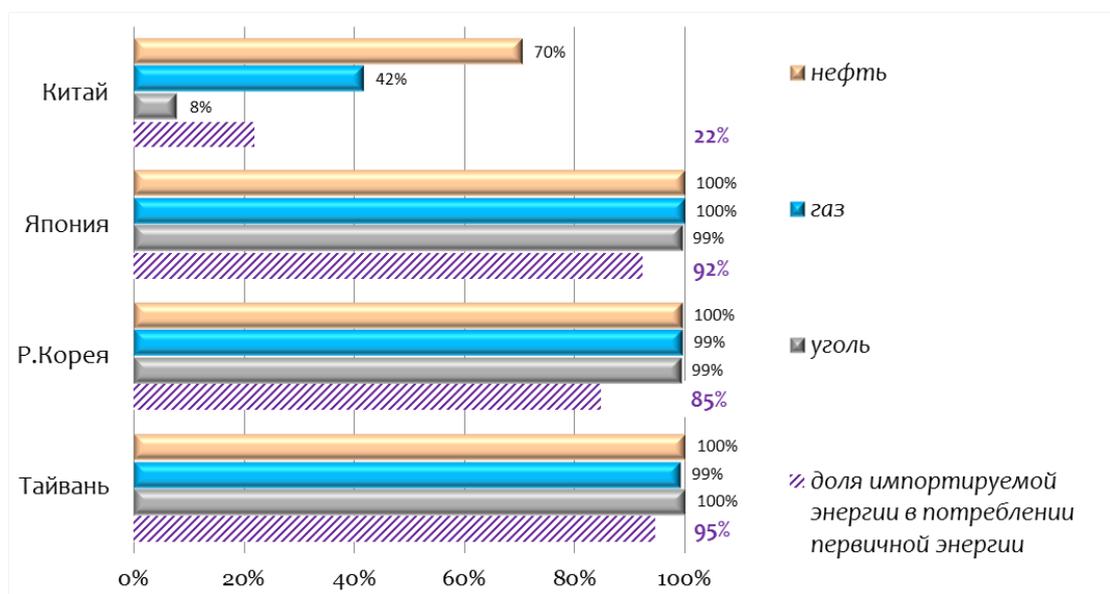


Рис. 1. Зависимость крупных стран Восточной Азии от импорта первичной энергии в 2019г.
Fig. 1. Primary energy imports dependence of major East Asian economies in 2019

Кроме экономических и политических проблем, связанных с обеспечением энергетической безопасности, возникают проблемы социальные, вследствие высокого уровня загрязнения природной среды («серое небо» в Китае). Более того, мировая энергетическая парадигма* одним из высших приоритетов рассматривает снижение эмиссии парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением по борьбе с изменением климата†.

Для крупных стран Восточной Азии складываются благоприятные условия, способствующие снижению зависимости от «углеродных» видов энергии – угля и углеводородов, более широкому вовлечению в

энергетический баланс возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – так называемых «зелёных» энергоресурсов. Заметим, что в данной дихотомии вопросы принадлежности атомной энергии не рассматриваются, и она условно относится к «углеродной» энергии. В течение переходного периода будет происходить вытеснение угля и углеводородов из систем конечного потребления энергии и систем преобразования энергоносителей, а также из импорта стран Восточной Азии.

Основная проблема энергетической безопасности наиболее экономически развитых и населённых территорий и экономик Восточной Азии заключается в недостаточности технического и экономического потенциала собственных ресурсов ВИЭ. Принципиальное решение состоит в том, что для них должен

* далее употребляется термин «энергопереход».

† The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

быть обеспечен импорт энергии возобновляемых энергоресурсов; следовательно, должны существовать и соблюдаться гарантии происхождения такой энергии. Заметим, что производство водорода при использовании в качестве первичной энергии возобновляемых ресурсов требует такого ресурса, как вода. При этом в Монголии и Китае перспективные источники ВИЭ пространственно зачастую не совпадают с наличием достаточных водных ресурсов.

Включение в круг рассматриваемых перспективных водородных технологий, так называемых PtX (трансформация электроэнергии в топливо, *e-fuels*) позволяет ввести термин «водородоносители» для тех веществ, назначение которых состоит в транспортировке энергии, и в составе которых содержится водород, произведённый ранее в какой-либо технологической цепочке.

Поскольку водород может использоваться при производстве синтетических видов топлива – от метана до дизельного топлива, то для доставки энергии к потребителям может быть использована существующая транспортная инфраструктура.

взаимосвязанных таким образом

Интеграция электроэнергетической и водородной систем обусловлена, с одной стороны, возможностью производства «зелёного» водорода на основе электролиза воды (а также перспективных технологий *термолиза* и *фотолиза*), в процессе которого используется только «зелёная» электроэнергия, а с другой стороны, необходимостью обеспечения баланса производства и потребления в электроэнергетических системах, которая существенно зависит от так называемых пиковых источников электроэнергии, в качестве которых могут выступать топливные элементы. В регионе СВА такая электроводородная система в перспективе будет связывать потребителей энергии в «островных» экономиках (Япония, Р.Корея, Тайвань) и в прибрежных провинциях Китая с центрами генерации энергии ВИЭ в западных и северных провинциях Китая, в Монголии и России.

2. Технологические предпосылки использования водорода в энергетических системах

Отмечено, что наибольшее применение водородные технологии к 2050 г. могут получить на транспорте, в коммунально-бытовом секторе и в промышленности, в то время как наименее эффективным приложением для использования водорода в качестве топлива является электроэнергетика [2]. Водород может длительно сохранять энергию в масштабах до ТВт·ч, или сотен тысяч тонн *экологически чистого, высокоэффективного* топлива. В электроэнергетике появляется возможность широкого диапазона регулирования энергоснабжения конечных потребителей – от оперативных и суточных до недельных и сезонных. При этом существуют ограничения, связанные с наличием подходящих мест хранения сжатого водорода в геологических структурах [23, 24].

Высокая гравиметрическая плотность хранения энергии и высокая энергетическая эффективность

производства электроэнергии обуславливают интерес к использованию водорода для электрификации различных видов транспорта – от автоматизированных сельскохозяйственных тракторов до магистральных авиалайнеров.

Кроме транспортных применений, одним из перспективных направлений использования водорода может стать обеспечение энергетических нужд изолированных и децентрализованных потребителей. Поскольку при сжигании водорода образуется вода, что может стать существенным аргументом для потенциальных пользователей водородных технологий в аридных местностях (таких как юг Монголии, северо-западные районы Китая).

В рамках Парижского соглашения возрастание требований к снижению эмиссии парниковых газов может привести к применению систем улавливания, захоронения и использования углерода (CCUS), в том числе при производстве водорода из природного газа и угля. Таким образом, развитие институтов регулирования может содействовать повышению относительной эффективности производства «зелёного» водорода, одновременно оказывая влияние на развитие технологий «серого» водорода.

3. Обзор аналогичных исследований

За десятилетия исследований проблем создания водородной экономики наработано множество соответствующих инструментов, выполнены компетентные обзоры и подробно описаны различные примеры опытных электроводородных систем. Далее указаны наиболее актуальные и наиболее соответствующие тематике наших исследований публикации.

Так, на основе первичных данных и прозрачных расчётов утверждается, что в условиях падения цен на энергоносители «для Австралии крайне маловероятно, что экспортный водород может быть получен с использованием избыточной энергии ветра и солнца» [3]. Подобные подходы являются ситуационными и не могут быть использованы, поскольку соотношение цен на энергоносители и институты управления развитием энергетики будут совершенно отличными от современных. Большое внимание было уделено анализу использования моделей сложных развивающихся объектов, включающих ВИЭ, электроэнергетические, водородные системы, активное использование накопителей энергии для различных энергоносителей, рекуперация энергоносителей.

Установлено, что основные типы используемых для решения задач оценки эффективности технологической модели относятся к производственно-финансовым [4, 9], оптимизационным и смешанным [5–11], из которых следует особо выделить работы [12–16] и [17–22] вследствие достигнутого уровня технологической детализации и/или пространственно-временного описания сложных электроводородных систем. В итоге, на основе выполненного анализа различных подходов, был сделан вывод о необходимости разработки двухуровневой системы моделей.



Частично-целочисленная линейная оптимизационная модель должна выступать верхним уровнем для системы производственно-финансовых моделей. Последние необходимы для формирования механизмов согласования интересов бизнеса и органов управления социально-экономическим развитием национального и субнационального уровня, представляя инструмент поиска баланса интересов акторов для рассматриваемой страны. Модель верхнего уровня описывает процессы развития интегрированных международных электроэнергетической и водородной систем. Она предназначена для оценки эффективности внешнеторговых связей, выработки предложений по институтам управления энергетическими рынками, обеспечения процессов поиска общих интересов и механизмов взаимодействия заинтересованных акторов. В такой модели должны рассматриваться существующие и новые объекты генерации, передачи и потребления электроэнергии в крупных узлах распределённой электроэнергетической системы, включающей накопители энергии, а также объекты производства, хранения и транспортировки водорода и водородоносителей.

4. Методология исследований

Методологический подход необходим для формализации логики и организации решения задач исследования. Особое место в этом процессе занимает создание модели объекта, которая применительно к предполагаемой международной электроводородной системе в регионе СВА позволит решать широкий круг задач оценки экономической, финансовой и народнохозяйственной эффективности. К ним относятся оценки энергетической и экономической эффективности такой системы; целевые параметры водородных технологий, которые позволяют обеспечить конкурентоспособность производимых продуктов на энергетических рынках; показатели управляемых внешних переменных, обеспечивающих баланс интересов акторов при создании институтов регулирования энергетических рынков. Последний включает факторы ограничения воздействия на окружающую природную среду, степени участия в борьбе против изменения климата, укрепления энергетической безопасности.

Помимо собственно производственно-транспортной модели электроводородной системы, разработанный на первом этапе инструментальный исследования будет включать производственно-финансовые модели входящих в неё энергетических объектов - производство электролизного водорода, «зелёных» водородоносителей, хранения и транспортировки всех типов энергоносителей, а также рециркуляции водорода для пиковой генерации электроэнергии. Для оценки эффективности многостороннего сотрудничества предлагается включить в анализ результатов вычислительных экспериментов инструментальный на основе теории кооперативных игр.

Заинтересованность в максимальном распространении уже накопленного опыта аналогичных исследований указывает на достаточно подробный пере-

чень современных требований к аппарату исследований интеграции водородных технологий в энергетические системы, представленный в пункте 4.1 обобщающего исследования [2].

Для обеспечения проведения вычислительных экспериментов, анализа решений и выработке практических рекомендаций технологического, финансового, экономического, политического (международного уровня) характера, необходима организация обмена информацией и мнениями между широким кругом специалистов. Так, принятие решений по выбору технико-экономических параметров невозможно без специализированных исследований соответствующих технологий. В свою очередь, выбор технологий и разработка сценариев их применения в рамках обеспечения международных энергетических рынков требует координации экономистов различных отраслей народного хозяйства и специалистов, знакомых с технологиями и экономикой отраслей, институтами развития энергетических рынков стран Восточной Азии. Наконец, выработка практических рекомендаций по международному энергетическому сотрудничеству диктует потребность в согласовании позиций со специалистами по внутри- и внешнеполитическим проблемам, чтобы обеспечить баланс интересов акторов, участвующих в создании международной электроводородной инфраструктуры в регионе северо-восточной Азии.

5. Этапы создания и развития системы моделей ЭЛВИС

На первом этапе создания инструментального рассматривается предельный случай – формирование в регионе СВА инфраструктура для торговли исключительно «зелёными» энергоносителями. Для этого разрабатывается базовая производственно-транспортная модель и производственно-финансовые модели основных объектов водородной инфраструктуры. Первая позволяет находить наиболее эффективную в финансово-экономическом смысле инфраструктуру, которая обеспечивает доставку конечным потребителям «зелёной» энергии требуемого количества и качества, генерируемой удалёнными от потребителей ВИЭ. Модели нижнего уровня описывают создание и предполагаемое функционирование в нормальном режиме объектов генерации электроэнергии на основе ВИЭ, производства «зелёного» водорода методом электролиза и водородоносителей на его основе, систем хранения и транспорта электроэнергии и водородоносителей, а также генерации электроэнергии на основе водорода и водородоносителей. Такие модели нижнего уровня должны адекватно описывать технологические внутриобъектные связи и обеспечивать нахождение оптимальных решений ЭЛВИС при изменении внешних параметров для проекта.

Обособленными процедурами оценивается та часть перспективной потребности, которая будет обеспечиваться «зелёной» энергией. В такой системе не предусматривается использование уже существующих



ющих линий электропередач и традиционных генерирующих мощностей.

На первом этапе предполагается решение задач оценки конкурентоспособности потенциальных экспортёров энергии ВИЭ, поиска условий и показателей, обеспечивающих такую конкурентоспособность на основе развития технологий, изменения механизмов ценообразования, структуры и/или масштабов цен на энергетических рынках. Таким образом, описывается создание гипотетической системы для обеспечения потребностей крупных центров энергопотребления в Японии, Республике Корея и Китае в «зелёной» энергии в условиях полного отсутствия тепловой и атомной генерации электроэнергии, запрета на производство *углеродного* водорода.

На втором этапе технико-экономическая модель электроводородной системы усложняется за счёт рассмотрения существующих и возможности строительства новых линий электропередач, объектов «традиционной» генерации, таких как тепловые, атомные, гидравлические (в том числе гидроаккумулирующие) электростанции. Предусматривается возможность производства водорода на основе термолитиза и фотолитиза. Вместе с тем, для энергопотребителей не предусматривается выделения категории «зелёной» энергии. Такой этап является достаточно самостоятельным, и служит для исследований направлений повышения конкурентоспособностей водородных технологий и проектов водородной энергетики в условиях эволюции энергетических рынков на перспективу в несколько десятков лет.

На третьем, заключительном этапе развития инструментария исследований, предполагается введение раздельного учёта «зелёной» и «углеродной» энергии. Обеспечение этой возможности позволит наиболее глубоко исследовать условия эффективности для реализации проектов создания и развития объектов международной электроводородной системы, проблемы нахождения баланса интересов для акторов, участвующих в создании такой системы.

Далее представлено краткое описание производственно-транспортной модели верхнего уровня для первого этапа, которого достаточно для понимания направлений её дальнейшего развития.

6. Описание модели электроводородной системы для производства, транспортировки и потребления «зелёной» энергии

Модель производственно-транспортной системы Северо-восточной Азии для обеспечения потребности в энергии энергодефицитных стран Восточной Азии, на основе исключительно возобновляемых источников энергии. Модель предназначена для оценки условий, необходимых для создания эффективной системы обеспечения потребителей «зелёными» электроэнергией и водородом. Она позволяет описывать их производство и хранение в узлах системы, транспортировку между которыми соответствующих энергоносителей обеспечивает специализированная инфраструктура. На рисунке 2 представлена обобщённая схема такой модели.

В модели рассматриваются две категории «зелёных» энергоносителей – электроэнергия и три типа водородоносителей – сжиженный водород, сжатый водород, и метилциклогексан в качестве ЖОВ. Электроэнергия как энергоноситель представлена двумя типами – низким напряжением переменного тока для обеспечения балансов генерации и потребления в каждом узле, и высоким напряжением постоянного тока для обеспечения транспортировки электроэнергии между узлами электроэнергетической системы.

Модель разделена на две части по принципу инерционности технических систем. К первой относится вся электроэнергетическая часть модели, а также ключевые объекты водородной энергетики – электролизёры, топливные элементы и системы хранения водородоносителей. Подсистемы преобразования водорода в другие типы водородоносителей, а также системы транспортировки водородоносителей, отнесены ко второй части модели.

Основной временной единицей модели является такт¹, используемый в электроэнергетической и частично в водородной части модели. Вспомогательная единица (период p) используется при описании транспорта и потребления водородоносителей в водородной части модели².

¹Минимальный временной интервал (такт) связан с необходимостью обеспечить учёт влияния высокой изменчивости и природного энергетического потенциала на параметры технических систем. Такты определяются количеством изменений состояния системы в течение часа.

²Каждый из периодов p представляет собой уникальную непрерывную последовательность тактов (неделя, месяц, сезон, либо весь календарный год).

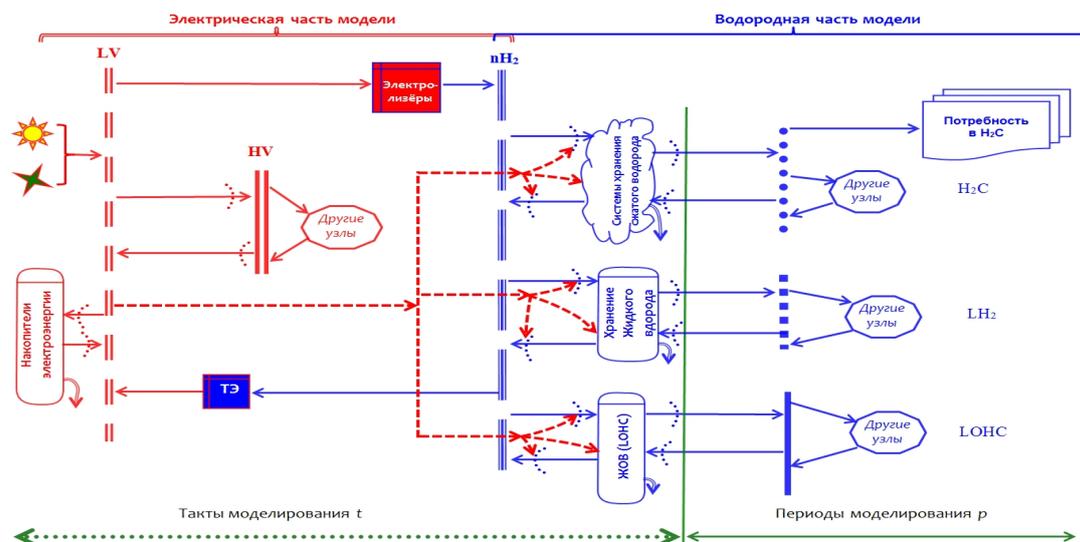


Рис. 2. Обобщённая схема узла системы для «зелёных» энергоносителей. Первый этап развития модели электроводородной инфраструктуры

Fig. 2. Generalized scheme of the system's node for "green" energy carriers. The first stage of the electric-hydrogen infrastructure model development

Источником производства электроэнергии служат солнечный и ветровой ресурсный потенциал ВИЭ, в первую очередь западных регионов Китая и юга Монголии. Баланс электроэнергии низкого потенциала в каждый такт для каждого узла в своей приходной части представляет генерацию ВИЭ, выдачу запасённой накопителем электроэнергии, либо рекуперацию (производство электроэнергии из произведённого ранее в данном, или в каком-либо другом узле, «зелёного» водорода), либо преобразование электроэнергии высокого напряжения, полученную из соседних узлов электроэнергетической системы. Расходная часть баланса описывает четыре возможных направления использования электроэнергии низкого потенциала - преобразование в не сжатый водород посредством электролиза, преобразование в электроэнергию высокого напряжения для передачи в другие узлы, увеличение количества энергии в накопителях электроэнергии, а также обеспечение процессов преобразования, не сжатого водорода в другие типы водородоносителей, их хранения, и рекуперации в не сжатый водород. Заметим, что принципиальных трудностей в описании других возможных процессов производства, не сжатого водорода (термолиз, фотолиз), равно как и других типов накопителей электроэнергии, не имеется.

Центром водородной части модели является баланс производства и распределения, не сжатого электролизного водорода. Он позволяет описывать операции производства и рекуперации не сжатого водорода, реализуя ключевую возможность для электроводородной системы – прямое преобразование потока прерывистой и неуправляемой энергии ВИЭ в топливный энергоноситель, а также регулируемое производство электроэнергии на основе водородоносителя.

Критерием оптимизации в модели является минимум затрат на создание и функционирование системы, предназначенной для обеспечения заданных объёмов потребления энергии, вплоть до детализации по энергоносителям.

7. Дальнейшие этапы развития модели ЭЛВИС

На втором этапе развития модели обеспечивается расширение технологий генерации электроэнергии и производства водорода, что означает существенное увеличение размерности модели, трудоёмкости подготовки данных и анализа решений. Вместе с тем увеличивается и количество решаемых задач исследования, за счёт поиска конкурентоспособных проектов развития международной электроводородной системы в регионе США. Созданная на первом этапе модель ЭЛВИС будет расширяться за счёт включения в рассмотрение традиционных генераторов электроэнергии, углеродных технологий производства водородоносителей, учёта нагрузки потребителей электроэнергии и водорода в каждом узле системы. Новое качество позволит исследовать роль водородоносителей в регулировании режимов международной электроэнергетической системы.

Использование общих объектов электроэнергетической и водородной инфраструктуры является основным объектом исследования для оценки эффективности всей инфраструктуры в условиях выполнения требований по раздельному учёту «зелёной» и «углеродной» энергии. Такое усложнение задачи на третьем, заключительном этапе развития модели, проведёт к ещё более существенному увеличению размерности оптимизационной модели. Вероятно, на этом этапе развития инструментария будут рассматриваться лишь особые режимы работы всего объекта.

Заключение

В статье на основе анализа развития энергетики стран Восточной Азии, являющихся крупными импортерами первичной энергии, сформулирована актуальность задач оценки перспективного рынка «зелёных» энергоносителей в регионе Северо-Восточной Азии. Выполнен краткий обзор используемых методов решения аналогичных задач, предложены структура и последовательность создания научного инструментария исследований, подчеркнута междисциплинарность и взаимосвязанность технологических, экономических и политических методов исследования рассматриваемой комплексной проблемы. Указаны возможные проблемы создания инструментария научных исследований, связанные со значительным усложнением модели объекта на последнем этапе.

Благодарности

Работа выполнена по гранту РФФИ (Российско-го фонда фундаментальных исследований) “20-014-00024 А”.

Список литературы

- Jiang Y. Size optimisation and economic analysis of a coupled wind-hydrogen system with curtailment decisions / Y. Jiang Z. Deng, S. You // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – V.44 - № 7. – p. 19658-19666. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.035
- Quarton C.J. The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios / C.J. Quarton et al. // *Sustainable Energy & Fuels*. – 2020. – V.4 – p. 80. DOI: 10.1039/c9se00833k
- Boretti A. Production of hydrogen for export from wind and solar energy, natural gas, and coal in Australia / A. Boretti // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – V.45 - № 7. – p. 3899-3904. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.080
- Liu, B. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China / Liu, B. et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – V.45 - № 3. – p. 1385-1398. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.056
- Pan, G. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China / Pan, G. et al. // *Applied Energy*. – 2020. – V.270. – a.115176. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115176
- Larscheid P. Potential of new business models for grid integrated water electrolysis / P. Larscheid et al. // *Renewable Energy*. – 2018. – V.125 – p. 599-608. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.074
- De-Le S. Hydrogen supply chain optimization for deployment scenarios in the Midi-Pyrenees region, France / S. De-Le et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V.39 - № 23. – p. 11831-11845. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.165
- Timmerberg S. Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs / S.Timmerberg, M.Kaltschmitt // *Applied Energy*. – 2019. – V.237 – a. 795-809. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.030
- McDonagh S. Hydrogen from offshore wind: Investor perspective on the profitability of a hybrid system including for curtailment / S. McDonagh et al. // *Applied Energy*. – 2020. – V.265 – a.114732. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114732
- Welder A. Design and evaluation of hydrogen electricity reconversion pathways in national energy systems using spatially and temporally resolved energy system optimization / A. Welder et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – V.44 - № 3. – p. 9594-9607. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.017
- Han S. A multi-period MILP model for the investment and design planning of a national-level complex renewable energy supply system / S. Han, J. Kim // *Renewable Energy*. – 2019. – V.141 - p.736-750. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.018
- Samsatli S. Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain / S. Samsatli, I. Staffell, N. Samsatli // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – V.41 - № 1. – p. 447-475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.10.032
- Samsatli S. The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation / S. Samsatli, N. Samsatli // *Applied Energy*. – 2020. – V.257 – a.113936. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113936
- Samsatli S. A general mixed integer linear programming model for the design and operation of integrated urban energy systems / S. Samsatli, N. Samsatli // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V.191 – p.458-479. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.198
- Samsatli S. A multi-objective MILP model for the design and operation of future integrated multi-vector energy networks capturing detailed spatio-temporal dependencies / S. Samsatli, N. Samsatli // *Applied Energy*. – 2018. – V.220 – p.893-920. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.055
- Samsatli S. The role of renewable hydrogen and inter-seasonal storage in decarbonising heat – Comprehensive optimisation of future renewable energy value chains / S. Samsatli, N. Samsatli // *Applied Energy*. – 2019. – V.233-234 – p.854-893. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.159
- Komiyama R. Energy modeling and analysis for optimal grid integration of large-scale variable renewables using hydrogen storage in Japan / R. Komiyama, T. Otsuki, Y. Fujii // *Energy*. – 2015. – V.81 - p. 537-555. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.069
- Otsuki T. Electric power grid interconnections in Northeast Asia: A quantitative analysis of opportunities and challenges / T. Otsuki, I.ABM, R.Samuels // *Energy Policy*. – 2016. – V.89 - p. 311-329. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.11.021
- Otsuki T. Study on Surplus Electricity under Massive Integration of Intermittent Renewable Energy



Sources / Otsuki T., Komiyama R., Fujii Y. // *Electrical Engineering In Japan*. – 2017. – V.201 - № 2. – p. 17-31.

20. Otsuki T. Costs and benefits of large-scale deployment of wind turbines and solar PV in Mongolia for international power exports / T. Otsuki // *Renewable Energy*. – 2017. – V.108 - p. 321-335. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.018

21. Otsuki T. Techno-economic Assessment of Hydrogen Energy in the Electricity and Transport Sectors Using a Spatially-disaggregated Global Energy System Model / T. Otsuki, R. Komiyama, Y. Fujii // *Journal Of The Japan Institute of Energy*. – 2019. – V.98 - № 4. – p. 62-72.

22. Otsuki T. Feasibility study on synthetic methane using an electricity and city gas supply model / T. Otsuki, Y. Shibata // *IEEJ*. – 2020. – https://eneken.ieej.or.jp/en/report_detail.php?article_info_id=8954

23. Zhang F. The survey of key technologies in hydrogen energy storage / F. Zhang et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – V.41 - № 33. – p.14535–14552. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293

24. Tarkowski R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects / R. Tarkowski // *Renewable Sustainable Energy Rev*. – 2019. – V.105 – p.86-94. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.051

References

1. Jiang Y. Size optimisation and economic analysis of a coupled wind-hydrogen system with curtailment decisions / Y. Jiang Z. Deng, S. You // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – V.44 - № 7. – p. 19658-19666. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.035

2. Quarton C.J. The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios / C.J. Quarton et al. // *Sustainable Energy & Fuels*. – 2020. – V.4 – p. 80. DOI: 10.1039/c9se00833k

3. Boretti A. Production of hydrogen for export from wind and solar energy, natural gas, and coal in Australia / A. Boretti // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – V.45 - № 7. – p. 3899-3904. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.080

4. Liu, B. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China / Liu, B. et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – V.45 - № 3. – p. 1385-1398. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.056

5. Pan, G. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China / Pan, G. et al. // *Applied Energy*. – 2020. – V.270. – a.115176. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115176

6. Larscheid R. Potential of new business models for grid integrated water electrolysis / R. Larscheid et al. // *Renewable Energy*. – 2018. – V.125 – p. 599-608. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.074

7. De-Le S. Hydrogen supply chain optimization for deployment scenarios in the Midi-Pyrenees region, France / S. De-Le et al. // *International Journal of Hy-*

DOI: 10.1002/ej.22996

drogen Energy. – 2014. – V.39 - № 23. – p. 11831-11845. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.165

8. Timmerberg S. Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs / S.Timmerberg, M.Kaltschmitt // *Applied Energy*. – 2019. – V.237 – a. 795-809. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.030

9. McDonagh S. Hydrogen from offshore wind: Investor perspective on the profitability of a hybrid system including for curtailment / S. McDonagh et al. // *Applied Energy*. – 2020. – V.265 – a.114732. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114732

10. Welder A. Design and evaluation of hydrogen electricity reconversion pathways in national energy systems using spatially and temporally resolved energy system optimization / A. Welder et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – V.44 - № 3. – p. 9594-9607. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.017

11. Han S. A multi-period MILP model for the investment and design planning of a national-level complex renewable energy supply system / S. Han, J. Kim // *Renewable Energy*. – 2019. – V.141 - p.736-750. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.018

12. Samsatli S. Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain / S. Samsatli, I. Staffell, N. Samsatli // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – V.41 - № 1. – p. 447-475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.10.032

13. Samsatli S. The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation / S. Samsatli, N. Samsatli // *Applied Energy*. – 2020. – V.257 – a.113936. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113936

14. Samsatli S. A general mixed integer linear programming model for the design and operation of integrated urban energy systems / S. Samsatli, N. Samsatli // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V.191 – p.458-479. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.198

15. Samsatli S. A multi-objective MILP model for the design and operation of future integrated multi-vector energy networks capturing detailed spatio-temporal dependencies / S. Samsatli, N. Samsatli // *Applied Energy*. – 2018. – V.220 – p.893-920. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.055

16. Samsatli S. The role of renewable hydrogen and inter-seasonal storage in decarbonising heat – Comprehensive optimisation of future renewable energy value chains / S. Samsatli, N. Samsatli // *Applied Energy*. – 2019. – V.233-234 – p.854-893. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.159

17. Komiyama R. Energy modeling and analysis for optimal grid integration of large-scale variable renewables using hydrogen storage in Japan / R. Komiyama, T. Otsuki, Y. Fujii // *Energy*. – 2015. – V.81 - p. 537-555. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.069

18. Otsuki T. Electric power grid interconnections in Northeast Asia: A quantitative analysis of opportunities and challenges / T. Otsuki, I.ABM, R.Samuelson // *En-*



ergy Policy. – 2016. – V.89 - p. 311-329. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.11.021

19. Otsuki T. Study on Surplus Electricity under Massive Integration of Intermittent Renewable Energy Sources / Otsuki T., Komiyama R., Fujii Y. // Electrical Engineering In Japan. – 2017. – V.201 - № 2. – p. 17-31. DOI: 10.1002/eej.22996

20. Otsuki T. Costs and benefits of large-scale deployment of wind turbines and solar PV in Mongolia for international power exports / T. Otsuki // Renewable Energy. – 2017. – V.108 - p. 321-335. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.018

21. Otsuki T. Techno-economic Assessment of Hydrogen Energy in the Electricity and Transport Sectors Using a Spatially-disaggregated Global Energy System Model / T. Otsuki, R. Komiyama, Y. Fujii // Journal Of

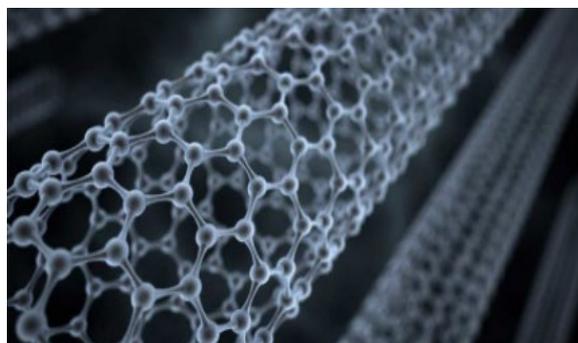
The Japan Institute of Energy. – 2019. – V.98 - № 4. – p. 62-72.

22. Otsuki T. Feasibility study on synthetic methane using an electricity and city gas supply model / T. Otsuki, Y. Shibata // IEEJ. – 2020. – https://eneken.ieej.or.jp/en/report_detail.php?article_info_id=8954

23. Zhang F. The survey of key technologies in hydrogen energy storage / F. Zhang et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V.41 - № 33. – p.14535–14552. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293

24. Tarkowski R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects / R. Tarkowski // Renewable Sustainable Energy Rev. – 2019. – V.105 – p.86-94. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.051

Транслитерация по BSI



Ученые вырастили самый высокий лес из нанотрубок

Японские ученые смогли "вырастить" самый высокий в мире "лес" углеродных нанотрубок, крайне необходимых для самых разных отраслей промышленности.

Как сообщил журнал Carbon, специалисты из японского Университета Васэда добились того, что высота вертикального "леса" нанотрубок достигает 14 сантиметров. Ранее китайские ученые смогли вырастить отдельные нанотрубки до 50 сантиметров в длину, но высота подобного "леса" достигала лишь 2 сантиметра. Отдельные же нанотрубки не слишком практичны и пригодны для использования в промышленности.

Как правило, такой "лес" выращивают на основе кремния, а катализатором служит железо с покрытием из оксида алюминия. Высоту ограничивает быстрая деградация катализатора. Ученые смогли продлить срок его работы, добавив слой гадолиния. Кроме того, кремниевую пластину поместили в камеру, где проводился процесс холодного осаждения из паровой фазы, а к разогретой до 750 градусов пластине катализатора постоянно добавляли атомы испаренного алюминия и железа. Таким образом, катализатор смог действовать 26 часов, в результате "лес" успел подняться на рекордную высоту.

Углеродные нанотрубки — трубки из атомов углерода с толщиной стенок в один атом — необходимы для таких отраслях промышленности, как оптика, электроника, медицина, очистка воды и т.д.

Использование нанотрубок позволит создавать уникальные легкие и при этом прочные материалы. Нанотрубки могут улучшить свойства почти любых материалов, повысив не только их прочность, но и электропроводность и теплопроводность. Лес из нанотрубок участвует с процессе искусственного фотосинтеза, который может обеспечить население дешевой энергией из солнца и воды. Один из разработчиков этой системы профессор энергетики и химии Калифорнийского университета в Беркли Ян Пэйдун в 2020 году стал лауреатом премии «Глобальная энергия».

Выращенные нанотрубки оказались более прочными, качественными и чистыми. По мнению ученых, открытие позволяет надеяться на возможность массового использования нанотрубок в промышленности. Способ поддержания катализатора в рабочем состоянии можно использовать в нефтехимии, выращивании кристаллов, энергетике и т.д.

globalenergyprize.org

