

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

В.С. Арутюнов<sup>1,2\*</sup>, А.В. Арутюнов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,  
ул. Косыгина, 4, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
пр. Семенова, 1, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup>Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen 518172, China

## Аннотация

Наблюдаемое изменение глобального климата и предполагаемая связь этого явления с изменением концентрации углеродсодержащих парниковых газов в атмосфере стимулировали усилия, направленные на снижение эмиссии парниковых газов (снижение углеродного следа мировой энергетики и экономики). Для решения этой проблемы последовательно предлагались такие пути, как переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), масштабное секвестирование промышленных выбросов CO<sub>2</sub>, замена углеводородных источников энергии на водород. В работе рассмотрены причины низкой эффективности этих проектов. Сделан вывод, что в настоящее время наиболее радикальный и экономически реальный путь снижения эмиссии диоксида углерода в атмосферу – постепенная замена угля и нефти природным газом, причем не только в энергетике, но и в качестве сырья для производства нефтехимических продуктов. В свою очередь, это требует повышения эффективности существующих и создания новых газохимических процессов.

*Ключевые слова:* декарбонизация энергетики, водородная энергетика, углеводороды, конверсия, синтез-газ.

## 1. Введение

Наблюдаемое на протяжении последних десятилетий изменение глобального климата и сопровождающее его повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> [1, 2], сформировало представление о том, что именно повышение концентрации парниковых газов в атмосфере приводит к повышению температуры земной поверхности, а не наоборот, повышение температуры в результате изменения солнечной активности вызывает рост концентрации парниковых газов в атмосфере. И хотя до сих пор нет неоспоримых доказательств того, что первично именно вызванное антропогенной деятельностью повышение концентрации парниковых газов в атмосфере [1, 2], Парижское соглашение по климату [3] поставило целью

снижение их эмиссии, то есть снижение углеродного следа мировой экономики. В первую очередь это касается энергетики, поскольку она является основным источником антропогенной эмиссии CO<sub>2</sub>.

Несмотря на огромную разницу в потоке солнечной энергии, поступающей в настоящее время на внешнюю границу атмосферы (240 Вт/м<sup>2</sup>) и приведенной на единицу поверхности Земли плотности потока энергии, выделяемой в результате ее мирового производства (0,02 Вт/м<sup>2</sup>) [1], которая достигает примерно 10 000 раз, несомненно, энергетика является одним из главных факторов антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе климат. Для реализации этой цели последовательно были предложены такие пути, как переход на возобновляемые источники энергии, масштабное секвестирование промышленных

\*Ответственный автор  
E-mail: v\_arutyunov@mail.ru (В.С. Арутюнов)

выбросов  $\text{CO}_2$ , замена углеводородных источников энергии на водород. Несмотря на огромные усилия по реализации этих проектов, ни один из них не оправдал возлагавшихся надежд. Ниже будут кратко показаны те присутствующие им принципиальные недостатки, которые не позволяют рассчитывать на их серьезный вклад в снижение глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов, и рассмотрены более реальные возможности снижения антропогенного вклада в рост концентрации углеродсодержащих парниковых газов.

## 2. Возобновляемые источники энергии

Первоначально надежды на существенное снижение эмиссии углеродсодержащих парниковых газов связывали с заменой углеводородной энергетики возобновляемыми источниками энергии. Однако несмотря на несколько десятилетий глобальных усилий и огромные затраты на разработку и широкое внедрение ВИЭ их совокупная доля в мировом энергобалансе так и не превысила 5% (рис. 1). Главная причина была в общем-то очевидной с самого начала нереальности замены углеводородных источников энергии на ВИЭ ни сейчас, ни в будущем, в очень низкой плотности потока энергии всех видов ВИЭ, которая на порядки ниже плотности потока энергии в современных промышленных источниках энергии, и это их принципиально неустранимый недостаток [4, 5]. Безусловно, техническое развитие и более широкое внедрение ВИЭ в благоприятных для их использования условиях будет продолжаться, но их широкое использование в промышленной энергетике маловероятно.

## 3. Секвестирование $\text{CO}_2$

Определенные надежды в снижении углеродного следа связывали с широкомасштабным внедрением технологий улавливания и захоронения углерода (*Carbon Capture and Storage (CCS)*, секвестированием  $\text{CO}_2$ ), выделяемого при производстве энергии из ископаемых углеводородов. Однако высокие затраты энергии, необходимые для выделения  $\text{CO}_2$  из дымовых газов теплоэлектростанций, в которых его концентрация менее 10%, а также на транспортировку и последующее захоронение углекислого газа в каких-либо геологических формациях или на морском дне, делают этот путь экономически также нецелесообразным. По оценкам, затраты на секвестирование 1 т  $\text{CO}_2$  из дымовых газов современных ТЭС с комбинированным парогазовым циклом лежат в диапазоне 40-90 долл. Поскольку при сгорании 1000 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$  образуется 2,8 т  $\text{CO}_2$ , при текущей цене газа в США на уровне 4 долл. за 1 ММВТУ (~110 долл. за 1000 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$ ) это приведет минимум к удвоению стоимости получаемой потребителем энергии. Кроме того, сам процесс улавливания и захоронения  $\text{CO}_2$  требует на свою реализацию больших дополнительных затрат энергии. Для обеспечения энергией процессов выделения  $\text{CO}_2$ , транспортировки его к местам захоронения и закачки под высоким давлением на большую глубину в подземные резервуары или на морское дно, по оценкам, придется затратить примерно такое же количество энергии, которое было получено при образовании улавливаемого объема  $\text{CO}_2$ . То есть после всех усилий по его улавливанию и захоронению примерно такой же объем  $\text{CO}_2$  все равно будет выброшен в атмосферу.

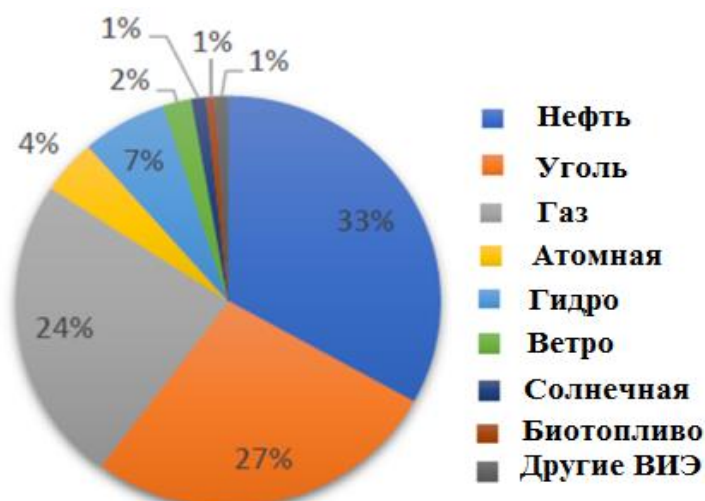


Рис. 1. Вклад различных видов энергии в мировой энергобаланс.

#### 4. Водородная энергетика

Эти проблемы вынудили Парижское соглашение по климату [3] сделать упор на замену углеводородных источников энергии неуглеродными, наиболее подходящим среди которых представлялся водород. Как следствие этих усилий был провозглашен курс на глобальный переход к «водородной энергетике». Однако в земной коре нет сколько-нибудь значительных источников свободного водорода, и он не является источником энергии, а может служить только вторичным энергоносителем. Поэтому с учетом КПД преобразования энергии любых первичных источников энергии в водород, стоимость энергии, получаемой при его использовании, всегда будет значительно выше, чем при непосредственном использовании тех первичных источников, из которых он получен. В соответствующей пропорции возрастет и потребление самих первичных ресурсов [6, 7]. С учетом реального КПД современных газохимических процессов получения водорода эта разница будет минимум двукратная. А производство водорода на основе использования энергии ВИЭ и последующего электролиза при учете термодинамики электрохимических процессов его получения, которые требуют значительно более высоких затрат энергии на единицу получаемого водорода по сравнению с традиционными химическими процессами его получения, она будет еще примерно в пять раз выше [6, 7].

Помимо высокой стоимости, водород, как энергоноситель, имеет еще ряд серьезных недостатков. Несмотря на высокое удельное весовое содержание энергии в водороде его низкая плотность делает водород наименее энергонасыщенным из всех реально рассматриваемых видов топлива. Объемная теплота сгорания жидкого водорода в 2,5 раза ниже, чем метана и в 4 раза ниже, чем бензина. Объемная теплота сгорания газообразного водорода почти в 4 раза ниже, чем природного газа. Поэтому, например, при транспортировке водорода по трубопроводам при тех же условиях будет передаваться в 4 раза меньше энергии, чем при транспортировке природного газа. А вот затраты на компримирование водорода, необходимые для его транспортировки или ожижения, более чем в 8 раз превышают затраты на компримирование природного газа, что делает его трубопроводную транспортировку или ожижение существенно более затратными, чем природного газа. То же самое

относится и к хранению сжиженного водорода, температура которого примерно на 90 градусов ниже, сжиженного метана. Таким образом, из-за отсутствия практически значимых природных источников водорода и его серьезных потребительских недостатков как энергоносителя, водородная энергетика также не в состоянии решить проблему глобального снижения антропогенного углеродного следа. В лучшем случае, она может обеспечить решение ряда локальных экологических проблем.

Поэтому даже в будущем, после освоения энергии термоядерного синтеза и возможности получения большого объема дешевой и доступной электроэнергии, вряд ли стоит ожидать кардинального перехода с традиционных углеводородных энергоносителей на водород. С точки зрения практического использования гораздо удобнее будет на основе природного или улавливаемого в технологических процессах  $\text{CO}_2$  и электролиза воды проводить электрокаталитический синтез углеводородов, который можно рассматривать как альтернативу их природному фотосинтезу, к сожалению, не способному обеспечить необходимый мировой экономике объем энергии. Каталитическое метанирование углекислого газа (реакция Сабатье) или каталитический синтез метанола в условиях избытка дешевой электроэнергии могут стать основой альтернативных методов получения всех остальных продуктов нефтегазохимии и создания действительно нейтральной по углероду энергетике (рис. 2). В настоящее время широко ведутся активные исследования различных каталитических процессов получения разнообразных химических продуктов на основе конверсии углекислого газа, а также его вовлечения в разнообразные химические процессы [8, 9].

#### 5. Роль природного газа и газохимии в снижении углеродного следа

Что касается более близких перспектив, то наиболее эффективный в настоящее время путь решения проблемы снижения углеродного следа мировой энергетике – повышение эффективности использования традиционно углеводородного сырья, прежде всего, широко используемых огромных ресурсов угля [10, 11], а также расширение масштаба и сфер применения природного газа. Причем использования его не только в качестве топлива, но и в качестве химического сырья. Несмотря на активный поиск различных путей превращения

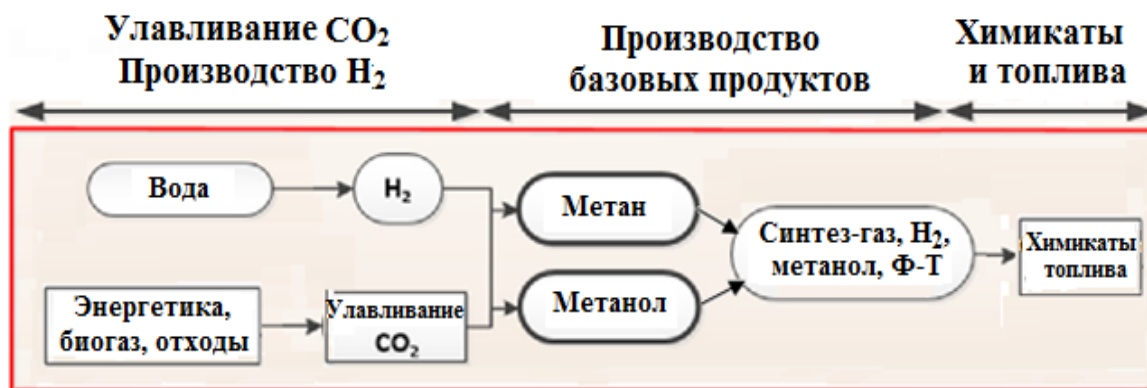


Рис. 2. Получение метана на основе метанирования  $\text{CO}_2$  (реакция Сабатье) и синтез метанола из  $\text{CO}_2$  как основа нейтральной по углероду энергетики на базе энергии термоядерного синтеза.

природного газа в химические продукты, в том числе путем его пиролиза в такой универсальный полупродукт органической химии, как ацетилен [12, 13], основным направлением развития современной газохимии остается конверсия природного газа в синтез-газ. Этот путь обеспечивает максимальную селективность превращения метана в разнообразные целевые продукты.

Основные проблемы на этом пути связаны с высокой стоимостью и высокими затратами энергии в существующих процессах конверсии углеводородных газов в синтез-газ, на которые приходится до 2/3 всех затрат на получение конечных газохимических продуктов. Несмотря на то, что ведущей технологией конверсии природного газа в синтез-газ остается его паровой риформинг, все большее распространение получают активно развиваемые в последние годы автотермические процессы на основе парциального окисления. К ним относятся процессы каталитического и некаталитического парциального окисления, комбинированный риформинг, представляющий собой комбинацию парового риформинга и парциального окисления, и автотермический риформинг [14, 15]. Автотермические процессы позволяют значительно сократить удельный расход природного газа, что является прямым вкладом в снижение углеродного следа газохимии. В последние годы был разработан также принципиально новый тип некаталитического автотермического процесса конверсии в синтез-газ углеводородных газов практически любого состава и происхождения – матричный риформинг [16, 17]. Он позволяет с минимальными затратами энергии на получение синтез-газа использовать для производства газохимических продуктов такие источники

сырья, как попутные и нефтезаводские газы, ресурсы низкодебетных и малоресурсных месторождений, биогаз.

Однако практическое внедрение некаталитических процессов на основе парциального окисления связано с рядом присущих им принципиальных проблем, к наиболее важным среди которых можно отнести относительно низкое соотношение  $[\text{H}_2]/[\text{CO}]$ , требующее корректировки состава получаемого технологического газа, и высокую интенсивность образования сажи при окислении богатых углеводород-кислородных смесей. Последнее обстоятельство приводит к быстрому выходу из строя технологического оборудования и катализаторов, снижению эффективности работы теплообменного оборудования. Необходимы тщательное исследование механизмов образования сажи в этих процессах и разработка методов подавления ее образования. Определенные перспективы связаны также с развитием технологий прямой окислительной конверсии природного газа в такие продукты, как ацетилен, этилен, метанол, формальдегид и ряд других.

## 6. Заключение

Рассмотренные выше обстоятельства позволяют сделать вывод, что наиболее эффективным способом сокращения антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  и, соответственно, снижения углеродного следа мировой экономики является более широкое использование природного газа как в энергетическом секторе, так и в качестве сырья для производства химических продуктов. В этой связи серьезные усилия должны быть направлены на совершенствование газохимических процессов, прежде все-

го, базового процесса конверсии природного газа в синтез-газ. Наиболее перспективными в этом отношении являются автотермические процессы, источником тепла для протекания химических процессов в которых является частичное окисление самого природного газа непосредственно в химическом реакторе.

## Литература

- [1]. Аковецкий В.Г. Геоэкологические проблемы изменения климата: причины и следствие // Научный журнал Российского газового общества. – 2022. – №2(34). – С.14-30.
- [2]. Шполянская Н.А. Климат и его динамика в плейстоцене-голоцене как основа для возникновения разнообразных рисков при освоении районов криолитозоны. // Геориск. – 2019 – Т.ХІІІ, №1. – С.6-24.
- [3]. Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций, 2015.
- [4]. Арутюнов В.С., Лисичкин Г.В. Энергетические ресурсы XXI столетия: проблемы и прогнозы. Могут ли возобновляемые источники энергии заменить ископаемое топливо // Успехи химии. – 2017. – Т.86, №8. – С.777-804.
- [5]. Arutyunov V. Is it possible to stabilize the Earth climate by transition to renewable energy? // Eurasian Chem.-Technol. J. – 2021. – Vol.23, №2. – P.67-75.
- [6]. Арутюнов В.С. Проблемы и вызовы водородной энергетики // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т.19, №4. – С.245-255.
- [7]. Арутюнов В.С. Водородная энергетика: значение, источники, проблемы, перспективы (Обзор) // Нефтехимия. – 2022. – Т.62, №4. – С.459-470.
- [8]. Maeda C., Miyazaki Y., Ema T. Recent progress in catalytic conversions of carbon dioxide // Catal. Sci. Technol. – 2014. – №4. – P.1482-1497.
- [9]. Zhang G., Liu J., Xu Y., Sun Y. A review of CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> reforming to synthesis gas over Ni-based catalysts in recent years (2010–2017) // Int. J. Hydrogen Energy. – 2018. – Vol.43. – P.15030-15054.
- [10]. Исмагилов З.Р., Михайлова Е.С. Актуальные проблемы угольной экономики и экологической переработки углей // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т.19, №4. – С.257-264.
- [11]. Мансуров З.А., Сальников В.Г. Некоторые проблемы экологичного сжигания водоугольных смесей // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т.19, №4. – С.279-288.
- [12]. Zhang Q., Liu Y., Chen T., Yu X., Wang J., Wang T. Simulations of methane partial oxidation by CFD coupled with detailed chemistry at industrial operating conditions // Chem. Eng. Sci. – 2016. – Vol.142. – P.126-136.
- [13]. Chen D., Chen X., Luo C., Liu Z., Gan L.-H. Structural design and performance evaluation of industrial-scale C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> reactor by partial oxidation of natural gas // Chem. Eng. J. – 2021. – Vol.426. – P.130871.
- [14]. Dybkjær I., Aasberg-Petersen K. Synthesis Gas Technology Large-Scale Applications // Can. J. Chem. Eng., 2016. V. 94. P. 607–612.
- [15]. Dahl P.J., Christensen T.S., Winter-Madsen S., King S.M. Proven autothermal reforming technology for modern large-scale methanol plants // Nitrogen + Syngas International Conference & Exhibition, Paris, France, 24-27 February, 2014. – P.1-12.
- [16]. Арутюнов В.С., Никитин А.В., Стрекова Л.Н., Савченко В.И., Седов И.В., Озерский А.В., Зимин Я.С. Матричная конверсия природного газа в синтез-газ и водород как перспективное направление в газохимии и энергетике // Журнал технической физики. – 2021. – Т.91, №5. – С.713-720.
- [17]. Алдошин С.М., Арутюнов В.С., Савченко В.И., Седов И.В., Никитин А.В., Фокин И.Г. Новые некаталитические методы переработки углеводородных газов // Химическая физика. – 2021. – Т.40, №5. – С.46-54.

## References

- [1]. Akovetsky VG (2022) Scientific journal of the Russian gas society [Nauchnyj zhurnal Rossijskogo gazovogo obshchestva] 2(34):14-30. DOI: 10.55557/2412-6497-2022-2-14-30. (in Russian)
- [2]. Shpolyanskaya NA (2019) Georisk World [GeoRisk] XIII(1):6-24. DOI:10.25296/1997-8669-2019-13-1-6-24 (in Russian)
- [3]. Paris Agreement. United Nations, 2015. [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf).
- [4]. Arutyunov VS, Lisichkin GV (2017) Russ. Chem. Rev. 86(8): 777–804. DOI: 10.1070/RCR4723.
- [5]. Arutyunov V (2021) Eurasian Chem.-Technol. J. 23(2):67-75. DOI: 10.18321/ectj1076
- [6]. Arutyunov VS (2021) Combustion and Plasma chemistry. 19(4):245-255. DOI: 10.18321/cpc462 (in Russian)
- [7]. Arutyunov VS (2022) Petroleum Chemistry. 62(6):583-593. DOI: 10.1134/S0965544122040065
- [8]. Maeda C, Miyazaki Y, Ema T (2014) Catal. Sci. Technol. 4:1482-1497. DOI: 10.1039/c3cy00993a
- [9]. Zhang G, Liu J, Xu Y, Sun Y (2018) Int. J. Hydrogen Energy 43:15030-15054. DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.06.091
- [10]. Ismagilov ZR, Mikhaylova ES (2021) Combustion and Plasma chemistry 19(4):257-264. DOI:10.18321/cpc463 (in Russian)

- [11]. Mansurov ZA, Salnikov VG (2021) Combustion and Plasma chemistry 19(4):279–288. DOI:10.18321/cpc465 (in Russian)
- [12]. Zhang Q, Liu Y, Chen T, Yu X, Wang J, Wang T (2016) Chem. Eng. Sci. 142:126-136. DOI: 10.1016/j.ces.2015.11.010
- [13]. Chen D, Chen X, Luo C, Liu Z, Gan L-H (2021) Chem. Eng. J. 426:130871. DOI: 10.1016/j.cej.2021.130871
- [14]. Dybkjær I, Aasberg-Petersen K (2016) J. Chem. Eng. 94:607-612. DOI 10.1002/cjce.22453
- [15]. Dahl PJ, Christensen TS, Winter-Madsen S, King SM (2014) Proven autothermal reforming technology for modern large-scale methanol plants. Nitrogen + Syngas International Conference & Exhibition, Paris, France. P.1-12.
- [16]. Arutyunov VS, Nikitin AV, Strekova LN, Savchenko VI, Sedov IV, Ozerskii AV (2021) Technical Physics 66(5)691-698. DOI: 10.1134/S1063784221050030
- [17]. Aldoshin SM, Arutyunov VS, Savchenko VI, Sedov IV, Nikitin AV, Fokin IG (2021) Russian Journal of Physical Chemistry B 15(3):498-505. DOI: 10.1134/S1990793121030039

gradual replacement of coal and oil with natural gas, not only in the energy sector, but also as raw materials for the production of petrochemicals. In turn, this requires increasing the efficiency of existing and developing new gas chemical processes.

*Keywords:* decarbonization of energy, hydrogen energy, hydrocarbons, conversion, syngas.

### Әлемдік экономиканың көміртегі ізін төмендетудің перспективалық жолдары

В.С. Арутюнов<sup>1,2</sup>, А.В. Арутюнов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Н.Н. Семенов атындағы РҒА Федералды химиялық физиканы зерттеу орталығы, Косыгин к., 4, Мәскеу, Ресей

<sup>2</sup>РҒА химиялық физика және медициналық химия мәселелерін Федералды зерттеу орталығы, Семенов даңғ., 1, Черноголовка, Ресей

<sup>3</sup>Шэньчжэнь MSU-bit университеті, Шэньчжэнь 518172, Қытай

### Аңдатпа

Жаһандық климаттың байқалған өзгеруі және бұл құбылыстың атмосферадағы көміртегі бар парниктік газдар концентрациясының өзгеруімен байланысы парниктік газдар шығарындыларын азайтуға бағытталған күш-жігерді ынталандырды (әлемдік энергетика мен экономиканың көміртегі ізін азайту). Бұл мәселені шешу үшін жаңартылатын энергия көздеріне (ЖЭК) көшу, өнеркәсіптік CO<sub>2</sub> шығарындыларын ауқымды секвестрлеу, көмірсутекті энергия көздерін сутегімен ауыстыру сияқты жолдар дәйекті түрде ұсынылды. Жұмыста осы жобалардың төмен тиімділігінің себептері қарастырылған. Қазіргі уақытта көмірқышқыл газының атмосфераға шығарылуын төмендетудің ең радикалды және экономикалық нақты жолы көмір мен мұнайды табиғи газбен біртіндеп ауыстыру болып табылады, тек энергетикада ғана емес, сонымен қатар мұнай – химия өнімдерін өндіруге арналған шикізат ретінде. Өз кезегінде, бұл қолданыстағы газ-химиялық процестердің тиімділігін арттыруды және жаңа газ-химиялық процестерді құруды талап етеді. *Кілт сөздер:* энергетикалық декарбонизация, сутегі энергиясы, көмірсутектер, конверсия, синтез-газ.

### Promising ways to reduce the carbon footprint of the global economy

V.S. Arutyunov<sup>1,2</sup>, A.V. Arutyunov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4, Kosyгина str., Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 1, Semenov ave., Chernogolovka, Russia

<sup>3</sup>Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen 518172, China

### Abstract

The observed change in the global climate and the supposed connection of this phenomenon with changes in the concentration of carbon-containing greenhouse gases in the atmosphere stimulated efforts aimed at reducing the carbon footprint of the world energy and economy. To solve this problem, such ways as switching to renewable energy sources (RES), large-scale sequestration of industrial CO<sub>2</sub> emissions, replacement of hydrocarbon energy sources with hydrogen have been consistently proposed. The paper considers the reasons for the inefficiency of these projects. It is concluded that currently the most radical and economically feasible way to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere is the