

УДК 620.9  
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4122

## К вопросу о сокращении выбросов парниковых газов при сгорании органического топлива

В.А. Кожевников<sup>1</sup>, А.В. Федюхин<sup>2</sup>✉, К.В. Строгонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НИИ Транснефть», Россия, г. Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва

✉ fedukhinav@mpei.ru

### Аннотация

**Актуальность.** Россия ратифицировала Парижское соглашение по климату. Однако европейское законодательство неоднозначно направлено на извлечение собственной выгоды в сложившихся международных отношениях, особенно в период введения санкций в отношении России. Ожидание введения углеродного налога на продукцию и услуги организаций отрасли требует разностороннего анализа ситуации в области техники и технологий, способствующих снижению выброса парниковых газов. **Цель:** изучение подходов и технологий, направленных на снижение выбросов парниковых газов, стимулирующих экологичное производство тепловой и электрической энергии; определение перспективной и доступной технологии конденсации парниковых газов для отечественной энергетики и особенностей ее применения. **Объект.** Киотским протоколом в 1996 г. установлен перечень парниковых газов, основным из которых для энергетики являются выбросы углекислого газа, образующегося при сжигании топлива в процессе выработки тепловой и электрической энергии. **Методы:** анализ литературных сведений о технологиях утилизации парниковых газов, возможностях его использования и сокращения выбросов; аналитические расчеты по оценке эффективности технологии конденсации углекислого газа. **Результаты.** Выполнен анализ литературных сведений о нормативных требованиях, рекомендациях ООН и аспектах утилизации парниковых газов. Установлена перспективная и доступная технология конденсации парниковых газов с целью улавливания и поглощения углекислого газа при сжигании топлива в процессе производства тепловой и электрической энергии, дана экономическая оценка затрат на приобретение сорбентов и возможности их добычи. Представлены выводы об утопичности задач Парижского соглашения по климату.

**Ключевые слова:** Парниковые газы, углеродный след, органическое топливо, энергосбережение, экологические требования.

**Для цитирования:** Кожевников В.А., Федюхин А.В., Строгонов К.В. К вопросу о сокращении выбросов парниковых газов при сгорании органического топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 108–127. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4122

---

UDC 620.9  
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4122

## On the issue of reducing greenhouse gas emissions from the combustion of organic fuels

V.A. Kozhevnikov<sup>1</sup>, A.V. Fedyukhin<sup>2</sup>✉, K.V. Strogonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Transneft Research Institute LLC, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation

✉ fedukhinav@mpei.ru

## Abstract

**Relevance.** Russia has ratified the Paris Climate Agreement. However, European legislation is ambiguously aimed at extracting its own benefits in the current international relations, especially during the period of sanctions against Russia. Expectation of introduction of a carbon tax on the products and services of industry organizations requires a comprehensive analysis of the situation in the field of engineering and technologies that contribute to reducing greenhouse gas emissions. **Aim.** Study of approaches and technologies aimed at reducing greenhouse gas emissions that stimulate the environmentally friendly production of thermal and electrical energy; identification of promising and affordable greenhouse gas condensation technology for domestic energy and features of its application. **Object.** The list of greenhouse gases was established by the Kyoto Protocol in 1996. The main of greenhouse gases for the energy sector are emissions of carbon dioxide generated by burning fuel in generating heat and electricity. **Methods.** Analysis of literature data on technologies for utilization of greenhouse gases, the possibilities of its use and reduction of emissions. Analytical calculations were performed to assess the effectiveness of carbon dioxide condensation technology. **Results.** The authors have carried out the analysis of literature data on regulatory requirements, UN recommendations and aspects of greenhouse gas utilization. They established a promising and affordable technology of greenhouse gas condensation in order to capture and absorb carbon dioxide during fuel combustion when producing thermal and electrical energy. The paper introduces the economic assessment of the costs of purchasing sorbents and the possibility of their extraction and conclusions on the utopian of the tasks of the Paris Climate Agreement.

**Keywords:** Greenhouse gases, carbon footprint, organic fuels, energy saving, environmental requirements.

**For citation:** Kozhevnikov V.A., Fedyukhin A.V., Strogonov K.V. On the issue of reducing greenhouse gas emissions from the combustion of organic fuels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 3345, no. 11, pp. 108–127. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4122

## Введение

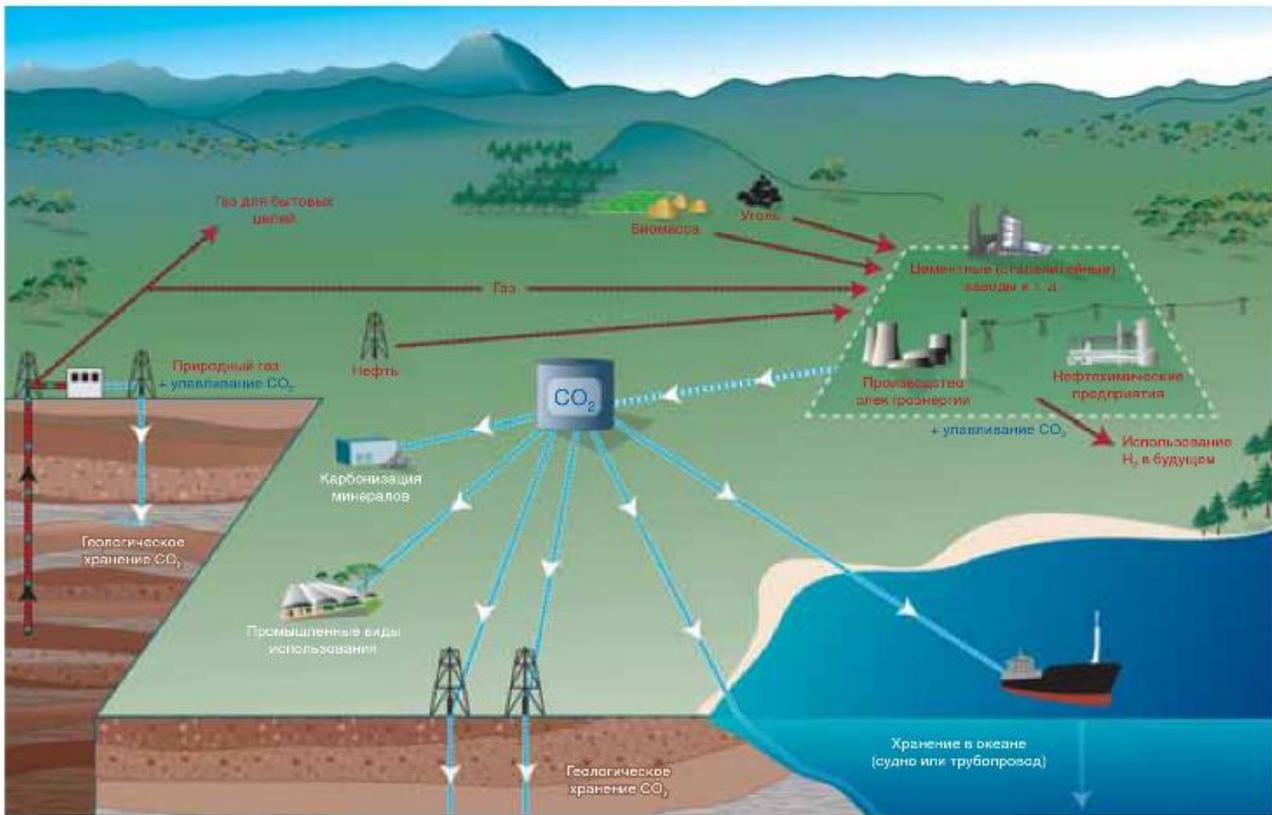
Россия ратифицировала Парижское соглашение по климату, являющееся новым этапом реализации Киотского протокола. Введение углеродного налога на продукцию и услуги приводит к необходимости анализа доступных и эффективных технологий, способствующих снижению выбросов парниковых газов (ПГ).

## Анализ публикаций о методах улавливания и использования парниковых газов

Одним из главных документов, регламентирующих принципы составления отчетности о выбросах парниковых газов, являются Руководящие указания по эффективной практике и учету факторов неопределенности в национальных кадастрах ПГ [1]. Данные Руководящие указания подготовлены в соответствии с Рамочной Конвенцией ООН по Изменению Климата (далее – РКИКООН) к Межправительственной группе экспертов по изменению климата (далее – МГЭИК) по учету неопределенности и представляют собой отчет по эффективной практике ведения кадастров. Данный отчет содержит руководящие указания по эффективной практике с целью помочь странам в подготовке кадастров, которые не являются ни завышенными, ни заниженными, насколько об этом можно судить, и в которых неопределенности уменьшены настолько, насколько практически возможно. Для достижения этой цели отчет способствует разработке кадастров, которые являются прозрачными, документированными, согласованными во времени, полными, сопоставимыми, содержащими оценки неопределенностей, прошедшими процедуры контроля и

обеспечения качества, а также рациональными в использовании ресурсов. Данный отчет не является пересмотром или заменой обновленных принципов национальных инвентаризаций МГЭИК 1996 г., а содержит лишь справочный материал, который дополняет и согласуется с ними. В отчете приводятся введение и главы по направлениям Энергетика, Промышленные процессы, Сельское хозяйство, Отходы и Количественная оценка неопределенностей на практике, а также рекомендации Методологического выбора и пересчета, Обеспечения качества и контроля качества документации по видам производства и образования ПГ. В области исследований «Энергетика» излагается структура выбросов от стационарных источников сжигания топлива и мобильных установок (средств дорожного, водного и воздушного транспорта), объектов добычи и переработки угля, нефти и газа и коэффициентов выбросов, на основании которых формируются национальные кадастры разных стран. Приводится оценка неопределенности коэффициентов выбросов по метану в 50–150 % и отсутствие определенности с выбросами окиси азота.

Формы национальных отчетов по выбросам представлены в Руководящих принципах [2]. Данный документ содержит обновленные Руководящие принципы РКИКООН для информирования о годовых кадастрах, включая изменения, касающиеся сектора землепользования и лесного хозяйства, принятые Конференцией Сторон (КС) на ее девятой сессии. Секретариат подготовил настоящий документ в целях облегчения представления Сторонами информации о кадастрах в 2005 г.



**Рис. 1.** Принципиальная схема возможных систем улавливания, хранения и транспортирования углекислого газа (IPCC 2005)  
**Fig. 1.** Schematic diagram of possible carbon dioxide capture, storage and transportation systems (IPCC 2005)

Руководящие принципы национальных инвентаризаций ПГ МГЭИК [3] раскрывают перечень ПГ, подлежащих контролю и учету, последовательность и структуру формирования национальных кадастров, дают определение цепочки учета ПГ, включающих этапы улавливания, транспортирования, хранения и захоронения, использования. Здесь следует обратить внимание на пояснительные схемы процессов контроля и оборота ПГ, иллюстрируемые рис. 1, 2.

Схема рис. 1 показывает движение (оборот) углекислого газа, не раскрывая способы его получения/извлечения из дымовых газов (продуктов сгорания), и содержит принципиально энергозатратные и энергоемкие технические процедуры. Иллюстрируемые процессы завершаются направлением углекислого газа в места захоронения – в землю или в океан, что противоречит естественному обмену веществ в природе (например, фотосинтезу растений, хемосинтезу бактерий и микроорганизмов, защите окружающей среды от продуктов их разложения) и ее законам (физика: твердые и тяжелые породы должны вытеснять углекислый газ либо обладать высокой сорбирующей способностью, что при высоких давлениях земной коры почти невозможно в условиях захоронения). В то же время

углекислый газ как продукт горения образуется при окислении углерода кислородом, содержащимся в воздухе. По логике кислород должен вернуться в атмосферу для осуществления нормального обмена веществ в природе или участия в технологических процессах (из недр кислород не добывается). Тогда как Руководящие принципы принуждают избавляться от кислорода, входящего в молекулу углекислого газа, и тем самым нарушают баланс веществ в атмосфере, что приведет к росту концентрации азотных соединений, образующихся в продуктах горения и в технологических процессах.

Рис. 2 иллюстрирует обзор продуктов – газов, образующихся в сельскохозяйственных процессах, по существу являющихся естественными биохимическими процессами в природе, почти не зависящими от деятельности человека на протяжении тысячелетий. Иллюстрация отражает образование закиси азота в низкотемпературных процессах окисления при открытом горении (пожары) и ферментном (химическом) взаимодействии веществ. Надо заметить, что в энергетических установках закрытое сжигание топлива осуществляется при температурах свыше 1000 °С, тогда как закись азота разрушается при температурах порядка 500 °С (т. е. в продуктах закрытого горения с высокими темпера-

турами закись азота не существует). Закись азота, как и углекислый газ, является питанием для множества видов растений, а уничтожение этого вещества приведет к их вымиранию. В то же время удаление углекислого газа из атмосферы ведет к росту концентрации азотных соединений (в воздухе содержится 78 % азота): удушающий эффект возникает при увеличении концентрации азота более 79 %, более 85 % – отравляющий эффект, 92 % – смертельная доза для человека. Рост концентрации азота и его соединений в атмосфере приводит к аммонизации почвы и, как следствие, к гибели части растений и микроорганизмов в природе. Для восстановления и освоения сельскохозяйственных земель, повышения плодородия почвы требуется вернуть углерод в виде водных растворов углекислоты и удобрений. Эта мера будет способствовать обеспечению собственной продовольственной программы и развитию экспорта пищевой продукции. С другой стороны, вековая добыча торфа и осушение болот в Мире привели к росту эмиссии углекислого газа и нарушению экосистем. В этой связи ряд иностранных государств, Белоруссия и Россия в последние годы предприняли шаги к реабилитации болот и торфяных месторождений, которые являются природными конденсаторами углерода и

обладают высокой поглотительной способностью в отношении двуокиси углерода.

Осознание мировым научным сообществом опасности достижения несбыточных идей и цели климатических проектов по снижению выбросов ПГ прослеживается в докладах МГЭИК [4]. В настоящее время МГЭИК подготовила шестой доклад об оценке динамики изменения климата (ДОб) с участием трех своих рабочих групп и сводный доклад, три специальных доклада и уточнение своего последнего доклада по методологии:

- вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад «Изменение климата 2021: основы физической науки» был выпущен 9 августа 2021 г. [5];
- материал Рабочей группы II «Изменение климата 2022: последствия, адаптация и уязвимость» был опубликован 28 февраля 2022 г. [6];
- материал Рабочей группы III «Изменение климата 2022: смягчение последствий изменения климата» был опубликован 4 апреля 2022 г. [7].

Сводный отчет станет последним из продуктов AR6 и в течение 2023 г. планируется к выпуску для обсуждения, информирования и Глобального подведения итогов 2023 г. в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

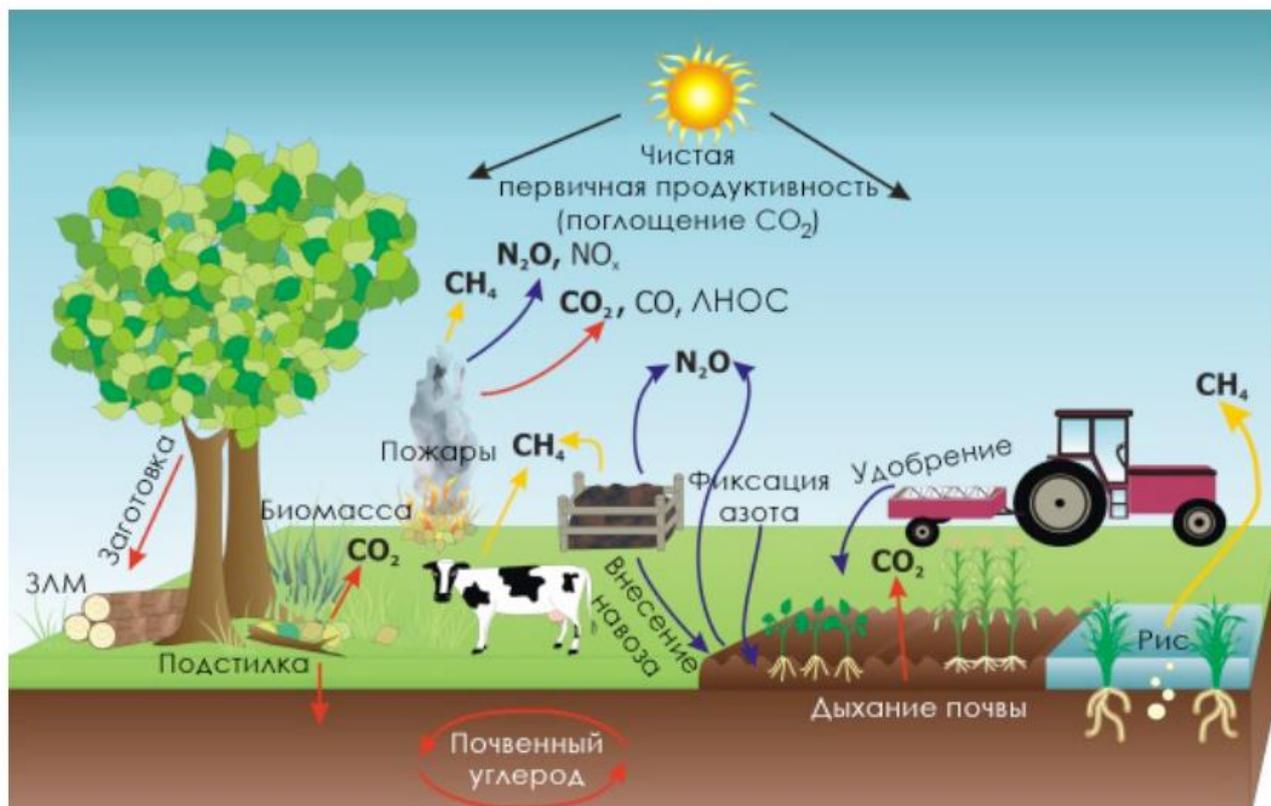


Рис. 2. Обзор продуктов сельскохозяйственной деятельности  
Fig. 2. Overview of agricultural products

Национальный доклад России за 1990–2020 гг. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, разработан и представлен в соответствии с обязательствами Российской Федерации по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и Киотскому протоколу к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата в 2022 г.

Оценка влияния азота на обмен веществ в природе приводится в отчете исследований США за ноябрь 2021 г. [8]. Рассматривается возможность использования азота и его соединений для реализации продовольственной повестки стран на ближайшие 30 лет и далее. Причем акцентируем внимание на том, что углекислый газ  $\text{CO}_2$  является веществом 4 класса опасности, тогда как закись и оксиды азота относятся к 2 и 3 классам опасности по степени влияния на человека и окружающую среду.

На фоне линейки ПГ опасность метана ( $\text{CH}_4$ ) (4 класс опасности), третьего по значимости газа, была недооценена и представлена в отчете «Global Methane Pledge Energy Pathway» в 2021 г., что обсуждалось в течение года, и признана международным сообществом только в ноябре 2022 г. [9–11].

Метан – один из основных пунктов климатической повестки. Сокращение его выбросов позволит быстрее достигнуть результата в борьбе с глобальным потеплением. На 26-й конференции ООН по изменению климата (COP26) в 2021 г. страны подписали соглашение по метану, а на COP27 в Шарм-эль-Шейхе согласовали создание глобальной спутниковой системы мониторинга. Метан образуется не только в технологических процессах производства нефтепродуктов, добычи и транспортирования углеводородов, но и при испарении почвы в условиях потепления климата (осушка болот, таяние ледников и т. п.) и испарения океанов.

Метан – третий по значимости ПГ после водяного пара и углекислого газа. Его вклад в глобальное потепление оценивается в 5–10 %, но его парниковая активность в 25–30 раз больше, чем у углекислого газа, и темпы роста концентраций в 3–4 раза выше. Метан имеет очень короткий жизненный цикл в атмосфере – 10–12 лет, а значит, эффект от сокращения выбросов метана проявится практически сразу, а не через сотни лет, как с  $\text{CO}_2$ . Поэтому в научных публикациях и на климатических форумах все чаще высказывают мысль о том, что достичь целей, обозначенных в Парижском соглашении (ограничить потепление до полутора градусов по сравнению с доиндустриальным уровнем), вряд ли получится, если бороться только с выбросами углекислого газа. Для быстрого результата надо сосредоточиться на метане.

В Шестом отчете, опубликованном в 2021 и 2022 гг., МГЭИК отмечено: для достижения поставленных целей необходимо существенно сократить выбросы метана до 2030 г. [5–7, 11].

До 2030 г. планируется сократить выбросы метана на 40–45 %. Проблема в отсутствии глобальной системы мониторинга этих выбросов для выявления, где они происходят и в каком объеме. За последние 150 лет эмиссия метана увеличилась в 3,5 раза. Частично сыграл роль антропогенный фактор, частично это ответ природных систем на общее потепление на планете. Значительные объемы метана заключены в вековых слоях мерзлых пород, а также в залежах газогидратов на шельфе арктических морей. Почвы мерзлоты в последние десятилетия тают быстрыми темпами, а потепление в Арктике происходит в 3–4 раза быстрее, чем в других частях Земли.

Наибольший потенциал для быстрого снижения выбросов метана находится в секторе добычи ископаемого топлива. Поэтому в 2014 г. крупнейшие нефтегазовые компании, на долю которых приходится более 30 % мировой добычи нефти и газа, объединились в «Нефтегазовую климатическую инициативу» (Oil and Gas Climate Initiative – OGCI) – международную отраслевую организацию, с целью совместной работы над ускорением сокращения выбросов ПГ. В 2016 г. они объявили о создании фонда OGCI Climate Investments, который в течение 10 лет инвестирует миллиард долларов в проекты по сокращению выбросов метана при добыче газа.

На COP27 в 2022 г. было объявлено о старте работы глобальной Системы оповещения и реагирования на выбросы метана (Methane Alert and Response System – MARS). Предполагается, что эта система будет использовать картографические спутники для выявления шлейфов и аномалий метана и связывать эти события с конкретными источниками. Вся информация поступает в ЮНЕП (UNEP – United Nations Environment Programme), в функции которой входит информирование чиновников и бизнеса, а также оценка эффективности принятых мер. Система начнет с наблюдений за объектами энергетического сектора, а затем ее распространят на угольную отрасль, переработку отходов и сельское хозяйство.

По информации Bloomberg от 18.12.2022 [12] Евросоюз достиг соглашения о расширении углеродного рынка, одобрив стратегию «зеленой сделки», которая направлена на то, чтобы сделать европейскую экономику климатически нейтральной к середине XXI в. Об этом писал Bloomberg со ссылкой на предварительное соглашение представитель стран-членов ЕС и Европарламента. В соответствии с соглашением торговля сертификатами на

углеродные выбросы распространятся на отопление и автомобильный транспорт, а также на суда. Кроме того, к 2030 г. ЕС планирует ускорить темпы по сокращению выбросов как минимум до 55 % в сравнении с уровнем 1990 г. и достижению «чистого нуля» к 2050 г.

По совокупности задач это крупнейший закон о климате, принятый в Европе и в мире. Поскольку ЕС борется с энергетическим кризисом, Европарламент намерен сделать «зеленую реформу» основой своей стратегии. «Сделка является успешной для ЕС и обеспечит уверенность компаниям и инвесторам, даже если придется пойти на некоторые компромиссы, поскольку экономическая среда очень сложная», – заявил глава углеродных рынков Banco Bilbao Vizcaya Argentaria SA Инго Рамминг [13]. По данным [13], Европейская комиссия рассматривает возможность продажи через аукцион части сертификатов на выбросы ПГ из резервного фонда стабильности рынка для пополнения собственного бюджета. Планируется реализовать от 200 до 250 млн сертификатов из резерва. Таким образом Брюссель рассчитывает получить порядка €20 млрд. Всего Еврокомиссия собирается выделить около €200 млрд к концу 2030 г. на проекты, направленные на отказ от энергетической зависимости от России, в том числе на создание сети альтернативных поставщиков углеводородов и строительство новой отраслевой инфраструктуры.

Углеродный налог – условное название, а фактически импортеры товаров в Евросоюз будут покупать специальные сертификаты и обменивать их на право ввезти в Евросоюз углеродоемкую продукцию. Непосредственное обязательство по уплате налога будет лежать на компаниях-импортерах соответствующей продукции в ЕС, в том числе на трейдерах. Налог был принят в целях сокращения выбросов и снижения глобальной эмиссии парниковых газов, поскольку дополнительные издержки призваны побуждать производителей уменьшать вредные выбросы. В то же время ряд поправок к углеродному сбору ЕС стали угрозой для многих иностранных поставщиков/производителей, в т. ч. для России, на миллиарды долларов, что приводит потребителей ЕС к обогащению за счет издержек поставщиков/производителей.

Концепция «Зеленой сделки» приводится в публикации [14]. Данная статья анализирует основные аспекты «Зеленой сделки». Она помещает «сделку» в более широкий контекст климатического регулирования в ЕС. Затем автор рассматривает четыре широких взаимосвязанных фактора, которые определяют эффективность «сделки»: приоритетность в политике, достаточность финансирования, компетенции институтов ЕС и международное сотрудничество. Эти факторы были выделены в результате

анализа прописанных приоритетов соответствующих официальных документов в рамках подготовки Климатического закона Европы и общих политических дебатов ЕС на тему формулирования климатической политики. Эти факторы интегрируются в глубокий междисциплинарный подход, который включает в себя политическую, экономическую и правовую точки зрения, в том числе нормативное и тарифно-налоговое регулирование. Однако главный акцент мер сводится к решению задач повышения энергоэффективности и энергосбережения в отраслях при обеспечении согласованных действий стран и корпораций, что сложно достигнуть при отсутствии политической воли, гарантий и согласия сторон.

Нормативно-правовые документы ЕС и России не дают достоверного представления о технологиях, способных реализовать идеи климатических проектов, обсуждаемых на информационных площадках и форумах. Поэтому большинство парламентариев выступает за отраслевые направления развития технологий, а также за расширение сферы использования составляющих ПГ в качестве сырья и вторичного продукта.

#### **Анализ сведений технических публикаций**

Сферы применения углекислого газа приводятся в проспекте UNECE «Технологический обзор. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS)» [15] ЕК при ООН, где отмечаются следующие сферы:

- производство газированных напитков, продуктов питания, вкусо-ароматических добавок, декофенирования;
- производство жидкого топлива, удобрений и вторичных химикатов (метанол, угарный газ, мочевины, метан);
- производство пластмасс, поликарбоната и полимеров;
- минерализация (получение карбонатов);
- производство строительных материалов, наполнителей, бетона;
- биологические конверсии (выращивание водорослей, получение топлива и биоугля);
- производство хладагента для холодильных установок и сухого льда;
- медицинские цели и стимуляция дыхания;
- литье металла, изготовление цемента, пескоструйная обработка материалов, газовойспенительные и аэрозольные технологии, зарядка баллончиков/емкостей;
- производство огнетушителей и пожаротушение;
- рециркуляция отработанных газов, регенерация угля и твердых отходов, топлива при сжигании, замещение водяного пара;

- изготовление изоляционных материалов, защитного газа для сварки, сушки и нагрева материалов;
- применение инертирующего агента, инертной среды.

В этой связи важное значение имеют способы улавливания ПГ, их транспортирования и хранения. Если разнообразие процедур транспортирования и хранения определяется составом и агрегатным состоянием газов в условиях реального производства, то улавливание производится известными способами – зонтами или заборниками воздушно-газовой среды, отсосами через вытяжные вентиляторы или дымососы, посредством секционирования и гравитационного разделения потоков с учетом особенностей конкретного производства.

Перспектив UNECE упоминает о «химическом разделении» отходящих газов, показывает портфель технологических задач с указанием этапов «улавливание и выделение CO<sub>2</sub>» и «очистка и сжатие» отходящих газов, ставит задачу «создания оборудования для концентрирования CO<sub>2</sub> из продуктов сгорания», но не раскрывает аспекты разделения отходящих газов и извлечения самого CO<sub>2</sub> [15]. Приводится перечень из 55 реализуемых проектов в разных странах в разной стадии готовности, но ни по одному из этих проектов не приведены параметры их эффективности или экологичности, отсутствуют критерии их оценки и полноты реализации.

Идеи улавливания, хранения и использования углекислого газа приводятся в [16], но не дают понимания о разделении парниковых газов и извлечении CO<sub>2</sub>.

В [17] приводятся примеры проектов по хранению и захоронению углекислого газа в нефтегазовом секторе. Но, как и в предшествующих документах, отсутствует понимание процедур улавливания и разделения отходящих газов с целью извлечения CO<sub>2</sub>.

В отечественной практике на промышленных предприятиях и электростанциях России и стран СНГ широко применялись технологии очистки дымовых/отходящих газов различными способами: фильтрации, орошения и конденсации, а также промышленные технологии рекуперации паров углеводородов при обработке нефти и нефтепродуктов, получения таких газов, как азот, кислород и инертных газов, из воздуха или промышленных выбросов для нужд народного хозяйства. Однако задачи масштабного разделения ПГ и извлечения CO<sub>2</sub> никогда не ставились в свете климатических проектов. Для такой цели доступны некоторые промышленные технологии с применением ферментов, мембран и хемосорбентов – эти методы основаны на принципах аминовой очистки, способствуют внедрению только после промышленных исследований и апробации под конкретные производства [18]:

- выделение CO<sub>2</sub> из дымовых газов в кальциево-карбонатном цикле;
- выделение CO<sub>2</sub> с использованием ферментов;
- мембранные системы для захвата CO<sub>2</sub> до сжигания.

Самый распространенный в отечественной практике метод – орошение и конденсация отходящих газов (применяется как с осушкой и нейтрализацией/обезвреживанием осадка, так и с разбавлением до состояния рассола). Концентрирование углекислого газа можно осуществить в виде углекислоты (водный раствор углекислого газа) при определенных условиях воздействия на этот газ.

Как пример, на рис. 3 иллюстрирована схема получения сжиженной углекислоты из отходящих газов, прошедших фильтрацию от загрязнения и осушку. Процесс получения сжиженной углекислоты позволяет компримировать углекислый газ с достаточной плотностью и относится к промышленным технологиям, т. е. это завод. Отделенные пары азота и его соединений сбрасываются наружу, если не производятся продукты (аммиак, азотные кислоты, нитроглицерин, удобрения и прочие), то есть являются загрязнителями окружающей среды 2 и 3 классов опасности.

На некоторых электростанциях в Великобритании и Германии, работающих на угле, применяется карбонатная технология с производством карбонатных и асбестовых плит. Технология заключается в использовании в качестве хемосорбента оксида кальция, который, взаимодействуя с углекислым газом, образует плохо растворимый в воде карбонат кальция [19], а при наличии оксидов серы и сажи – гипс и асбесты.

Сейчас в мире насчитывается всего 28 крупных промышленных предприятий в 10 странах, где углекислый газ улавливается, захоранивается или используется в качестве исходного сырья [20]. Они суммарно утилизируют около 40 млн т выбросов углекислого газа в год. Основной вклад в этот объем – более 28,5 млн т, вносят предприятия по добыче и переработке природного газа. Остальной объем приходится на предприятия по производству строительных материалов, синтетического и биотоплива, химии удобрений и металлургии. В статье [21] рассмотрены перспективы комплексного подхода к утилизации углекислого газа. На основе анализа современных методов улавливания и переработки углекислого газа предложены варианты объединения промышленных объектов для комплексной утилизации и последующей переработки газа в продукты крупнотоннажной химии.

В публикациях [20, 21] указывается на поглощение CO<sub>2</sub>, но в состав дымовых газов входит порядка 80 % азота и влага (водяной пар), которые в несколько раз снижают эффективность любого сорбента и катализаторов, сокращая их сроки службы.

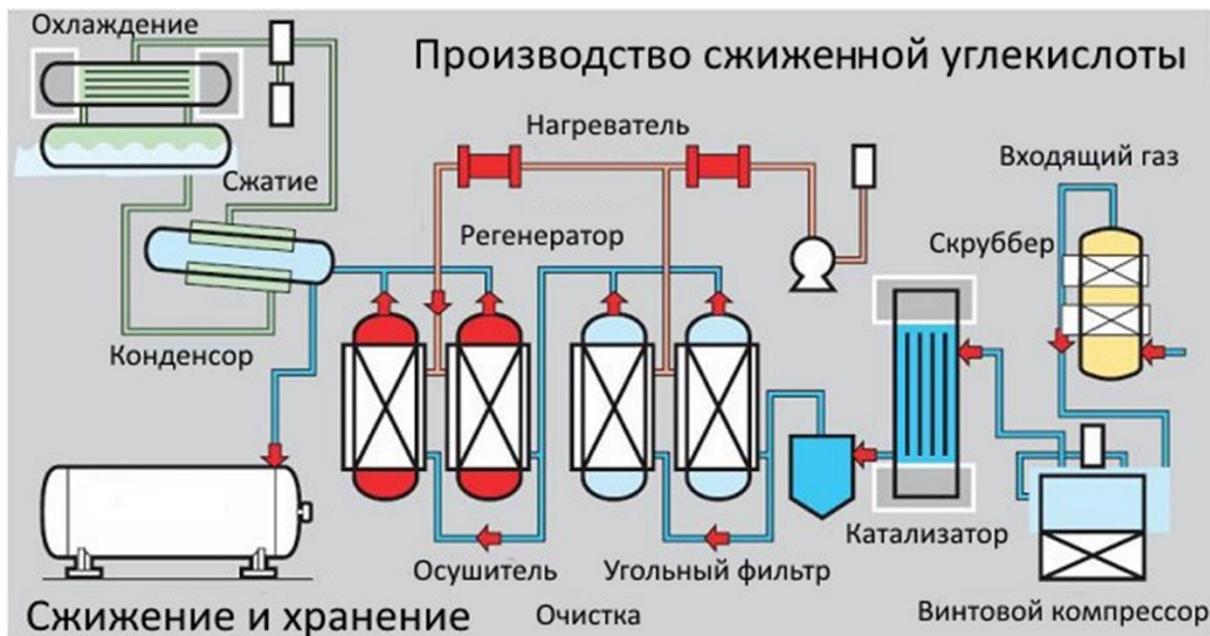


Рис. 3. Схема производства сжиженной углекислоты  
Fig. 3. Scheme for production of liquefied carbon dioxide

Кроме того, остаются не решенными вопросы регенерации, обезвреживания или утилизации использованных материалов и/или отходов в этом аспекте деятельности, не понятен конечный пункт и путь их уничтожения и/или циклического использования, т. к. каждый новый производственный (жизненный) цикл этих веществ порождает новые объемы отходов и требует новых расходных материалов, на производство которых затрачиваются материальные и энергетические ресурсы, образуются новые объемы выбросов и т. д. Эффективность сокращения выбросов ПГ в абсорбционных технологиях – 25–45 %.

Наибольший природный потенциал сокращения углекислого газа в атмосфере путем его поглощения имеет растительность – леса и луга, которые обеспечивают естественный обмен веществ в природе посредством фотосинтеза. Этот процесс также сопровождается частичным поглощением и разложением (нейтрализацией) закиси азота в почвах.

За последние 250 лет из-за изменений в землепользовании значительно сократилось количество биомассы и почвенного углерода, а значит, и запас углерода в наземных экосистемах в целом. В результате в атмосферу поступило большое количество  $\text{CO}_2$ . Резко сократилась площадь лесов. Выпас все большего количества скота в развивающихся странах привел к деградации пастбищ. Все это повлияло на местный климат, и внесло свой отрицательный вклад в глобальные процессы. Для многих территорий угроза опустынивания (из-за вырубки лесов, истощения запасов подземных вод, чрезмер-

ного выпаса скота и т. п.) усиливается последствиями глобального изменения климата (большей частотой засух и ливневым характером выпадающих осадков). Урбанизация способствовала изменению климата: в развитых странах, находящихся в теплом климате, на кондиционирование воздуха расходуется больше энергии, чем на отопление. Борьба с потеплением с помощью кондиционеров приводит к еще большему потеплению [22].

При формировании перечня объектов учета выбросов  $\text{CO}_2$  в справочнике [22] указывается важность оценки выбросов от различных видов транспорта. Данная сфера слабо отражена в множестве методик ввиду недостаточной изученности вопросов, в т. ч. и МГЭИК. Однако вклад таких объектов в суммарный углеродный след города, поселения, иной местности, воздушного и водного пространства может оказаться существенным, что требует принятия мер, снижающих экологическую нагрузку соответствующего вида транспорта. Так, например, в отношении автомобильного транспорта могут рассматриваться экологичные виды топлива (жидкое газомоторное и биотопливо) или переход на электромобили.

Поглощение  $\text{CO}_2$  лесами и сельскохозяйственными землями подлежит отдельному учету. В ряде случаев оно считается эквивалентным выбросам, например, при подсчете выполнения обязательств на уровне стран в первый период обязательств по Киотскому протоколу. Для реализации климатических проектов в сфере землепользования и лесничества следует пользоваться специализированной литературой и нормативными документами [23].

Основными источниками выбросов ПГ в нефтегазовом секторе являются процессы добычи углеводородов, продувки, испытаний и тампонирувания скважин, технологической обработки нефти и газа, сброса попутных газов, выбросы при перевалке, факельное сжигание и энергетическое сжигание в печах и котлоагрегатах, на электростанциях и в дизельгенераторах, а также процедуры обращения с отходами, несанкционированные сбросы и аварии оборудования, в т. ч. пожары. Эти источники указывают на материальные потери ресурса, прежде всего, а значит подлежат постоянному контролю и учету [24–26]. В документах отмечаются следующие препятствия: пробелы в данных о выбросах, недостаточная открытость данных, отсутствие понимания о потерях (потреблении) энергии, вопросы доступности места выбросов, существующие контрактные условия, время простоя, необходимое для модернизации технологии, или неясная политика. В то же время в нефтегазовом секторе существует целый ряд различных источников выбросов, которые обычно классифицируются на сбрасываемые (преднамеренные выбросы) или на летучие выбросы (непреднамеренные выбросы/утечки), что сказывается на балансах топливно-энергетического и материально-сырьевых потоков, и как следствие – на оценке эффективности экологических мероприятий. В статье [25] приводятся результаты исследований по закачке дымовых газов, технологические характеристики систем, сведения о выбросах (полный состав выбросов не приводится, что создает сомнительное впечатление об эффективности технологий).

Основные меры по сокращению выбросов ПГ в публикациях [24–26] направлены на ликвидацию процедур сброса попутных газов и факельного сжигания, обеспечение герметичности оборудования, улавливание и максимально полный возврат ресурса в материально-сырьевой поток, утилизацию нетоварных углеводородсодержащих продуктов/сырья и отходов на собственные нужды организации и в технологии производства, повышение энергоэффективности и энергосбережение эксплуатируемых объектов. Представлены сведения о некоторых технических решениях. В качестве меры по сокращению выбросов приводится вариант захоронения CO<sub>2</sub> в породах/пластах, утилизации посредством закачки шлаковых и буровых отходов в скважины, смеси использованных вод с дымовыми газами и отходами добычи. Очевидно, что на территориях вечной мерзлоты и в Арктике естественные холодные температуры способствуют охлаждению дымовых газов, их конденсации и сжатию. Тогда как в теплых климатических условиях потребуются затратить значительное количество электроэнергии на производство холода, прежде чем охла-

дить и сжать дымовые газы, после чего закачивать в скважины. Учитывая, что в составе дымовых газов содержится порядка 80 % азота, пропорциональное количество электроэнергии, и топлива на ее производство, будет затрачено на весь этот цикл (т. е. равноценно закачиванию атмосферного воздуха в скважины). Не решена проблема отделения азота.

Исследование [27] позволяет утверждать, что не для всех технологий сжигания топлива выбросы парниковых газов можно однозначно оценить по содержанию углерода в исходном топливе, применяя методические коэффициенты выбросов CO<sub>2</sub>-эквивалента, т. к. часть углерода остается в шлаках и отложениях оборудования в виде кокса и сажи. В то же время различные варианты сокращения выбросов могут привести к повышению либо снижению объемов выбросов иных загрязняющих веществ, к образованию отходов, поэтому при их рассмотрении необходимо учитывать полное воздействие на окружающую среду и анализировать ограничения применимости той или иной технологии, техники.

Отдельно надо обратить внимание на прямое использование дымовых газов как непосредственного рабочего агента (среды) в ряде технологических процессов. Например, документами МАРПОЛ [28, 29] зафиксировано применение дымовых газов на очистку продуктовых и нефтезагрязненных танков, емкостей и трубопроводов на судах, где дымовые газы отбираются непосредственно от котлов, дизельгенераторов, инсинераторов и котлов-утилизаторов через отборные жалюзи/люки и подаются по системе трубопроводов (манифольдам) в танки. Горячие газы прогревают их, разжижают шлаки и конденсируются непосредственно в шлам/отходы, подлежащие удалению и/или обезвреживанию. Вытесняя кислород, газы дезинфицируют внутренние полости и создают инертную среду, пригодную для закачки нефти и нефтепродуктов, масла и топлива. Аналогичный подход применяется при очистке и наполнении топливных резервуаров, угольных транспортеров (прогревают уголь) на электростанциях, объектах железнодорожного транспорта, нефтехимических и промышленных предприятий, в сельском хозяйстве для дезинфекции и сушки сельхозпродукции, для орошения парникового хозяйства, сушки строительных материалов, руды и древесины, при производстве металлозаготовок и керамической продукции, строительных конструкций. Открытые способы распыления дымовых газов применяются для дезинфекции полей и плантаций от насекомых-вредителей.

Наиболее изученной областью сокращения выбросов является энергетика: меры, направленные

на повышение энергоэффективности и энергосбережения объектов, всегда обеспечиваются снижением потребления исходного топлива и, как следствие, – снижением выброса продуктов сгорания. Например, улучшение теплозащитных свойств и конструкции зданий и сооружений снижает их теплотребление, применение энергоэкономичного оборудования и энергосберегающего освещения снижает потребление электроэнергии, оптимизация тепловых нагрузок и изменение конфигурации системы теплоснабжения снижает потери теплосетей и потребление топлива котельными, повышение эффективности котельных снижает потребление топлива и т. д.

Подавляющее большинство тепловых схем котельных типизированы и обеспечены стандартами проектирования так же полноценно, как и схемы электроснабжения и организации электрической генерации, с учетом требований безопасности при эксплуатации таких систем, сетей и оборудования, и разновидности потребляемого топлива. Источники генерации тепловой и электрической энергии, сжигающие топлива, как правило, оснащены надлежащими системами или устройствами очистки выбросов, отдельные элементы которых позволяют управлять выбросами в зависимости от режима эксплуатации, степени нагрузки и погодных условий.

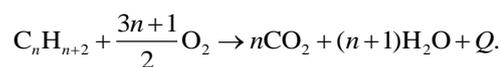
Главный принцип гарантированного энергообеспечения потребителей: при любом вмешательстве в схему организации источника генерации не допускается (запрещается) ухудшение требований к надежности и безопасной эксплуатации данного оборудования. Такое вмешательство должно быть подтверждено техническим, экономическим и/или экологическим обоснованием, которое служит целям повышения энергоэффективности и энергосбережения. Руководствуясь этим принципом гарантированного энергообеспечения, можно рассматривать некоторые способы снижения выбросов вредных/загрязняющих веществ (включая ПГ) от топливо-сжигающего оборудования.

В этой связи рассмотрим возможности использования теплоты уходящих (дымовых) газов на практических примерах сжигания топлива в котельных и ТЭЦ, позволяющие снизить выбросы ПГ.

В сжигании топлива участвуют непосредственно само топливо и воздух. В состав воздуха входит азот (78 %) и кислород (21 %), на долю других компонентов приходится 1 % воздуха. В состав основных компонентов топлива входят: углерод (С) и водород (Н), образующие различные углеводородные соединения, а также в некоторых малых долях присутствуют кислород (О), сера (S) и азот «топливный» (N).

Горение топлива – это сложный химический процесс, заключающийся в окислении горючих веществ топлива с кислородом воздуха и сопровождающийся выделением тепла с образованием пламени и продуктов сгорания. Горение углеводородов приводит к разрыву всех связей С–С и С–Н с выделением большого количества тепла.

Уравнение реакции горения углеводородов на примере алканов выглядит следующим образом:



Из этого уравнения следует, что с увеличением числа углеродных атомов (n) в алкане увеличивается количество кислорода, необходимого для его окисления. При горении алканов, содержащих от 5 до 15 атомов углерода (жидкие вещества), кислорода, содержащегося в воздухе, может оказаться недостаточно для их полного окисления до CO<sub>2</sub>. Тогда образуются продукты частичного окисления: угарный газ и сажа.

Горение природного газа, содержащего от 1 до 4 атомов углерода (основной компонент – метан, также присутствуют пропан, бутан и этан), происходит аналогично – с образованием двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>) и водяного пара (H<sub>2</sub>O). Уравнение реакции горения можно представить на примере окисления метана:



Содержание СО в продуктах сгорания обычно не превышает сотых долей процента (менее 0,025 %). Концентрация CO<sub>2</sub> в уходящих газах существенно выше и может достигать 10–14 % в зависимости от вида сжигаемого топлива и условий горения [30]. Кроме этого, в процессе сжигания получается ряд химических соединений, образующихся вследствие окисления различных составляющих топлива и азота воздуха. Существенную их часть составляют оксиды азота NO<sub>x</sub> и серы SO<sub>x</sub>. Оксиды азота образуются за счет окисления азота воздуха и азота, содержащегося в топливе. Основная доля образовавшихся в топках котлов NO<sub>x</sub>, а именно 96÷100 %, приходится на монооксид азота NO. Диоксид азота NO<sub>2</sub> образуется в значительно меньших количествах – до 4 %. В то же время быстрое перемешивание горячих и холодных областей в турбулентном пламени может привести к появлению относительно больших концентраций диоксида азота в холодных зонах потока. Кроме этого, при определенных условиях частичная эмиссия NO<sub>2</sub> происходит в газоходах (при T>600 °С) и может достигать заметных размеров. Закись азота N<sub>2</sub>O, образующаяся при сжигании топлив, является кратковременным промежуточным веществом, которое разрушается при температурах около 500 °С

и преобразуется в другие оксиды азота. N<sub>2</sub>O практически отсутствует в продуктах сгорания за котлами.

Содержащаяся в топливе сера является источником образования оксидов серы: сернистого SO<sub>2</sub> и серного SO<sub>3</sub> ангидридов. Суммарный массовый выброс SO<sub>x</sub> зависит только от содержания серы в топливе, а их концентрация в дымовых газах – еще и от коэффициента расхода воздуха. Как правило, доля SO<sub>2</sub> составляет 97–99 %, а доля SO<sub>3</sub> – 1–3 % от суммарного выхода SO<sub>x</sub>. Фактическое содержание SO<sub>2</sub> в уходящих из котлов газах колеблется от 0,08 до 0,6 %, а концентрация SO<sub>3</sub> – от 0,0001 до 0,008 %. При сжигании природного газа содержание оксидов серы почти отсутствует или измеряется несколькими миллионными долями, ppm. Среди вредных компонентов дымовых газов особое место занимают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Многие ПАУ обладают высокой канцерогенной и/или мутагенной активностью, активизируют фотохимические смоги в городах, что требует строгого контроля и ограничения их эмиссии. В то же время некоторые ПАУ (фенантрен, флуорантен, пирен и ряд других) физиологически почти инертны и не являются канцерогенно-опасными в силу малых концентраций (суммарно менее 0,01 %).

ПАУ образуются в результате неполного сгорания углеводородных топлив. Полное выжигание ПАУ происходит при температурах свыше 1150 °C и может достигать 1500 °C для отдельных разновидностей. Снижение температуры горения менее 1200 °C влечет недожог топлива и увеличение содержания угарного газа. Вследствие большого количества разных ПАУ в дымовых газах и трудно-

сти измерения их концентраций принято уровень канцерогенной загрязненности продуктов сгорания и атмосферного воздуха оценивать по концентрации наиболее сильного и стабильного канцерогена – бенз(а)пирена (Б(а)П) C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>.

В табл. 1 приводится примерный состав выбросов при факельном сжигании топлива. При проектировании котлоагрегатов (печей и прочих теплогенераторов) и горелочных устройств, как правило, создаются конструкции, которые обеспечивают максимально полное сгорание на каждый вид топлива. Их правильная эксплуатация позволяет снижать выброс вредных веществ в 10–100 раз. При необходимости агрегаты дополнительно оснащаются экономайзерами (теплообменниками) и устройствами очистки выбросов.

Для оценки полного состава выбросов дымовых газов следует обратить внимание на ряд влияющих факторов, помимо состава исходного топлива: режимы и условия эксплуатации, мощность и особенности конструкции котельно-печного оборудования, достаточность наладки агрегатов и настройки горелочных устройств по расходу воздуха, и пр. Экспериментальные данные будут существенно различаться [30, 31]. В табл. 2 приведены данные о выбросах на примере сжигания природного газа в промышленных и бытовых котлах. В отличие от бытовых, промышленные котлы систематически подвергаются режимно-наладочным испытаниям и контролю выбросов, обслуживаются квалифицированным персоналом и, соответственно, имеют наибольшую полноту сгорания топлива, о чем свидетельствует содержание кислорода, углекислого и угарного газов. В бытовых котлах поддерживается повышенный расход (избыток) воздуха.

**Таблица 1.** Примерная концентрация вредных веществ в продуктах сгорания при факельном сжигании органических топлив

**Table 1.** Approximate concentration of harmful substances in combustion products during flaring of fossil fuels

Вещество Material	Концентрация, мг/м <sup>3</sup> Concentration, mg/m <sup>3</sup>		
	Природный газ Natural gas	Мазут Fuel oil	Уголь Coal
Оксиды азота/Nitrogen oxides, NO <sub>x</sub> (эквивалент/equivalent NO <sub>2</sub> )	200÷1200	300÷1000	350÷1500
Диоксид серы/Sulfur dioxide, SO <sub>2</sub>	–	2000÷6000	1000÷5000
Триоксид серы/Sulfur trioxide, SO <sub>3</sub>	–	4÷250	2 ÷100
Угарный газ/Carbon monoxide, CO	10÷125	10÷150	15÷150
Бенз(а)пирен/Benz(a)pyrene, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	(0,1÷1, 0)·10 <sup>-3</sup>	(0,2÷4,0)·10 <sup>-3</sup>	(0,3÷14)·10 <sup>-3</sup>
Твердые частицы/Solids	–	<100	150÷300

**Таблица 2.** Состав выбросов при сжигании природного газа

**Table 2.** Composition of emissions from natural gas combustion

Выбросы/Emissions, %	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N	CO	NO <sub>x</sub>
Бытовые котлы/Domestic boilers	12–18	6–3	6–8	76–81	0,5–1,2	≤200 ppm
Промышленные котлы/Industrial boilers	4,1–7,2	10,4–12	5,4–6,1	75,6–77,8	≤ 0,1	–

Данные табл. 2 указывают на относительно узкие диапазоны содержания водяного пара (5,4–8 %) и азота (75,6–81 %) в выбросах при сжигании природного газа. При этом содержание азота в дымовых газах сохраняется примерно таким же, как и в составе воздуха. В то же время можно утверждать, что выход углекислого газа будет различаться на разных режимах эксплуатации котлов в зависимости от регулирования коэффициента расхода воздуха: при понижении расхода воздуха доля свободного кислорода в дымовых газах сокращается, а доля углекислого газа возрастает.

Из уравнения реакции следует, что для окисления одной молекулы метана необходимо две молекулы кислорода, т. е. для полного сжигания 1 м<sup>3</sup> метана необходимо 2 м<sup>3</sup> кислорода. В молярном выражении на 1 объем метана приходится 2 объема кислорода, и при этом образуется 1 объем углекислого газа и 2 объема водяного пара. С учетом состава воздуха для реакции горения метана потребуется воздуха по объему в  $100/21=4,76$  ( $\approx 5$ ) раза больше, чем кислорода (около 4 объема приходится на азот). Таким образом, для сжигания 1 м<sup>3</sup> метана необходимо  $2 \times 4,76=9,52$  м<sup>3</sup> воздуха, включая 7,52 объема азота. Из общего объема дымовых газов 2/10,52 доли приходится на водяной пар – до 19 %. При сжигании более тяжелых углеводородов (жидкого нефтяного топлива) образование влаги снижается, а углекислого газа возрастает, т. к. в исходном топливе уменьшается концентрация водорода по мере роста углеродных цепочек.

Теплота, которая выделяется при сгорании топлива, называется низшей теплотой сгорания топлива (LHV – lower heating value). Водяной пар, образующийся при сгорании топлива, имеет скрытую теплоту конденсации (парообразования) – теплота фазового перехода, изменяющего агрегатное состояние воды. Сумма низшей теплоты сгорания и теплоты фазового перехода является высшей теплотой сгорания (HHV – higher heating value).

Количество выделяемой теплоты при конденсации водяных паров зависит от вида топлива и определяется как разность между высшей и низшей теплотой сгорания топлива (табл. 3) [32].

**Таблица 3.** Величины высшей и низшей теплоты сгорания для различных видов топлива

**Table 3.** Values of the highest and lowest combustion heat for various types of fuel

Топливо/Fuel	LHV (ккал, kcal)	HHV (ккал, kcal)	Разница Difference (%)
Дизель/Diesel	10,6 кг/кг	10,21 кг/кг	3,82
Керосин/Kerosene	10,7 кг/кг	10,29 кг/кг	3,98
Печное топливо Heating oil	10,2 кг/кг	9,76 кг/кг	4,51
Метан/Methane	9,53 л/л	8,57 л/л	11,2
Пропан/Propane	23,85 л/л	21,6 л/л	10,42
Бутан/Butane	30,50 л/л	28,3 л/л	7,77

Применение конденсационного оборудования (котлов, экономайзеров) позволяет извлечь часть скрытой теплоты.

Для эффективной работы конденсационных котлов на природном газе требуется соответствие температурного графика котла режимам теплопотребления в течение длительного периода, когда температура обратного теплоносителя не будет превышать точки росы (55 °С для природного газа) с запасом в 5–10 градусов, и наличие канализации/сборника для отвода конденсата с pH 3,5–4,5. Котельные на дизельном топливе с конденсационными экономайзерами требуют поддержания температуры конденсации не выше 45 °С. Причем количество конденсата от сжигания дизтоплива относительно невелико (можно отводить в сборник для нейтрализации), а эффект от конденсационного контура 1–3 %. При неисполнении этих условий обратная температура теплоносителя повышается, а системы выходят в режим «перетопа», что сопровождается потерями скрытой теплоты конденсации (не достигается фазовый переход) и снижением КПД агрегатов, как следствие – перерасход топлива. Тем не менее наиболее эффективно конденсационные системы показывают себя при сжигании газового топлива при наличии низкотемпературных потребителей.

В публикациях [33, 34] приводятся схемы организации и сведения о возможности использования теплоты конденсации водяных паров от дымовых газов в котельных и мини-ТЭЦ с применением конденсационных теплообменников для собственных нужд, подогрева дутьевого воздуха. КПД котельных можно увеличить, но при этом авторы отмечают плюсы и минусы в обустройстве таких систем. Установки позволяют достигнуть положительного экологического эффекта и снизить концентрации вредных выбросов, но не всегда ожидаемые показатели соответствуют расчетным значениям, а выход конденсата в несколько раз ниже проектного. Снижение выброса углекислого газа чаще требует повышения расхода воздуха, что сопровождается ростом выхода оксидов азота и некоторым понижением КПД. Но при этом отмечается, что именно сконденсированная влага содержит кислотные осадки азотных и серных соединений, углекислоты и твердых частиц, очищая выбросы в атмосферу.

Обустройство конденсационных систем требует поиска дополнительных технических решений сброса низкопотенциального тепла с учетом организации схем теплоснабжения и режимов работы теплового оборудования, наличия потребителей с низкотемпературной нагрузкой. В качестве таких решений могут рассматриваться варианты охлаждения поверхностей теплообмена природными источниками холода (например, омыв в аквато-

рии рек, морей) и рассеивания тепла (например, обдув ветрами), а также в системах снеготаяния, антиобледенения, орошения, искусственных водопадов, фонтанов, ливневого стока и т. п.

В публикации [35] обсуждаются типовые решения утилизации тепла дымовых газов и риски возникновения коррозии дымоудаляющих конструкций и газоходов. Автор акцентирует внимание на комплексном подходе к решению проблем конденсации при повышении КПД котлоагрегатов, экономии топлива и определяет аспекты задач: поиск возможности полезной утилизации тепла дымовых газов, особенностей (режимов) использования и продолжительности периода использования полученной тепловой энергии, превышения предельно допустимой концентрации выбросов оксидов азота и серы (на фоне конденсации части выбросов концентрации других загрязнителей возрастают), способ нейтрализации конденсата и вариантов его дальнейшего использования.

В [36] описаны протекающие в конденсационных установках процессы тепло- и массообмена, особенности работы теплообменников и методы расчета этих установок, основанные на экспериментальных исследованиях и моделировании теплофизических свойств отходящих газов и влажного воздуха. Отходящие газы – это многофазный поток, в котором происходят диффузионные процессы переноса вещества и теплоты с нестабильными параметрами, изменяющимися агрегатное состояние компонентов, зависящими от множества факторов, что объясняет расхождение расчетных и экспериментальных данных.

В [37] приводятся сведения о потенциалах выбросов г. Москвы как мегаполиса, влияющего на климатические условия, приводятся расчеты, обосновывающие количественный выход углекислого газа и водяного пара при сжигании природного газа на ТЭЦ и дизельного топлива от автотранспорта, – основные источники загрязнения атмосферы в мегаполисе. Расчеты соответствуют теории горения [38] и свидетельствуют о возможности глубокой конденсации газов при температурах 15–25 °С. Отечественная промышленность выпускает достаточно широкий спектр котлов-утилизаторов и экономайзеров для оснащения электростанций и промышленных предприятий, обеспечивающих доступный уровень конденсации дымовых газов.

При конденсации влаги в экономайзерах (в конденсационных агрегатах) обычно половина водяного пара осаждается, а другая половина уходит в диффузионном состоянии вместе с дымовыми газами. В этом случае осаждение до 50 % влаги происходит при положительных температурах ниже точки росы (в диапазоне от 25 до 55 °С в зависимости от эффективности теплообменника и режимов конденсации), а другая часть вымораживается уже в атмосфере при

непосредственном контакте с холодным воздухом, при отрицательных температурах. В диапазоне от 15 до 25 °С может конденсироваться до 90 % влаги, но эти режимы технически сложно осуществить и поддерживать в современных конденсационных агрегатах. Конденсация водяных паров сопровождается охлаждением и удалением части углекислого газа и оксидов азота в кислотном состоянии или водного кислого раствора. Причем конденсация углекислого газа начинается раньше, при температурах выше 80 °С, но протекает медленнее.

Сгорание природного газа, содержащего не менее 92 % метана, схоже с горением самого метана: среднее содержание влаги в продуктах сгорания оценивается в 1,6 кг на 1 м<sup>3</sup> природного газа. При полной конденсации влаги из отходящих газов содержание азота превысит 85 %, а при удалении углекислоты – 92 %.

При конденсации до 50 % влаги количество азота в отходящих газах возрастает до 82,7 % (максимум на метане) в стехиометрических реакциях ( $\alpha=1$ ), а при увеличении коэффициента расхода воздуха до 1,4 содержание азота снижается до 80,3 % на бутане. На природном газе этот диапазон составляет порядка 80,4–82,6 %. Аналитические расчеты коррелируют с экспериментальными данными в технической литературе с вероятным отклонением в пределах 1 %, что сопоставимо с содержанием инертных газов в воздухе и в продуктах сгорания.

Законодательно установленный нижний предел выбросов CO<sub>2</sub>-эквивалента в размере 50000 т углекислого газа в год обязывает предприятия вводить отчетность о выбросах ПГ.

Для выброса 50000 т CO<sub>2</sub>-эквивалента в год потребуется сжечь 27,85 млн м<sup>3</sup> природного газа (табл. 4), выработавшего 921,4 ТДж теплоты.

На примере исследований НИУ «МЭИ» при плотности природного газа 714 г/м<sup>3</sup> укажем содержание водорода – 178,5 г, углерода – 535,5 г. Для окисления водорода потребуется 1428 г кислорода. Значит, при сгорании 1 м<sup>3</sup> природного газа образуется ≈1,6 кг водяного пара, при этом образуется около 2 кг углекислого газа.

Следовательно, при сжигании 27,85 млн м<sup>3</sup> природного газа образуется 44565,5 т водяного пара, который содержит 102,5 ТДж скрытой теплоты (удельная теплота парообразования для воды равна 2300 кДж/кг), или 11,12 % по отношению к нижней теплоте (921,4 ТДж). Тогда конденсация половины этого объема пара высвободит 51,25 ТДж теплоты, или 5,56 % дополнительной тепловой энергии.

Параметры расчета количества распространенных видов сжигаемого топлива, выбросы которых составляют 50000 т CO<sub>2</sub>-эквивалента, приведены в табл. 4. Учитывая порядок расчета количества выбросов по данным о количестве сжигаемого топлива, согласно

известным методикам МГЭИК, в обратной последовательности рассчитывается количество исходного топлива для осуществления выброса в объеме 50000 т  $\text{CO}_2$ -эквивалента. В пересчете на год по осредненному периоду времени за 4 года (в секундах) можно оценить величину минимальной востребованной мощности источника генерации (в МВт) выбросов, а задаваясь конкретным диапазоном загрузки мощности – суммарную тепловую мощность объекта генерации. В частности, для объекта генерации, сжигающего природный газ, суммарная установленная мощность источника с учетом коэффициента годовой загрузки 0,25–0,4 составит от 73 до 117 МВт. А, например, на нефтяных топливах –  $35 \pm 1$  МВт с коэффициентом загрузки 0,6. Такой подход позволяет объективно оценивать потенциальную способность оборудования к массовым выбросам и планировать меры по их контролю, мониторингу. Удельная теплота сгорания на 1 т  $\text{CO}_2$  (табл. 4, столбец 8) свидетельствует о том, что природный газ имеет наибольшую теплоту сгорания с минимальным выбросом  $\text{CO}_2$ , но при его сжигании образуется и наибольшая доля водяных паров, обладающих скрытой теплотой конденсации (парообразования).

Помимо скрытой теплоты конденсации, дополнительно часть конвективной теплоты отдают остывающие (охлаждаемые) компоненты дымовых газов (азот, углекислый газ и водяной пар до конденсации) в диапазоне положительных температур охлаждения выше точки росы. Следует учесть, что температуры дымовых газов при сжигании жидкого нефтяного топлива обычно существенно выше температур отходящих газов при сжигании газообразного. Однако при сжигании нефтяных топлив образуется в 2–5 раз меньше влаги, чем при сжигании природного газа [39–41]. Поэтому энергосберегающий эффект при конденсации дымовых газов на нефтяном топливе значительно ниже, чем от природного газа, но при этом больше теплоты можно снять выше точки росы при их охлаждении.

Эффективность поглощения углекислого газа можно оценить следующим образом [42]. Для поглощения углекислого газа применяются сорбенты, из которых самыми доступными и недорогими являются: гранулированный мел (цены выше 2800 р./т), техническая известь (цены выше 1800 р./т), цеолиты природные и искусственные (цены выше 1400 р./т). Поглощительная способность таких сорбентов составляет от 7 до 33 кг углекислого газа на 100 кг сорбента, в среднем – по 20 кг газа на 100 кг сорбента, т. е. 1 к 5. Следовательно, для поглощения 1 т  $\text{CO}_2$  потребуется 5 т сорбента стоимостью на 7000...14000 р. и более. По курсу 70 р. за 1 \$ США затраты только на покупку сорбента для поглощения 1 т  $\text{CO}_2$  составят 100–200 \$ США, что уже превышает оценки Международного энергетического

агентства согласно докладу МЭР России 2021 г. [38]. Сопоставим количества топлива, при сжигании которых образуются выбросы 1 т  $\text{CO}_2$ , на примерах: нефти – 0,325 т, дизельного топлива – 0,318 т, природного газа – 0,557 тыс.  $\text{м}^3$ . На 50000 т  $\text{CO}_2$  эти соотношения пропорционально увеличатся.

В удельных значениях для полного поглощения  $\text{CO}_2$  при сжигании 1 т нефти потребуется 15,37 т сорбента, на 1 т дизельного топлива – 15,73 т сорбента, на 1 тыс.  $\text{м}^3$  природного газа – 8,98 т сорбента. Затраты в стоимости сорбента составят соответственно: 21521,5 р. на 1 т нефти, 22025,5 р. на 1 т дизельного топлива, 12565,8 р. на 1 тыс.  $\text{м}^3$  природного газа. Очевидно, что для столь масштабного применения поглотителей потребуется строительство складов/хранилищ и транспортных узлов для доставки огромного количества сорбентов и их вывоза на утилизацию, а также системы сооружений эксплуатационного хозяйства (причем вопросы реконструкции энергетического оборудования и окупаемость капиталовложений в данном случае даже не рассматриваются).

Текущие цены (январь 2023 г.) на топлива в России: нефть – 20...25 тыс. р./т, дизельное топливо – 45...55 тыс. р./т, природный газ – 4...7 тыс. р. за 1000  $\text{м}^3$ . По отношению к стоимости топлива затраты на сорбенты для поглощения  $\text{CO}_2$  сопоставимы с ценой на 1 т нефти, примерно в 2,3 раза дешевле на 1 т дизельного топлива и в 2–3 раза превышают цену на 1000  $\text{м}^3$  природного газа.

Очевидно, что такие расходы существенно изменят структуру тарифов на тепловую и электрическую энергии и инвестиционную стратегию любой генерирующей компании, транспорта или промышленного предприятия. На производство половины выработки тепла и электроэнергии в России расходуется около 500 млрд  $\text{м}^3$  природного газа.

Другая половина выработки энергии обеспечивается иными источниками, в том числе с использованием нефтяных топлив и угля, атомными и гидроэлектростанциями.

Для поглощения 50 % углекислого газа из конденсата, образующегося при сжигании природного газа, в России потребуется около 2,25 млрд т цеолита в год, стоимость которого превышает 3,1 трлн р. Для сравнения мировая добыча цеолитов составляет всего лишь 3 млн т/год. Основные разведанные запасы природных цеолитов сосредоточены в Европе, России, Японии и США. Объем разведанных запасов природных цеолитов в странах СНГ составляет порядка 1,6 млрд т. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что разведанных в России месторождений цеолитов недостаточно даже для поглощения годового выброса части ПГ, образующихся при сжигании только природного газа, а сама идея Парижского соглашения о поглощении парниковых газов является утопией.

**Таблица 4.** Количество распространенных видов сжигаемого топлива и мощности генерации для осуществления выброса 50000 т CO<sub>2</sub>-эквивалента

**Table 4.** Number of common types of burned fuel and generation capacity for emission of 50000 tons of CO<sub>2</sub> equivalent

Топливо Fuel	Коэффициенты перевода Conversion coefficients			Кол-во топлива на 50000 т CO <sub>2</sub> в год Quantity of fuel per 50000 tons of CO <sub>2</sub> per year	Низшая теплота сгорания Lower heating value	Удельная теплота сгорания на 1 т CO <sub>2</sub> Specific heating value per 1 ton of CO <sub>2</sub>	Мощность источника (не менее) Unit power (not less)	Общая мощность источника с учетом коэффициента загрузки, МВт Total unit power, taking into account the load factor, MW			
	Единица измерения Units	т у.л./т (тыс. м <sup>3</sup> ) t e.f./t (ths. m <sup>3</sup> )	ТДж/тыс. т (млн м <sup>3</sup> ) TJ/ths. t (mln. m <sup>3</sup> )					т (тыс. м <sup>3</sup> ) t (ths. m <sup>3</sup> )	ТДж (в год) TJ (per year)	ГДж/т CO <sub>2</sub> GJ/t CO <sub>2</sub>	МВт MW
Нефть (включая промысловый газоконденсат) Oil (including field gas condensate)	т/т	1,43	41,9	16 262,8	681,4	13,64	21,593	26,99	35,99	53,98	86,37
Природный газовый конденсат Natural gas condensate		1,508	44,2	17 636,4	779,5	15,58	24,702	30,88	41,17	61,75	98,81
Газ попутный нефтяной (нефтяные месторождения) Associated petroleum gas (oil fields)	тыс. м <sup>3</sup> ths. m <sup>3</sup>	1,154	33,8	24 478,8	827,4	16,55	26,218	32,77	43,70	65,55	104,87
Газ попутный нефтяной (газоконденсатные месторождения) Associated petroleum gas (gas-condensate fields)		1,154	33,8	26 419,2	893,0	17,87	28,297	35,37	47,16	70,74	113,19
Газ попутный нефтяной (газовые месторождения) Associated petroleum gas (gas fields)		1,154	33,8	26 745,4	904,0	18,10	28,646	35,81	47,74	71,61	114,58
Керосин/Kerosene	т/т	1,47	43,1	16 120,2	694,8	13,90	22,016	27,52	36,69	55,04	88,07
Дизель/Diesel		1,45	42,5	15 890,7	675,4	13,50	21,401	26,75	35,67	53,50	85,60
Мазут топочный/Fuel oil		1,37	40,2	16 077,7	646,3	12,92	20,481	25,60	34,13	51,20	81,92
Мазут флотский/Naval fuel oil		1,43	41,9	15 403,1	645,4	12,91	20,451	25,56	34,09	51,13	81,80
Топливо печное бытовое Domestic stove fuel		1,45	42,5	15 190,6	645,6	12,92	20,458	25,57	34,10	51,14	81,83
Газ сжиженный нефтяной Liquefied petroleum gas		1,57	46	17 214,7	791,9	15,84	25,093	31,37	41,82	62,73	100,37
Пропан/Propane		1,57	46	17 030,6	783,4	15,67	24,825	31,03	41,37	62,06	99,30
Бутан/Butane		1,57	46	17 498,4	804,9	16,11	25,507	31,88	42,51	63,77	102,03
Пропан и бутан сжиженные, газы углеводородные и их смеси сжиженные Liquefied propane and butane, hydrocarbon gases and liquefied mixtures		1,57	46	17 214,7	791,9	15,83	25,093	31,37	41,82	62,73	100,37
Уголь (средние значения) Coal (average values)		0,644	18,88	28 126,8	531,1	10,62	16,830	21,04	28,05	42,08	67,32
Газ природный/Natural gas	тыс. м <sup>3</sup> ths. m <sup>3</sup>	1,129	33,08	27 853,4	921,4	18,41	29,197	36,50	48,66	72,99	116,79
Газ сжиженный/Liquefied gas	т/т	1,57	46	19 301,3	887,9	17,74	28,135	35,17	46,89	70,34	112,54
Биодизель/Biodiesel		0,921	27	26 226,5	708,1	14,14	22,439	28,05	37,40	56,10	89,76

### Заключение

Согласно положениям, принятым в рамках Парижского соглашения, развитые страны обязывались оказать помощь финансовую и технологическую развивающимся странам в целях сокращения выбросов ПГ, а также содействие в решении продовольственных проблем. Однако законодательно

принятые Евросоюзом в 2020–2022 гг. механизмы «Зеленой сделки» направлены на обогащение стран ЕС и противоречат целям Парижского соглашения. Технологическая несостоятельность положений Парижского соглашения прослеживается в пункте 1 статьи 4: «Для достижения долгосрочной глобальной температурной цели, установленной в ста-

ть 2, Стороны стремятся как можно скорее достичь глобального пика выбросов парниковых газов, признавая, что достижение такого пика потребует более длительного времени у Сторон, являющихся развивающимися странами, а также добиться впоследствии быстрых сокращений в соответствии с наилучшими имеющимися научными знаниями, в целях достижения сбалансированности между антропогенными выбросами из источников и абсорбцией поглотителями парниковых газов во второй половине этого века на основе справедливости и в контексте устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты» [43]. Абсорбционные системы энергоёмкие и существенно дороже адсорбционных. Конденсация парниковых газов яв-

ляется адсорбционной технологией, доступной для применения.

Изложенное позволяет сделать вывод о несостоятельности положений Парижского соглашения по климату в аспекте абсорбционного поглощения парниковых газов без каких-либо компенсирующих мер, тарифного и законодательного регулирования. Таким образом, область технических решений следует искать в мероприятиях по повышению энергетической и экологической эффективности сжигания топлива, ресурсо- и энергосбережения, рационального использования ресурса отходящих (дымовых) газов и образующихся отходов, а также развития направления восстановления и повышения плодородия почв, реабилитации болот.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. URL: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/gpbaum\\_en.html](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/gpbaum_en.html) (дата обращения 09.03.2023).
2. Guidelines for the preparation of national communications by Parties included in Annex I to the Convention, Part I: UNFCCC reporting guidelines on annual inventories (following incorporation of the provisions of decision 13/CP.9). URL: <https://unfccc.int/documents/3689> (дата обращения 09.03.2023).
3. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer\\_2006GLs.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
4. Sixth Assessment Report (AR6) IPCC. URL: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (дата обращения 09.03.2023).
5. The Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения 09.03.2023).
6. The Working Group II contribution, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (дата обращения 09.03.2023).
7. The Working Group III contribution, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/> (дата обращения 09.03.2023).
8. The Long-Term Strategy of the United States. Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/US\\_accessibleLTS2021.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/US_accessibleLTS2021.pdf) (October Long Term Strategy – Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050 (unfccc.int)) (дата обращения 09.03.2023).
9. The impact of the global methane pledge, November 2021. URL: [https://climateanalytics.org/media/the\\_impact\\_of\\_the\\_global\\_methane\\_pledge\\_final.pdf](https://climateanalytics.org/media/the_impact_of_the_global_methane_pledge_final.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
10. The Global Methane Pledge and 1,5 °C. URL: <https://www.globalmethanepledge.org/> (дата обращения 09.03.2023).
11. UN announces high-tech, satellite-based global methane detection system. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-announces-high-tech-satellite-based-global-methane-detection> (дата обращения 09.03.2023).
12. EU Forms Landmark Deal to Bolster Carbon Market as Centerpiece of Green Strategy. URL: <https://www.insurancejournal.com/news/international/2022/12/20/700121.htm> (дата обращения 09.03.2023).
13. EU prepares to sell more carbon permits to pay for exit from Russian gas. URL: <https://www.ft.com/content/be8d95cc-273a-43b8-b6ab-e9f95685ddc7> (дата обращения 09.03.2023).
14. Сидди М. Зеленая революция? Предварительная оценка «Зеленой сделки» ЕС. В поисках коллективных решений для устойчивого мира // Вестник международных организаций. – 2021. – Т. 16. – № 3. – С. 85–107. URL: <https://iorj.hse.ru/2021-16-3/517771199.html> (дата обращения 09.03.2023).
15. Technology Brief: Carbon Capture, Use and Storage (CCUS). URL: [https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure\\_EN\\_final.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
16. Глобальная энергия: 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет. URL: [https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2021/06/10ideas\\_RU.pdf](https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2021/06/10ideas_RU.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
17. Улавливание и хранение углекислого газа (CCS): наилучшие доступные технологии, текущие проекты и глобальные перспективы // Реализация Киотского протокола в России: точка зрения бизнеса: Конференция АЕБ. – М., 2009. URL: <https://aeb.ru/upload/iblock/4ab/4ab6540c0371af467e429ac892c68a30.pdf?ysclid=lbqe2xlwy4963652558> (дата обращения 09.03.2023).
18. Глобальные технологические тренды: технологии улавливания и захоронения углерода. URL: [https://issek.hse.ru/data/2017/05/30/1172158506/Трендлetter%20№6\\_ППП\\_Технологии%20улавливания%20и%20захоронения%20углерода.pdf](https://issek.hse.ru/data/2017/05/30/1172158506/Трендлetter%20№6_ППП_Технологии%20улавливания%20и%20захоронения%20углерода.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
19. Малышев В.П., Виноградов О.В., Родионов И.А. Альтернативное направление снижения выбросов углекислого газа // Технологии гражданской безопасности. – 2021. URL: [https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB\\_articles/2021/N\\_4\\_2021/42\\_Reducing%20Carbon%20Dioxide%20Emissions.pdf?ysclid=lbxkfw9h38532833621](https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB_articles/2021/N_4_2021/42_Reducing%20Carbon%20Dioxide%20Emissions.pdf?ysclid=lbxkfw9h38532833621) (дата обращения 09.03.2023).
20. Малышев В.П., Виноградов О.В., Родионов И.А. Варианты формирования комплексных промышленных объединений по утилизации и переработке углекислого газа в продукты крупнотоннажной химии // Технологии гражданской

- безопасности. – 2022. – Т. 19. – № 1 (71). URL: [https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB\\_articles/2022/N1\\_2022/07\\_Utilization\\_Processing\\_Carbon\\_Dioxide\\_tgb\\_1\\_2022.pdf?ysclid=lbqe7cb6t1560537353](https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB_articles/2022/N1_2022/07_Utilization_Processing_Carbon_Dioxide_tgb_1_2022.pdf?ysclid=lbqe7cb6t1560537353) (дата обращения 09.03.2023).
21. Афанасьев С.В. Углекислый газ как сырье для крупнотоннажной химии // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2019. – № 9 (93). – С. 94–106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39545763&ysclid=lclly2wuyfa416286163> (дата обращения 09.03.2023).
  22. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс. Справочное пособие. – М.: WWF России, 2014. URL: [https://wwf.ru/upload/iblock/260/gr\\_gases.pdf?ysclid=lbqdw1wcmv446115231](https://wwf.ru/upload/iblock/260/gr_gases.pdf?ysclid=lbqdw1wcmv446115231) (дата обращения 09.03.2023).
  23. Реализация лесо-климатических проектов в рамках добровольных и национальных СТБ. Обзор практик и перспектив реализации климатических проектов, 2022. URL: <http://www.igce.ru/wp-content/uploads/2022/07/Лукин-Реализация-лесо-климатических-проектов-в-рамках-добровольных-и-национальных-СТБ-.pdf> (дата обращения 09.03.2023).
  24. Лучшие методы снижения выбросов метана и черного углерода при добыче нефти и газа в арктическом регионе, 2012. URL: [https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2015/06/130820DRAFT-CARBON-LIMITS\\_RUS-AK.pdf](https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2015/06/130820DRAFT-CARBON-LIMITS_RUS-AK.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
  25. Горбылева Я.А. О технологиях закачки выхлопных (дымовых) газов для извлечения нефти // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13. – № 4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46662816> (дата обращения 09.03.2023).
  26. Best Practice Guidance for Effective Methane Management in the Oil and Gas Sector. UNEAC. URL: <https://unece.org/sustainable-energy/methane-management/best-practice-guidance-effective-methane-management-oil-and> (дата обращения 09.03.2023).
  27. A review on catalytic CO<sub>2</sub> pyrolysis of organic wastes to high-value products / P. Parthasarathy, S. Zuhara, T. Al-Ansari, G. McKay // Fuel. – 2023. – V. 335. – 127073. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127073> (дата обращения 09.03.2023).
  28. МАРПОЛ 73/78 – Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. URL: [http://www.sur.ru/upload/legislation/MARPOL\\_file\\_1\\_37\\_3567.pdf](http://www.sur.ru/upload/legislation/MARPOL_file_1_37_3567.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
  29. Руководство по применению положений международной конвенции МАРПОЛ 73/78. НД № 2–030101–026. СПб, 2010. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804030.pdf?ysclid=lbqq46bk8w84611893> (дата обращения 09.03.2023).
  30. Характеристика продуктов сгорания, выбрасываемых котельными в атмосферу. URL: [https://www.rosteplo.ru/w/Характеристика\\_продуктов\\_сгорания\\_выбрасываемых\\_котельными\\_в\\_атмосферу](https://www.rosteplo.ru/w/Характеристика_продуктов_сгорания_выбрасываемых_котельными_в_атмосферу) (дата обращения 09.03.2023).
  31. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973. – 340 с. URL: <https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b503.pdf> (дата обращения 09.03.2023).
  32. Сизов В.П., Ожиков А.А., Капгер И.В. Использование теплоты входящих газов в промышленных котельных, работающих на газу // РосТепло.ру. URL: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2643](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2643) (дата обращения 09.03.2023).
  33. Седин В.А., Райко Д.М., Левин В.М. К вопросу о повышении эффективности отопительных котельных и мини-ТЭЦ // Энергия и менеджмент. – 2015. – № 1. – С. 12–17. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/20217/%D0%A1.%2012-17.pdf?sequence=1&ysclid=lbqovvbsys148572474> (дата обращения 09.03.2023).
  34. Анализ путей повышения эффективности и снижения выбросов вредных веществ от котельных и мини-ТЭЦ. Круглый стол. URL: <https://www.bmk-energolider.ru/files/fotobmk/kotelnie-5-44-2017.pdf?ysclid=lbqnvv79xm195836325> (дата обращения 09.03.2023).
  35. Рубцов В. Экология с выгодой: утилизация тепла дымовых газов // Информационный журнал компании «Первый инженер». – 2019. – № 2. – С. 3–5. URL: [https://1-engineer.ru/wp-content/uploads/2019/11/club\\_pi\\_2\\_2019.pdf?ysclid=lc1winfud5855811659](https://1-engineer.ru/wp-content/uploads/2019/11/club_pi_2_2019.pdf?ysclid=lc1winfud5855811659) (дата обращения 09.03.2023).
  36. Гаряев А.Б., Яковлев И.В., Ефимов А.Л. Утилизация теплоты вторичных энергетических ресурсов в конденсационных теплообменниках. – М.: ИД МЭИ, 2010. – 118 с. URL: [https://books.google.ru/books/about/Утилизация\\_теплоты\\_вт.html?id=IE1\\_kgAAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Утилизация_теплоты_вт.html?id=IE1_kgAAAJ&redir_esc=y) (дата обращения 09.03.2023).
  37. Влияние выбросов водяного пара от работы ТЭЦ, котельных и автотранспорта на локальные климатические изменения и климатическую адаптацию мегаполиса на примере Москвы / Е.Г. Гашо, С.В. Гужов, А.С. Белобородова, Н.В. Гукова // Надежность и безопасность энергетики. – 2019. – Т. 12. – № 3. – С. 190–199. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41342450> (дата обращения 09.03.2023).
  38. Пашков Л.Т. Основы теории горения. – М.: МЭИ (ТУ), 2002. – 125 с. URL: [https://www.studmed.ru/pashkov-lt-osnovy-teorii-goreniya\\_d0c2befbf6f.html?ysclid=lclun648a110330574](https://www.studmed.ru/pashkov-lt-osnovy-teorii-goreniya_d0c2befbf6f.html?ysclid=lclun648a110330574) (дата обращения 09.03.2023).
  39. Николаева А.В., Кожевников В.А., Черных В.А. Анализ потенциала использования отработанных нефтепродуктов на собственные нужды в организациях системы «Транснефть» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10. – № 1. – С. 70–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42447161> (дата обращения 09.03.2023).
  40. Кожевников В.А., Попов С.К., Сериков Э.А. Исследование качества сжигания отработанных нефтепродуктов в испарительной горелке // Промышленная энергетика. – 2020. – № 8. – С. 34–42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44019599> (дата обращения 09.03.2023).
  41. Кожевников В.А., Попов С.К. Разработка горелочного устройства для сжигания отработанных нефтепродуктов // Промышленная энергетика. – 2020. – № 4. – С. 26–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880840> (дата обращения 09.03.2023).
  42. Международные подходы к углеродному ценообразованию. Минэкономразвития РФ. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf?ysclid=lf9yg3v8cl369404267> (дата обращения 09.03.2023).
  43. Парижское соглашение по климату 2015. Организация объединенных наций. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (дата обращения 09.03.2023).

## REFERENCES

1. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Available at: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/russian/gpgaum\\_ru.html](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/russian/gpgaum_ru.html) (accessed 9 March 2023).

2. *Guidelines for the preparation of national communications from Parties included in Annex I to the Convention, Part I: UNFCCC guidelines for reporting information on annual inventories*. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/russian/sbsta/0408r.pdf> (accessed 9 March 2023).
3. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Intergovernmental Panel on Climate Change). National Greenhouse Gas Inventory Program*. Available at: [https://www.un-gsp.org/sites/default/files/documentos/ghg\\_booklet\\_russian\\_final.pdf](https://www.un-gsp.org/sites/default/files/documentos/ghg_booklet_russian_final.pdf) (accessed 9 March 2023).
4. *Sixth Assessment Report – IPCC*. Available at: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (accessed 9 March 2023).
5. *The Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (accessed 9 March 2023).
6. *The Working Group II contribution, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (accessed 9 March 2023).
7. *The Working Group III contribution, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/> (accessed 9 March 2023).
8. *The Long-Term Strategy of the United States. Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050*. Available at: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/US\\_accessibleLTS2021.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/US_accessibleLTS2021.pdf) (accessed 9 March 2023).
9. *The impact of the global methane pledge, November 2021*. Available at: [https://climateanalytics.org/media/the\\_impact\\_of\\_the\\_global\\_methane\\_pledge\\_final.pdf](https://climateanalytics.org/media/the_impact_of_the_global_methane_pledge_final.pdf) (accessed 9 March 2023).
10. *The Global Methane Pledge and 1.5°C*. Available at: <https://www.globalmethanepledge.org/> (accessed 9 March 2023).
11. *UN announces high-tech, satellite-based global methane detection system*. Available at: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-announces-high-tech-satellite-based-global-methane-detection> (accessed 9 March 2023).
12. *EU Forms Landmark Deal to Bolster Carbon Market as Centerpiece of Green Strategy*. Available at: <https://www.insurancejournal.com/news/international/2022/12/20/700121.htm> (accessed 9 March 2023).
13. *EU prepares to sell more carbon permits to pay for exit from Russian gas*. Available at: <https://www.ft.com/content/be8d95cc-273a-43b8-b6ab-e9f95685ddc7> (accessed 9 March 2023).
14. Siddi M. Green revolution? Preliminary assessment of the EU Green Deal. In Search of Collective Solutions for a Sustainable World. *International Organisations Research Journal*, 2021, vol. 16, no. 3, pp. 85–107. In Rus. Available at: <https://iorj.hse.ru/2021-16-3/517771199.html> (accessed 9 March 2023).
15. *Technology Brief: Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)*. Available at: [https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure\\_EN\\_final.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf) (accessed 9 March 2023).
16. *Globalnaya energiya: 10 proryvnykh idey v energetike na sleduyushchie 10 let* [Global Energy: 10 Breakthrough Energy Ideas for the Next 10 Years]. Available at: [https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2021/06/10ideas\\_RU.pdf](https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2021/06/10ideas_RU.pdf) (accessed 9 March 2023).
17. Ulavlivanie i khranenie uglekislogo gaza (CCS): nailuchshie dostupnye tekhnologii, tekushchie proekty i globalnye perspektivy [Carbon Capture and Storage (CCS): Best Available Techniques, Current Projects and Global Perspectives]. *Konferentsiya AEV. Realizatsiya Kiotskogo protokola v Rossii: tochka zreniya biznesa* [AEB Conference. Implementation of the Kyoto Protocol in Russia: a Business Perspective]. Moscow, September 29, 2009. Available at: <https://aebrus.ru/upload/iblock/4ab/4ab6540c0371af467e429ac892c68a30.pdf?ysclid=lbqe2xlwy4963652558> (accessed 9 March 2023).
18. *Globalnye tekhnologicheskie trendy: tekhnologii ulavlivaniya i zakhroneniya ugleroda* [Global technology trends: carbon capture and storage technologies]. Available at: [https://issek.hse.ru/data/2017/05/30/1172158506/Trendletter%20#6\\_RPP\\_Technologies%20capture%20and%20burial%20carbon.pdf](https://issek.hse.ru/data/2017/05/30/1172158506/Trendletter%20#6_RPP_Technologies%20capture%20and%20burial%20carbon.pdf) (accessed 9 March 2023).
19. Malyshev V., Vinogradov O., Rodionov I. Alternative direction of reducing carbon dioxide emissions. *Civil Security Technologies*, 2021, vol. 18, no. 4 (70). In Rus. Available at: [https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB\\_articles/2021/N\\_4\\_2021/42\\_Reducing%20Carbon%20Dioxide%20Emissions.pdf?ysclid=lbxkfw9h38532833621](https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB_articles/2021/N_4_2021/42_Reducing%20Carbon%20Dioxide%20Emissions.pdf?ysclid=lbxkfw9h38532833621) (accessed 9 March 2023).
20. Malyshev V., Vinogradov O., Rodionov I. Options for the formation of complex industrial associations for utilization and processing of carbon dioxide into basic chemicals products. *Civil Security Technologies*, 2022, vol. 19, no. 1 (71). In Rus. Available at: [https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB\\_articles/2022/N1\\_2022/07\\_Utilization\\_Processing\\_Carbon\\_Dioxide\\_tgb\\_1\\_2022.pdf?ysclid=lbqe7cb6tl560537353](https://www.vniigochs.ru/storage/photos/4/TGB_articles/2022/N1_2022/07_Utilization_Processing_Carbon_Dioxide_tgb_1_2022.pdf?ysclid=lbqe7cb6tl560537353) (accessed 9 March 2023).
21. Afanasiev S.V. Uglekislly gaz kak syre dlya krupnotonnazhnoy khimii [Carbon dioxide as a raw material for large-capacity chemistry]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2019, no. 9 (93), pp. 94–106. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39545763&ysclid=lcly2wuyfa416286163> (accessed 9 March 2023).
22. *Parnikovyie gazy – globalnyy ekologicheskiy resurs. Spravochnoe posobie* [Greenhouse gases are a global environmental resource. Reference manual]. Moscow, WWF Russia, 2014. Available at: [https://wwf.ru/upload/iblock/260/gr\\_gases.pdf?ysclid=lbqdw1wcmv446115231](https://wwf.ru/upload/iblock/260/gr_gases.pdf?ysclid=lbqdw1wcmv446115231) (accessed 9 March 2023).
23. *Realizatsiya lesno-klimaticheskikh proektov v ramkakh dobrovolnykh i natsionalnykh STV. Obzor praktik i perspektiv realizatsii klimaticheskikh proektov* [Implementation of forest-climatic projects within the framework of voluntary and national ETS. Review of practices and prospects for the implementation of climate projects]. 2022. Available at: <http://www.igce.ru/wp-content/uploads/2022/07/Lukin-Implementation-forest-climate-projects-within-the-voluntary-and-national-STV-.pdf> (accessed 9 March 2023).
24. *Luchshie metody snizheniya vybrosov metana i chernogo ugleroda pri dobyche nefiti i gaza v arkticheskom regione* [Best practices for reducing methane and black carbon emissions from oil and gas production in the Arctic region]. 2012. Available at: [https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2015/06/130820DRAFT-CARBON-LIMITS\\_RUS-AK.pdf](https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2015/06/130820DRAFT-CARBON-LIMITS_RUS-AK.pdf) (accessed 9 March 2023).
25. Gorbyleva Ya.A. On exhaust gas (flue gas) injection technologies for oil recovery. *Bulletin of Eurasian Science*, 2021, vol. 13, no. 4. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46662816> (accessed 9 March 2023).
26. *Best Practice Guide for Efficient Management of Methane Emissions in the Oil and Gas Sector. UNECE 2020*. Available at: [https://unece.org/sites/default/files/2021-04/1921364\\_R\\_ECE\\_ENERGY\\_129\\_WEB.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-04/1921364_R_ECE_ENERGY_129_WEB.pdf) (accessed 9 March 2023).

27. Parthasarathy P., Zuhara S., Al-Ansari T., McKay G., A review on catalytic CO<sub>2</sub> pyrolysis of organic wastes to high-value products. *Fuel*, 2023, vol. 335, 127073. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127073>. (accessed 9 March 2023).
28. MARPOL 73/78 – *Mezhdunarodnaya konventsia po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov* [MARPOL 73/78 – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships]. Available at: [http://www.sur.ru/upload/legislation/MARPOL\\_file\\_1\\_37\\_3567.pdf](http://www.sur.ru/upload/legislation/MARPOL_file_1_37_3567.pdf) (accessed 9 March 2023).
29. *Rukovodstvo po primeneniyu polozheniy mezhdunarodnoy konventscii MARPOL 73/78. ND № 2-030101-026* [Guidelines for the application of the provisions of the international convention MARPOL 73/78. ND No. 2-030101-026]. St Petersburg, 2010. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804030.pdf?ysclid=lbqq46bk8w84611893> (accessed 9 March 2023).
30. *Kharakteristika produktov sgoraniya, vybrasyvaemykh kotelnymi v atmosferu* [Characteristics of combustion products emitted by boilers into the atmosphere]. Available at: [https://www.rosteplo.ru/w/Characteristics\\_of\\_combustion\\_products\\_emitted\\_by\\_boiler\\_houses\\_to\\_the\\_atmosphere](https://www.rosteplo.ru/w/Characteristics_of_combustion_products_emitted_by_boiler_houses_to_the_atmosphere) (accessed 9 March 2023).
31. Rabinovich O.M. *Sbornik zadach po tekhnicheskoy termodinamike* [Collection of problems in technical thermodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 340 p. Available at: <https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b503.pdf> (accessed 9 March 2023).
32. Sizov V.P., Yuzhakov A.A., Kapger I.V. Ispolzovanie teploty ukhodyashchikh gazov v promyshlennyykh kotelnnykh rabotayushchikh na gazu [The use of the heat of flue gases in industrial boilers operating on gas]. *Rosteplo.ru*. Available at: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2643](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2643) (accessed 9 March 2023).
33. Sednin V.A., Raiko D.M., Levin V.M. K voprosu o povyshenii effektivnosti otopitelnykh kotelnnykh i mini-TETs [On the issue of increasing the efficiency of heating boilers and mini-CHPs]. *Energiya i menedzhment*, 2015, no. 1, pp. 12–17. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/20217/%D0%A1.%2012-17.pdf?sequence=1&ysclid=lbqovvbsys148572474> (accessed 9 March 2023).
34. *Analiz putey povysheniya effektivnosti i snizheniya vybrosov vrednykh veshchestv ot kotelnnykh i mini-TETs. Krugly stol* [Analysis of ways to improve efficiency and reduce emissions of harmful substances from boilers and mini-CHPs. Round table]. Available at: <https://www.bmk-energolider.ru/files/fotobmk/kotelnie-5-44-2017.pdf?ysclid=lbqnwv79xm195836325> (accessed 9 March 2023).
35. Rubtsov V. *Ekologiya s vygodoy: utilizatsiya tepla dymovykh gazov* [Ecology with benefit: utilization of flue gas heat]. *Informacionny zhurnal kompanii «Pervy inzhener»*, 2019, no. 2, pp. 3–5. Available at: [https://1-engineer.ru/wp-content/uploads/2019/11/club\\_pi\\_2\\_2019.pdf?ysclid=lclwinfud5855811659](https://1-engineer.ru/wp-content/uploads/2019/11/club_pi_2_2019.pdf?ysclid=lclwinfud5855811659) (accessed 9 March 2023).
36. Garyaev A.B., Yakovlev I.V., Efimov A.L. *Utilizatsiya teploty vtorichnykh energeticheskikh resursov v kondensatsionnykh teploobmennikakh* [Utilization of heat from secondary energy resources in condensing heat exchangers]. Moscow, MPEI Publ. House, 2010. 118 p. Available at: [https://books.google.ru/books/about/Utilization\\_of\\_heat\\_vt.html?id=IE1\\_kgAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Utilization_of_heat_vt.html?id=IE1_kgAACAAJ&redir_esc=y) (accessed 9 March 2023).
37. Gasho E.G., Guzhov S.V., Beloborodova A.S., Gukova N.V. The influence of water vapor emissions from the operation of thermal power plants, boiler houses and vehicles on local climate change and climate adaptation of a metropolis on the example of Moscow. Reliability and safety of energy, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 190–199. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41342450> (accessed 9 March 2023).
38. Pashkov L.T. *Osnovy teorii goreniya* [Fundamentals of combustion theory]. Moscow, MPEI Publ. House, 2002. 125 p. Available at: [https://www.studmed.ru/pashkov-lt-osnovy-teorii-goreniya\\_d0c2befb6f.html?ysclid=lclun648a110330574](https://www.studmed.ru/pashkov-lt-osnovy-teorii-goreniya_d0c2befb6f.html?ysclid=lclun648a110330574) (accessed 9 March 2023).
39. Nikolaeva A.V., Kozhevnikov V.A., Chernykh V.A. Analysis of the potential use of used oil products for their self-needs in the organizations of the Transneft system. *Science and Technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 70–83. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42447161> (accessed 9 March 2023).
40. Kozhevnikov V.A., Popov S.K., Serikov E.A. Issledovanie kachestva szhiganiya otrabotannykh nefteproduktov v isparitelnoy gorelke [Investigation of the quality of combustion of spent petroleum products in an evaporative burner]. *Promyshlennaya energetika*, 2020, no. 8, pp. 34–42. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44019599> (accessed 9 March 2023).
41. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Razrabotka gorelochnogo ustroystva dlya szhiganiya otrabotannykh nefteproduktov [Development of a burner device for burning spent petroleum products]. *Promyshlennaya energetika*, 2020, no. 4, pp. 26–36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880840> (accessed 9 March 2023).
42. *Mezhdunarodnye podkhody k uglerodnomu isenoobrazovaniyu. Minekonomrazvitiya RF* [International approaches to carbon pricing. Ministry of Economic Development of the Russian Federation]. Available at: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf?ysclid=lf9yg3v8cl369404267> (accessed 9 March 2023).
43. *Paris Climate Agreement 2015. The United Nations*. Available at: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (accessed 9 March 2023).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Виталий Анатольевич Кожевников**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ООО «НИИ Транснефть», Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр., 47а. [kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru](mailto:kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru)

**Александр Валерьевич Федюхин**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленных теплоэнергетических систем Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250,

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vitaly A. Kozhevnikov**, Cand. Sc., Senior Researcher, Transneft Research Institute LLC, 47a, Sevastopolskiy avenue, Moscow, 117186, Russian Federation. [kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru](mailto:kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru)

**Alexander V. Fedyukhin**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research University «MPEI», bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. [fediukhinav@mpei.ru](mailto:fediukhinav@mpei.ru)

г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1. fedukhinav@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1819-0450>; шифр специальности ВАК: 2.4.6

**Константин Владимирович Строгонов**, кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1. [strogonovkv@mpei.ru](mailto:strogonovkv@mpei.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3276-4403>

<https://orcid.org/0000-0002-1819-0450>

**Konstantin V. Strogonov**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research University «MPEI», bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. [strogonovkv@mpei.ru](mailto:strogonovkv@mpei.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3276-4403>

Поступила в редакцию: 11.03.2023

Поступила после рецензирования: 21.04.2023

Принята к публикации: 13.05.2023

Received: 11.03.2023

Revised: 21.04.2023

Accepted: 13.05.2023