



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ С УЧЕТОМ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

Зиганшин М. Г.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

mjihan@mail.ru

Резюме: В статье отмечаются риски на пути роста энергетического потенциала в связи с недавним принятием Правительством РФ Парижского соглашения по климату. Согласно с последними данными ООН, концентрации парниковых газов в атмосфере продолжают расти. Следовательно, от России потребуются довести сокращение выбросов CO₂ до 33-40%, что повлечет за собой снижение производства, в том числе энергогенерации, на органическом топливе. Вместе с тем, в решениях Парижского соглашения отсутствуют конкретные инструменты контроля «низкоуглеродности» производства. Это может приводить к необъективному принятию решений по проблемам «низкоуглеродности» производства как на глобальном, так и на национальном уровнях. Предлагается система рейтинговых оценок, дающая средневзвешенные числовые показатели эффективности работы генерирующих предприятий по выбросу токсичных ингредиентов и парниковых газов, с учетом энергозатрат на восстановление воздушного ареала вокруг источника выброса. Проведена валидация методики рейтинговой оценки по категории источников «стационарное сжигание топлива» при энергогенерации. Результаты расчетов по предлагаемой методике, получаемые с учетом фактической загрузки объектов, показали физическую адекватность и объективность оценки энергогенерации на тепловых станциях различного назначения по выбросу загрязнителей разнонаправленного действия. Представленные рейтинговые характеристики могут использоваться в глобальном и/или национальном масштабах, а также для внутренних целей организаций, например, при сопоставлении своих объектов с целью индикации узких мест в реальных производственных условиях.

Ключевые слова: тепловая электростанция, сжигание топлива, эффективность, парниковые газы, токсичные загрязнители, рейтинговая оценка, метод.

Для цитирования: Зиганшин М.Г. Методика оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса загрязнителей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 29-38. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-29-38.

METHOD OF ASSESSMENT GENERATION EFFICIENCY AT THERMAL POWER PLANTS TAKING INTO ACCOUNT EMISSIONS OF POLLUTANTS

MG Ziganshin

Kazan State energy University, Kazan, Russia

mjihan@mail.ru

Abstract: The article notes the risks to the growth of energy potential in connection with the recent adoption by the Government of the Russian Federation of the Paris Climate Agreement. According to the latest UN data, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere continues to increase. Consequently, Russia will be required to bring the reduction of CO₂ emissions to 33-40%, which will entail a decrease in the production, including energy generation, at the base of fossil fuels. At the same time, in the decisions of the Paris Agreement there are no specific tools to control the “low-carbon” production. This can lead to biased decision-making on the problems of “low-carbon” production both at the global and national levels. A rating system is proposed that provides weighted average numerical indicators of the efficiency of generating enterprises in the release of toxic ingredients and greenhouse gases, taking into account energy costs for restoring

the air area around the source of emission. The rating assessment methodology was validated for the category of sources “stationary fuel combustion” during power generation. The results of calculations by the proposed method, obtained taking into account the actual load of the facilities, showed the physical adequacy and objectivity of the assessment of energy generation at thermal plants for various purposes for the emission of multidirectional pollutants. The presented rating characteristics can be used on a global and / or national scale, as well as for internal purposes of organizations, for example, when comparing their objects in order to indicate bottlenecks in real production conditions.

Keywords: *thermal power plant, fuel combustion, efficiency, greenhouse gases, toxic pollutants, rating, method.*

For citation: Ziganshin MG. Method of assessment generation efficiency at thermal power plants taking into account emissions of pollutants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(6):29-38. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-29-38.

Введение

Парижское соглашение по РКИК (Рамочной Конвенции по изменению климата) ООН, подписанное от имени Российской Федерации в Нью-Йорке 22 апреля 2016 г., недавно было принято (Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2019 г. № 1228) с тремя заявлениями, одно из которых говорит о неприемлемости его использования для создания барьеров устойчивому развитию Сторон Конвенции. Таким образом, с момента подписания до принятия договора прошло более трех лет, в течение которых проводились глобальные оценки рисков. Некоторые политологи приводили до двух десятков позиций экономических и политических рисков для России на пути роста ее экономического потенциала, в том числе в сфере энергетики [1]. Энергетические риски были достаточно подробно рассмотрены и в одной из работ автора данной статьи [2]. Вместе с тем, факт принятия Правительством РФ Парижского соглашения говорит об итоговом положительном результате оценки его последствий в целом. В то же время нельзя не видеть, что ключевые с позиции устойчивости развития страны сектора экономики, связанные с углеводородным сырьем и энергогенерацией, подпадают теперь под решения Парижского соглашения, в первую очередь – по линии «низкоуглеродности». Согласно с последними данными ООН, представленными на днях Всемирной метеорологической организацией (ВМО), концентрации парниковых газов в атмосфере продолжают расти [3]. Подобные сводки собираются в ВМО с ряда метеорологических организаций США и Великобритании, а также Европейского центра среднесрочных прогнозов и Японского метеорологического агентства, где они обрабатываются и передаются в ООН. Данные 2018 г. по всем видам парниковых газов, в том числе по CO₂ [4, 5], CH₄ [6-10], SF₆ [11] показали существенное превышение показателей 2017 г., который считался рекордным. Очевидно, что это не позволяет остановиться на двухградусном превышении средней температуры атмосферы, и тем более – на полутораградусном, как было представлено на Парижской конференции по инициативе Генсека ООН¹ в связи с недостаточностью, по его мнению, усилий стран в борьбе с изменением климата. Последнее потребует сокращения выброса CO₂ в России до 33-40% вместо 25-30% по предварительному «национальному вкладу» к Парижскому соглашению. Так как выброс CO₂ с 1990 г. в России из-за падения ВВП снизился приблизительно на 35%, то очевидно, это потребует или заметного уменьшения энергогенерации на органическом топливе, или дальнейшего снижения ВВП. Между тем, характерным для Парижского соглашения является отсутствие конкретных методов и инструментов осуществления решений. Это касается и критериев оценок энергогенерации по низкоуглеродности, в том числе на органическом топливе, что может привести к принятию необъективных решений как в глобальном, так и в национальном масштабах и от чего необходимо иметь, как минимум, методы и инструменты защиты.

Методы

¹ Пан Ги Мун предупредил, что миру грозит климатическая катастрофа [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://360tv.ru/news/ekologiya/pan-gi-mun-predupredil-chto-miru-grozit-klimaticheskaja-katastrofa-39668/>. Ссылка активна на: 30 ноября 2019.

Глобальные проблемы вызываются отсутствием практических инструментов оценок производства энергии по низкоуглеродности в числовом формате, пригодном для выполнения сравнительных анализов на национальных уровнях. В распоряжении международных институтов, на которых базируется РКИК ООН, пока имеются только сведения о рейтинговых оценках энергоэффективности зданий, действующих в тех или иных странах. Они были собраны перед парижской конференцией целевой группой по энергоэффективности зданий *BEET (Buildings Energy Efficiency Taskgroup)* при Международном партнерстве в целях сотрудничества в области энергоэффективности (МПСОЭ, *IPEEC, International Partnership for Energy Efficiency Cooperation*). Выполненная группой *BEET* колоссальная работа показала, что национальные подходы весьма разобщены, и вряд ли когда-либо станут унитарными. Поэтому пока декларативно предлагается улучшение метрики и показателей энергоэффективности зданий. Вследствие того, что на здания во всем мире приходится более 30 % от общего конечного потребления энергии (чего можно было бы избежать с помощью решений в сфере дизайна, применяемых материалов, например, используемых при остеклении, оборудования, инженерных систем и контроля потребления), каждый процент экономии рассматривается эквивалентным снижению выброса CO_2 при энергогенерации. Странам-участницам Парижского соглашения рекомендовано работать совместно в рамках МПСОЭ с участием МЭА (Международного энергетического агентства, *International Energy Agency IEA*) и представителей Всемирного высшего партнерства в области энергоэффективности (*Global Superior Energy Performance Partnership, GSEP*) в сфере обмена передовым опытом по таким вопросам, как строительные нормативы, показатели энергоэффективности зданий, распространение методик рейтинговой оценки зданий, метрики, оценка стоимости, классификация и раскрытие информации. Предполагается документирование лучших практик и стимулирование стран к усовершенствованию своих нормативов и методологий рейтинговой оценки. В конечном итоге по рейтинговым показателям энергоэффективности зданий предлагается унифицировать подходы совместными усилиями всех стран-членов *IPEEC, G20* и т.д., взяв за основу схемы, используемые в странах – членах *IPEEC* с большим опытом применения рейтинга. В числе таковых традиционно предлагаются подходы стран – членов ЕС и США. В то же время, другие страны – члены *IPEEC*, такие как Китай и Индия, которые начали применение рейтингов, позиционируются как находящиеся на ранних стадиях развития, а схемы их рейтингов – как еще не накопившие достаточно данных, по которым можно было бы оценить их эффективность.

В сфере низкоуглеродной энергогенерации отсутствуют и такие методы. Так как в мире много энергоемких промышленных процессов, повышение энергоэффективности промышленного производства признано экономически эффективной стратегией снижения выброса CO_2 и считается резервом снижения выброса парниковых газов при энергогенерации, аналогичным повышению энергоэффективности зданий. Также декларируется необходимость работы в рамках существующих рабочих групп *IPEEC*, Рабочей группы *GSEP* по энергетическому менеджменту и Сети содействия энергетическому менеджменту (*Energy Management Action Network, EMAK*), чтобы ускорить освоение систем энергетического менеджмента промышленного производства. В частности, указывается, что действенным инструментом повышения энергоэффективности предприятий промышленного сектора будет более широкое внедрение на добровольной основе протокола по энергоменеджменту *ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use»*. Система энергоменеджмента по протоколу *ISO 50001* учитывает разнообразие промышленных и технологических систем в странах «Группы двадцати» и легко адаптируется к потребностям различных секторов и различным обстоятельствам. Идентичный стандарт ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» с указанием о необходимости разработки критериев энергоэффективности имеется в России. Однако пока таковые отсутствуют как в российской, так и в мировой практике. Непосредственно по низкоуглеродной генерации принят за приоритетный обмен высокоэффективными технологиями с низким уровнем выбросов типа *HELE (High Efficiency- Low Emissions)* для систем автомобильных двигателей. Участвующим странам предлагается при ведущей роли Японии работать совместно на площадке существующей Рабочей группы МПСОЭ *GSEP* по электроэнергетике в целях повышения осведомленности о высокоэффективных технологиях производства электроэнергии с низким уровнем выбросов парниковых газов, внедрение которых будет способствовать снижению их уровня. Сеть организаций-исполнителей, создаваемая Японией, выстраивается в целях создания возможностей обмена передовым

опытом и знаниями в области реализации энергоэффективных проектов по нескольким секторам и технологиям. Создание расширенной сети основывается на работе уже существующих институтов, таких как Центр энергосбережения (Япония); эта работа также проводится Токийским Хабом Содействия Энергоэффективности в рамках деятельности ООН по устойчивой энергетике для всех (*SE4All, Sustainable Energy for All – Global tracking framework*).

Вышеизложенное показывает, что пока ни в глобальном, ни в национальном масштабах нет практических методов, которые позволяли бы получать объективные и прозрачные числовые характеристики эффективности энергогенерации по низкоуглеродности. С позиции международного взаимодействия в области изменения климата это приводит к отсутствию обоснованной аргументации при отстаивании национальных интересов устойчивости развития энергетики и производства в целом, а на национальном уровне – к отсутствию объективных и прозрачных ориентиров, которые помогали бы принимать корректные инвестиционные решения по энергоэффективным технологиям.

Правительством РФ еще в 2014 г. была разработана Концепция формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации². Для реализации целей данной Концепции в области мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов Минприроды России представило перед Парижской конференцией бесконфликтные методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов³. Несмотря на это, Парижскими соглашениями были приняты более жесткие обязательства, чем предполагалось в Правительстве до конференции, и теперь указанные документы нуждаются в ужесточающей корректировке.

В то же время, в соответствии с п. 33 Климатической Доктрины РФ, необходимо, исходя из приоритетов обеспечения защищенности жизненно важных интересов нашего государства, создавать и совершенствовать свои национальные механизмы, и встраивать их в соответствующие международные механизмы. Также в соответствии с п. 34 Климатической Доктрины, теперь становится релевантным обеспечивать признание международным научным сообществом результатов российских исследований, которые соответствуют мировому уровню или опережают его, и использовать их в качестве аргументов в межгосударственном политическом диалоге по проблемам климата. Это тем более необходимо в сфере исследований, касающихся разработок по числовым оценкам эффективности генерирующих предприятий по вредным выбросам, которые проводятся в России уже с середины прошлого века. В частности, в Татарстане разработки по методам оценки эффективности энергогенерации на ТЭС с учетом выброса парниковых газов ведутся с начала действия Киотского протокола. Результаты некоторых из них представлены, например, в [12, 13]. Они позволяют объективно и прозрачно оценивать совершенство используемого и модернизируемого оборудования ТЭС, в том числе с учетом международной практики [14] по выбросам от источников сжигания ископаемого топлива и требований по загрязнителям глобального действия в пересчете на CO₂, что лежит и в основе протокола по энергоменеджменту ISO 50001.

Для продвижения системы рейтинговой оценки низкоуглеродности в национальном и международном масштабах после ее адаптации на региональном уровне полезно воспользоваться рекомендациями Целевой группы *BEET* по данному документу. К примеру, в п. 4.6.1 ИСО 50001 указывается на необходимость обеспечения критериев энергоэффективности следующим образом. Организация должна обеспечить регулярные измерения и анализ ключевых характеристик своих операций, которые определяют энергетическую результативность. К ним относятся, как минимум, выходные данные энергетического анализа, показатели энергетической результативности; эффективность выполнения запланированных решений. Здесь к ключевым характеристикам необходимо добавить и рейтинговую оценку генерирующей организации по выбросам парниковых газов. Это соответствует как протоколу ISO 50001, так и духу Парижских соглашений.

² Концепция формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 апреля 2015 г. N 716-р. (Собрание законодательства Российской Федерации, 2015, N 18, ст.2737)

³ Методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. Утверждены приказом Минприроды России от 30.06.2015 N 300

В отмеченном ранее приказе 300 МПР РФ учетные параметры выбросов определены исходя из плана мероприятий по обеспечению к 2020 году сокращения выбросов парниковых газов до уровня не более 75 процентов объема указанных выбросов в 1990 году, утвержденного Правительством РФ до Парижской конференции⁴.

Теперь требуется дополнение национального вклада России по снижению выброса парниковых газов порядка 10%, что приведет и к соответствующему ужесточению учетных параметров выбросов. Очевидно, что дополнение вклада распределится как на энергетику, так и на транспорт и всю производственную деятельность в целом. В этой ситуации система рейтинговых оценок будет стимулировать организации к повышению точности учета выбросов всех категорий и поиску для них наилучших доступных производственных или/и очистных технологий. В соответствии с приказом 300 МПР РФ, выбросы распределяются по следующим категориям источников: стационарное сжигание топлива, сжигание в факелах, фугитивные выбросы, нефтепереработка, производство кокса, производство цемента, производство извести, производство стекла, производство керамических изделий, производство аммиака, производство азотной кислоты, капролактама, глиоксаля и глиоксиловой кислоты, нефтехимическое производство, производство фторсодержащих соединений, черная металлургия, производство ферросплавов, производство первичного алюминия, прочие промышленные процессы, авиационный транспорт, железнодорожный транспорт. Требуется учитывать следующие парниковые газы: CO₂, CH₄, N₂O, CF₄, C₂F₆, CHF₃, SF₆.

В пояснительную записку к отчету о выбросах парниковых газов должны быть включены и сведения о реализуемых мероприятиях, приводящих к сокращению выбросов парниковых газов; а также оценки и анализ изменения удельных выбросов парниковых газов и энергоемкости по основным видам производимой продукции в организации за отчетный период. Поэтому в данном случае система рейтинговых оценок обеспечит прозрачность выбора и объективность сравнения направлений модернизации оборудования для повышения энергоэффективности и снижения выбросов, или обоснование отказа от таких мероприятий.

В настоящее время проведена валидация предлагаемой методики рейтинговой оценки по категории источников «стационарное сжигание топлива» при энергогенерации. В основу методики положены уравнения (1, 2), дающие средневзвешенные числовые показатели эффективности работы генерирующих предприятий по выбросу токсичных ингредиентов и парниковых газов с учетом энергозатрат, которые возникли бы при их удалении из выбросов.

$$R = C_u \cdot \eta_{COMP} = C_u \cdot EER \cdot T_1 = C_u \cdot EER \cdot (T_1/T_2) \cdot T_2, \quad (1)$$

$$\eta_{COMP} = EER \cdot T_1 = \frac{EER \cdot V}{\tau_0 \cdot W} \left(\frac{\sum_{i=1}^m (BC_i \cdot GWP_{i100}) \cdot \prod_{i=1}^m \left(2 - \frac{C_{iAAU}}{C_{ib}} \right) + \sum_{j=1}^n \text{ПДК}_j \cdot \prod_{j=1}^n \left(2 - \frac{C_{je}}{C_{jb}} \right)}{\sum_{i=1}^m (C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}) + \sum_{j=1}^n C_{je}} \right) =$$

$$= \left(1 - \frac{E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}}{1,1E_a} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^m (BC_i \cdot GWP_{i100})}{\sum_{i=1}^m (C_{iAAU} \cdot GWP_{i100})} \prod_{i=1}^m \left(2 - \frac{C_{iAAU}}{C_{ib}} \right) + \frac{\sum_{j=1}^n \text{ПДК}_j}{\sum_{j=1}^n C_{je}} \prod_{j=1}^n \left(2 - \frac{C_{je}}{C_{jb}} \right) \right) \times$$

$$\times \frac{100\pi H^2}{\tau_0 \cdot W} \left\{ H + D \left[w_0^r \left(1,239 - 0,147 u_m^r \right) - 0,514 \right] \frac{(\rho_{ar} - \rho)}{(\rho_{ar} - \rho_e)} \right\} \quad (2)$$

⁴ Распоряжение Правительства РФ от 2 апреля 2014 г. N 504-р (Собрание законодательства Российской Федерации, 2014, N 15, ст. 1778, 2015, N 20, ст. 2933)

В уравнениях (1, 2) приняты следующие условные обозначения: W м³/с – интенсивность выброса; $\tau_0 = 1800$ с – временной масштаб, принимаемый равным времени осреднения концентрации компонентов выбросов в атмосферном воздухе при отборе проб; $T_1 = \tau_1/\tau_0$ – безразмерный временной параметр заполнения парниковыми и токсичными газами контрольного объема экспертной оценки V , м³; τ_1 – время, с, заполнения парниковыми и токсичными газами контрольного объема экспертной оценки V , м³; $T_2 = V/(\tau_0 W_a)$ – безразмерный временной параметр заполнения выбросом контрольного объема экспертной оценки V , м³; $\tau_2 = V/W_a$ – время, с, заполнения выбросом контрольного объема экспертной оценки V , м³ (W_a м³/с – интенсивность выброса в рабочих условиях); C_{jb} мг/м³, C_{jAAU} мг/м³, BC_j мг/м³, GWP_{j100} – начальная, предельно допустимая по углеродным квотам (или другим лимитирующим нормативам), фоновая концентрации и потенциал глобального потепления j -го вида выбрасываемых парниковых газов; M_{AAU} , т CO₂- экв/год – допустимый массовый выброс парниковых газов, равный по величине углеродной квоте вида AAU (*Assigned Amount Unit*, единице установленного количества ЕУК или другому лимитирующим параметру); C_{ib} мг/м³, C_{ie} мг/м³, ПДК_{*i*}, мг/м³ – начальная, конечная и предельно допустимая концентрации концентрации i -го вида токсичных веществ в выбросах; ρ – плотность продуктов сгорания на выходе из трубы расчетная (при расчетной температуре t_a); ρ_e – плотность продуктов сгорания на выходе из трубы эталонная (при температуре $t_e = 150^\circ\text{C}$); ρ_{ar} – плотность атмосферного воздуха (для всех объектов принимается плотность атмосферного воздуха при нормальных условиях $\rho_{ar} = 1,293$ кг/м³); W_e^r , U_m^r – безразмерные скорости струи и ветра по месту сечения устья трубы высотой H , м, и диаметром D , м; E_a – энергозатраты на охлаждение выбросов с учетом конденсации содержащихся в них CO₂ и H₂O; $E_a^{dn} = E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}$ – энергозатраты на отвод теплоты конденсации CO₂ и H₂O в выбросах; Q_l – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³; η – коэффициент использования энергии топлива; C_u – степень загрузки производственных мощностей (*Capacity utilization*), или коэффициент использования.

Значения w_e^r , u_m^r получаются путем масштабирования скорости выхода струи из трубы w_e , рассчитанной при эталонной температуре $t_e = 150^\circ\text{C}$, и скорости обдувающего ветра u_m , по минимально допускаемой (из соображений устойчивости результата численного эксперимента) скорости выхода струи $w = 1$ м/с и скорости штиля $u_{calm} = 1$ м/с. Формула (1) справедлива при следующих ограничениях по скорости выхода струи и скорости ветра: $w_0 \geq 1$ м/с; 1 м/с $< u_m < 7$ м/с; $u_m/w_0 < 3$. Численный эксперимент по установлению высоты подъема струи проводился методами вычислительной гидродинамики и верифицировался по общепризнанным данным [15], используемым в настоящее время в нормативных методиках по расчету рассеивания выбросов в атмосфере. Были учтены также работы других авторов по вопросам математического моделирования начального подъема дымового шлейфа из труб ТЭС [16, 17].

Результаты и обсуждение

Выполнены пробные расчеты безразмерных рейтинговых числовых показателей R и η_{comp} по уравнениям (1, 2) для ряда тепловых электростанций и районных котельных Татарстана. В качестве примера в таблицах 1, 2 приведены результаты расчетов для двух ТЭС, использующих практически одинаковое по составу газовое топливо и различающихся его расходом, количеством выбрасываемых загрязнителей, характеристиками источников выбросов, а также степенью загрузки производственных мощностей.

Таблица 1

Расчеты рейтинговых оценок эффективности энергогенерации ТЭС 1 по парниковым газам

Исходные и расчетные данные		
Источник теплоснабжения	ТЭС 1	
Расход природного газа Q , тыс.м ³ /год	231900	
Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	817395	
Отпуск тепловой энергии, Гкал/год	1131510	
Источники выброса – дымовая труба	№1	№2
H , м	147	147

Продолжение таблицы 1

D , м	6	6
t_w , °C	122,5°C	122,5°C
V , м ³	$2,181 \cdot 10^9$	$2,181 \cdot 10^9$
T_2	11065,0	
Токсичные загрязнители		
NO _x		
C_b , мг/м ³	80 – 280	80 – 280
C_e , мг/м ³	80 – 280	80 – 280
CO		
C_b , мг/м ³	0 – 60	0 – 60
C_e , мг/м ³	0 – 60	0 – 60
Парниковые газы при сжигании природного газа		
CO ₂ т/год	<u>1024553,03</u>	
т CO ₂ -экв/год	1024553,03	
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	$0,9 \times 1024553,03 = 922097,73$	
GWP_{i100}	1	
BC , мг/м ³	785 (400 ppm)	
CH ₄ т/год	18,54	
т CO ₂ -экв/год	18,54×21	
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	$0,9 \times 389,34 = 350,406$	
GWP_{i100}	21	
BC , мг/м ³	1,5 (2 ppm)	
SF ₆ т/год	<u>$0,716 \cdot 10^{-3}$</u>	
т CO ₂ -экв/год	$0,716 \cdot 10^{-3} \times 24000$	
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	$0,9 \times 0,716 \cdot 10^{-3} \times 24000$	
GWP_{i100}	24000	
BC , мг/м ³	$2,6 \cdot 10^{-3}$ (0,4 ppb)	
T_1/T_2	0,028315008	
EER	0,5775	
Компоненты выбросов	Состав выбросов, % об.	
O ₂	5,567	
N ₂	73,641	
CO ₂	7,058	
H ₂ O	13,734	
η_{comp}	180,3074	
C_u	0,34	
R	61,63	

Таблица 2

Расчеты рейтинговых оценок эффективности энергогенерации ТЭС 2 по парниковым газам

Источник теплоснабжения	ТЭС 2		
Расход природного газа Q , тыс.м ³ /год	901200		
Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	3645552		
Отпуск тепловой энергии, Гкал/год	3988934		
Источники выброса – дымовая труба	№1	№2	№3
H , м	250	250	265
D , м	9,6	9,6	9,6
t_w , °C	150°C	150°C	150°C
V , м ³	$5,245 \cdot 10^9$	$5,245 \cdot 10^9$	$5,245 \cdot 10^9$
T_2	12058,9		
Токсичные загрязнители			
NO _x			
C_b , мг/м ³	90-230	90-230	90-230
C_e , мг/м ³	90-230	90-230	90-230

Продолжение таблицы 2

СО			
C_b , мг/м ³	0 – 130	0 – 130	0 – 130
C_e , мг/м ³	0 – 130	0 – 130	0 – 130
Парниковые газы при сжигании природного газа			
CO ₂ т/год	2480639,8		
т CO ₂ -экв/год	2480639,8		
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	0,9×2480639,8=2232575,		
GWP_{i100}	1		
BC , мг/м ³	785 (400 ppm)		
CH ₄ т/год	44,889		
т CO ₂ -экв/год	44,889×21		
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	0,9×44,889×21 =848,4		
GWP_{i100}	21		
BC , мг/м ³	1,5 (2 ppm)		
SF ₆ т/год	1,188 10 ⁻³		
т CO ₂ -экв/год	1,188 10 ⁻³ ×24000		
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	0,9×1,188 10 ⁻³ ×24000		
GWP_{i100}	24000		
BC , мг/м ³	2,6·10 ⁻³ (0,4 ppb)		
T_1/T_2	0,024042675		
EER	0,5387		
Компоненты выбросов	Состав выбросов, % об.		
O ₂	5,59		
N ₂	73,64		
CO ₂	6,94		
H ₂ O	13,83		
η_{COMP}	156,184		
C_u	0,21		
R	32,799		

Можно видеть, что величины параметра EER 0,5755 и 0,5387, по ТЭС 1 и ТЭС 2 соответственно, отличаются незначительно. Это закономерный результат, поскольку величина EER зависит преимущественно от состава используемого топлива и способа сжигания. Параметр EER не оказывает существенного влияния при сравнении объектов, использующих для генерации природный газ, однако он весьма чувствителен при переходе на низкоуглеродное, например, водородное, топливо.

Результаты расчетов показали также сильное влияние геометрических параметров дымовых труб через показатель T_2 на числовые рейтинговые значения, если не принимать во внимание степени загрузки производственных мощностей. Поэтому при сопоставлении величин T_2 и T_1 разных производственных объектов степени их загрузки должны быть учтены. В противном случае показатель T_2 будет давать преференции в рейтинговых оценках пропорционально недопроизводству энергии.

Показатель T_1 может использоваться также для оценки воздействия объекта на окружающий воздушный ареал. Так, например, значение безразмерного времени $T_1 = 313,3$ для ТЭС 1 соответствует 6,5 суткам. Известно, что время жизни в атмосфере оксидов азота и серы составляет от 2 до 8 суток, оксида углерода 2–4 месяца. Следовательно, в ареале ТЭС 1 при неблагоприятных для рассеивания условиях возможно накопление оксида углерода, а вероятность скопления оксидов азота и серы невелика.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о валидности разработанной методики оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса токсичных и парниковых загрязнителей. Как показали результаты расчетов по формулам 1, 2, показатели η_{COMP} и R , полученные с учетом фактической загрузки объекта, являются физически адекватными и обеспечивают объективность оценки энергогенерации на тепловых станциях различного назначения по выбросу загрязнителей разнонаправленного действия.

Представленные рейтинговые характеристики имеют существенную информационную ценность и для реальных производственных условий. Они могут использоваться для внутреннего сопоставления объектов одной организации с целью индикации узких мест в системе производства, и последующего разделения, например, на подлежащие модернизации в ближайшее время или в среднесрочной перспективе. Поэтому данный рейтинговый показатель актуален в анализе хозяйственной и иной деятельности организаций, связанной с обеспечением современных экологических требований.

Литература

1. Павленко В.Б. Парижское соглашение как угроза национальной безопасности России // Астраханский вестник экологического образования. 2017. № 4(42) С. 25-40.
2. Зиганшин М.Г., Сивков А.Л. Система рейтинговой оценки деятельности организаций по признаку «низкоуглеродности» // Надежность и безопасность энергетики. 2016. №4(35). С. 7-11
3. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin). N. 15: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through. 2018.
4. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019: Trends in atmospheric carbon dioxide. Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>. Accessed to: 30 Nov. 2019.
5. Rubino M, Etheridge DM, et al. 2019: Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O, and δ¹³C-CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. Earth System Science Data, 11(2).
6. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019: Trends in Atmospheric Methane Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/ Accessed to: 30 Nov. 2019.
7. Nisbet E.G., E.J. Dlugokencky. et al., 2016: Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. Global Biogeochemical Cycles, 30, 1356-1370.
8. Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., et al. 2019. The Global Methane Budget 2000–2017, Earth System Science Data, Preprint. 136 p.
9. Nisbet E.G., Manning M.R. , et al. 2019. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. Global Biogeochemical Cycles. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.
10. Rice A., Butenhoff CL, et al. Atmospheric methane isotopic record favors fossil sources flat in 1980s and 1990s with recent increase. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016;113:1079-10796.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019: Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_sf6/. Accessed to:30 Nov. 2019.
12. Чичирова Н.Д., Зиганшин М.Г. Оценки эффективности теплоэнергетических объектов: Ч. 1. Энергетические и экологические показатели с учетом выброса токсичных ингредиентов и CO₂ // Надежность и безопасность энергетики. 2013. №2 (21). С.46-49.
13. Чичирова Н.Д., Зиганшин М. Г. Оценки эффективности теплоэнергетических объектов: Часть 2. Показатели эффективности при выбросе нескольких видов парниковых газов Надежность и безопасность энергетики. 2013. №2. С. 39-43.
14. Sherwood O.A., S. Schwietzke et al., 2017. Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017. Earth System Science.
15. Берлянд М.Е., Киселев В.Б. О влиянии рельефа на распространение примесей с учетом их начального подъема // Метеорология и гидрология. 1972. №3. С. 3-10
16. Федосов А.А., Чичирова Н.Д., Шарифуллин А.Ш. Моделирование начального подъёма выбросов тепловых электрических станций. 5. Совместный расчёт динамического и теплового подъёма // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 5-6. С. 14-20.
17. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Зубков П.Т., Фадеев С.А. Математическое моделирование подъёма дымового факела в атмосфере. // Известия вузов. Энергетика. 1986. № 9. С. 87-89.

Автор публикации

Зиганшин Малик Гарифович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Pavlenko VB. Parizhskoye soglasheniye kak ugroza natsional'noy bezopasnosti Rossii. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2017;4(42):25-40.
2. Ziganshin MG, Sivkov AL. Sistema reytingovoy otsenki deyatel'nosti organizatsiy po priznaku «nizkouglerodnosti». *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2016;4(35):7-11.
3. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin). *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through*. 2018.
4. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019. Trends in atmospheric carbon dioxide. Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>. Accessed to: 30 Nov 2019.
5. Rubino M, Etheridge DM, et al. Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O, and δ¹³C-CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth System Science Data*. 2019;11 (2):473-492. doi: 10.5194 / essd-11-473-2019.
6. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019. Trends in Atmospheric Methane Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/ Accessed to: 30 Nov 2019 .
7. Nisbet EG, EJ Dlugokencky, et al. Rising atmospheric methane: 2007-2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*. 2016;30:1356-1370. Available at <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>.
8. Saunio M, Stavert AR, Poulter B, et al. 2019: The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, Preprint. 136 p. Available at <https://doi.org/10.5194/essd-2019-128>.
9. Nisbet EG, Manning MR, et al. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014-2017: Implications for the Paris Agreement. *Global Biogeochemical Cycles*. 2019;33:318-342. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.
10. Rice AL, Butenhoff CL, et al., 2016: Atmospheric methane isotopic record favors fossil sources flat in 1980s and 1990s with recent increase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Accessed to: <https://doi.org/10.1073/pnas.1522923113>.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division, 2019: *Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride*. Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_sf6/. Accessed to: 30 Nov 2019.
12. Chichirova ND, Ziganshin MG. Otsenki effektivnosti teploenergeticheskikh ob"yektov: Chast' 1. Energeticheskiye i ekologicheskkiye pokazateli s uchetom vybrosov toksichnykh ingrediyyentov i SO₂. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2013;2(21):46-49.
13. Chichirova ND, Ziganshin MG. Otsenki effektivnosti teploenergeticheskikh ob"yektov. Pt' 2. Pokazateli effektivnosti pri vybrose neskol'kikh vidov parnikovyykh gazov. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2013;2:39-43.
14. Sherwood OA, Schwietzke S, et al. *Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017*. Earth System Science Data, 2017. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>.
15. Berlyand MYe, Kiselev VB. O vliyaniy rel'yefa na rasprostraneniye primesey s uchetom ikh nachal'nogo pod"yema. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1972;3:3-10.
16. Fedosov AA, Chichirova ND, Sharifullin ASH. Modelirovaniye nachal'nogo pod"yoma vybrosov teplovykh elektricheskikh stantsiy. 5. Sovmestnyy raschot dinamicheskogo i teplovogo pod"yoma. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2003;5-6:14-20.
17. Volkov EP, Gavrilov YeI, Zubkov PT, et al. Matematicheskoye modelirovaniye pod"yoma dymovogo fakela v atmosfere. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 1986;9:87-89.

Author of the publication

Malik G. Ziganshin – Kazan State Energy University, Kazan, Russia. Email: [mjihan@mail.ru](mailto:mjihhan@mail.ru).

Поступила в редакцию

11 декабря 2019 г.