

Новый подход к оценке атмосферных выбросов предприятий энергетики

К.М. Кляус, О.Д. Пожарская

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, дом 5

Энергетическая отрасль Ленинградской области обеспечивает производство, транспортировку и сбыт электрической и тепловой энергии. На территории области эксплуатируется 25 электростанций общей мощностью 8 500-9 000 МВт, в том числе одна атомная электростанция, 8 гидроэлектростанций и 16 тепловых электростанций. Выработка электроэнергии составляет около 40 млрд. кВт·ч в год. Тепловые электростанции вырабатывают около 20-21% от общего количества электроэнергии (рис. 1). Этой величине можно сопоставить значение расхода топлива в энергетическом эквиваленте $\approx 3,0 \cdot 10^4$ ТДж. Сжигание такого количества органического топлива (с учётом потерь тепловой энергии при производстве электроэнергии) приводит к ежегодному выбросу в атмосферу нескольких миллионов тонн загрязняющих веществ и парниковых газов.

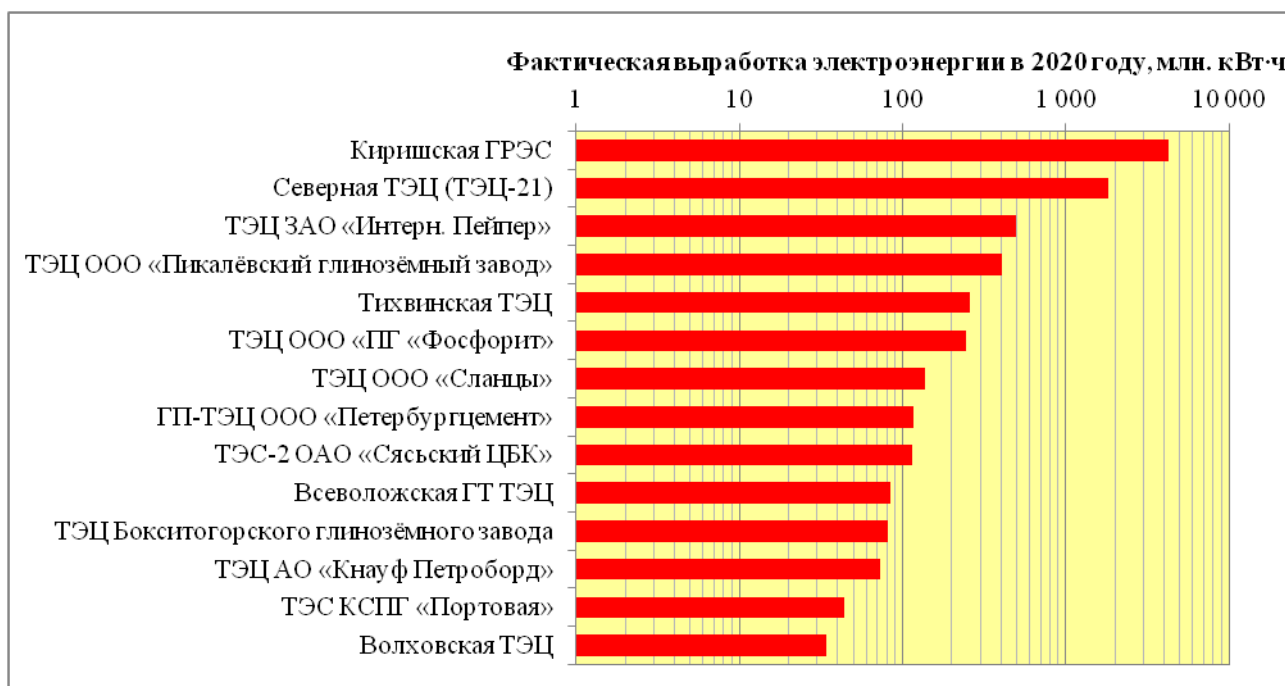


Рис. 1. Фактическая выработка электроэнергии тепловыми электростанциями Ленинградской области в 2020 году [1, 2]

Исходными данными для расчётного прогноза выбросов загрязняющих веществ являются метеоусловия для заданной расчётной точки, параметры выброса и характеристики источника. Концентрация загрязняющих веществ зависит в первую очередь от массы вещества, выбрасываемого в атмосферу (мощности выброса) и расхода газовой смеси через устье источника (трубы). Для практических целей существуют рекомендации по выбору этих параметров. В частности, мощность выброса определяется как функция количества израсходованного топлива в абсолютных единицах (тоннах, кубических метрах). Для выполнения таких расчётов требуется информация по видам и количеству использованного топлива.

В отличие от существующих методик в настоящей работе в качестве исходного параметра предложен расход топлива в энергетическом эквиваленте, соответствующим данным по выработанной электроэнергии [3]. Такой подход положен в основу алгоритмов расчёта выбросов парниковых газов (диоксид углерода CO_2 , метан CH_4 , закись азота N_2O , озон O_3), которые предусматривают определение объёма диоксида углерода и других компонентов продуктов сгорания органического топлива по статистическим показателям. Достоверность статистических данных подтверждается значительным опытом сбора и обработки информации.

К основным загрязняющим веществам при сжигании органического топлива принято относить оксиды азота (NO и NO_2), углерода (CO и CO_2) и серы (SO_2 и SO_3). В случае использования в качестве топлива природного газа оксиды серы и летучая зола практически отсутствуют. Из продуктов неполного сгорания обычно выделяют: оксид углерода (CO), углеводороды (C_xH_y), альдегиды, сажу (C) и канцерогены. Сера в жидком топливе находится преимущественно в виде органических соединений, элементарной серы и сероводорода. Её содержание зависит от сернистости нефти, из которой он получен. Как правило, в мазуте, применяемом в качестве жидкого топлива на ТЭС, содержится много сернистых соединений. Кислотные дожди объясняются высокой концентрацией диоксида серы в атмосфере.

Состав вредных выбросов и их количественная оценка

В соответствии с введёнными в действие Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 №114 гигиенические нормативы [4] регламентируют предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ некоторых вредных выбросов ТЭС (таблица 1).

Названия индивидуальных веществ в таблице 1 приведены в алфавитном порядке в соответствии с правилами Международного союза теоретической и прикладной химии, ЮИПАК (International Union of Pure and Applied Chemistry,

IUPAC). Регистрационные номера соответствуют классификации Chemical Abstracts Service (CAS).

Таблица 1. – Предельно допустимые концентрации и классы опасности основных вредных веществ [4, 5]

Порядковый номер	Наименование вещества	Регистрационный номер CAS	Формула	Величина ПДК, мг/м ³		Класс опасности
				максимальная разовая	средне суточная	
4	Азота диоксид	10102-44-0	NO ₂	0,085	0,040	2
6	Азот (II) оксид	10102-43-9	NO	0,040	0,660	3
286	Мазутная зола тепловых электростанций (в пересчёте на ванадий)			-	0,002	2
463	Сера диоксид	7446-09-5	SO ₂	0,500	0,050	3
521	Углерод оксид	630-08-0	CO	5,000	3,000	4

Классы опасности – по ГОСТ 12.1.007-76 [5]:

- 1 класс** – чрезвычайно опасные;
- 2 класс** – высоко опасные;
- 3 класс** – умеренно опасные;
- 4 класс** – мало опасные.

Расчёт выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлоагрегатах тепловых электростанций на основе данных по выработанной электроэнергии

Расчёт объёма выбросов углекислого газа производится по формуле (1) [6]:

$$\begin{aligned} \text{Выброс}_{\text{CO}_2} (\text{кг}) &= \\ &= \text{Энергетический эквивалент затрат топлива (ТДж)} \times EF_{\text{CO}_2} (\text{кг/ТДж}), \end{aligned} \quad (1)$$

где:

$\text{Выброс}_{\text{CO}_2} (\text{кг})$ – выбросы диоксида углерода;

$\text{Энергетический эквивалент затрат топлива (ТДж)}$ – количество затраченного топлива на производство электроэнергии, выраженное в энергетических единицах;

$EF_{\text{CO}_2} (\text{кг/ТДж})$ – коэффициент пересчёта для выбросов диоксида углерода [6], принимающий следующие значения:

	Рекомендация	Нижний предел	Верхний предел
Природный газ:	56 100	54 300	58 300
Мазут топочный:	77 400	75 500	78 800

Значения выбросов для природного газа и мазута, приведённые к выбросам углекислого газа, приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Нормированные относительно CO₂ значения газообразных выбросов при сжигании органического топлива

Наименование компонентов выброса	Формула	Природный газ			Мазут топочный		
		Рекомендация	Нижний предел	Верхний предел	Рекомендация	Нижний предел	Верхний предел
Парниковые газы [6]:							
Диоксид углерода	CO ₂	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000
Метан	CH ₄	0,000 018	0,000 006	0,000 051	0,000 039	0,000 013	0,000 127
Закись азота	N ₂ O	0,000 002	0,000 001	0,000 005	0,000 008	0,000 003	0,000 025
Вредные выбросы [7]:							
Оксиды азота (в пересчёте на NO ₂)	NO _x	0,004 000	0,002 500	0,005 500	0,003 167	0,001 667	0,004 667
Оксиды серы (в пересчёте на SO ₂)	SO _x	0,000 004	0,000 003	0,000 005	0,000 070	0,000 070	0,000 070
Оксид углерода	CO	0,000 002	0,000 001	0,000 003	0,000 009	0,000 002	0,000 017

Числовые значения, приведённые в таблице 2, получены авторами в результате обработки опубликованных данных [6, 7]. Нормировка значений компонентов выбросов по отношению к диоксиду углерода придаёт методике универсальность и сводит расчёт к определению объёма выброса одного компонента (в данном случае – диоксида углерода) по формуле (1). Предложения правил [6] по оценке выбросов диоксида углерода для используемых видов топлива апробированы практикой и достоверны. Значения величин в графах «**Рекомендация**», выделенные полужирным шрифтом, рекомендуется использовать для приближённой оценки объёмов компонентов вредных выбросов. Номенклатура вредных выбросов может быть расширена в дальнейших исследованиях.

Расчёт среднегодовых концентраций вредных выбросов

Конечной целью количественной оценки валовых вредных выбросов является определение их атмосферных концентраций. С 01.01.2018 в Российской Федерации введены «Методы расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», утверждённые приказом Минприроды России от 06.06.2017 №273 [8]. Методы введены взамен ранее действующих нормативных документов Госкомгидромета СССР (ОНД-86) и Госстроя СССР (СН 369-67, СН 369-74). Главным исполнителем работ по разработке указанных требований на протяжении

многих лет была Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова Госкомгидромета (научный руководитель д.ф.-м.н. проф. М.Е. Берлянд).

Методы [8] позволяют рассчитать поля максимальных разовых концентраций загрязняющих веществ, соответствующих сочетанию неблагоприятных метеоусловий, а также средних концентраций за длительный период времени (сезон, год). Важной с практической точки зрения является оценка расстояния от источника выброса, при котором имеет место наибольшая приземная концентрация загрязняющих веществ. Приведём основные положения этих методов.

В случае отсутствия необходимых исходных данных для расчёта методы [8] допускают упрощённый расчёт среднегодовых концентраций по формуле:

$$C = 0,1 \cdot c_M \cdot \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

где

C и c_M – среднегодовая и максимальная разовая (рассчитанная с учётом фона) концентрация от одиночного точечного источника выброса загрязняющих веществ в расчётной точке, мг/м³;

P – среднегодовая повторяемость ветров румба, соответствующая переносу загрязняющего вещества от точечного источника в расчётную точку, %;

P_0 – повторяемость направлений ветров одного румба (для восьмирумбовой розы ветров $P_0 = 12,5\%$), %.

В случае, если $P < P_0$, принимается $P = P_0$.

Расчёт по формуле (2) даёт завышенную оценку среднегодовых концентраций, что вполне приемлемо для расчётного прогноза.

Максимальная приземная разовая концентрация загрязняющего вещества c_M (мг/м³) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем при опасной скорости ветра u_M (м/с) на расстоянии x_M (м) определяется по формуле:

$$c_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot t \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1} \cdot \Delta T}. \quad (3)$$

Расстояние x_M (м) от источника выброса, на котором приземная концентрация загрязняющего вещества достигает максимального значения c_M , определяется по формуле:

$$x_M = \frac{5 - F}{4} \cdot d \cdot H. \quad (4)$$

Физический смысл параметров, входящих в формулы (3) и (4), объясняется в [8]. В формулах введены обозначения:

A – безразмерный коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания

(для европейской территории Российской Федерации севернее 52° с.ш. коэффициент A принимается равным $A = 160$ [8, Приложение 1]);

F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющего вещества в атмосферном воздухе, определяется в соответствии с указаниями [8, Приложение 2]. Для газообразных загрязняющих веществ и мелкодисперсных аэрозолей диаметром не более 10 мкм коэффициент F принимает значение $F = 1$;

m и n – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника, определяемые как функции параметров выброса и размеров источника по методам [8];

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности [8]; В случае ровной или слабопересечённой местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, равен $\eta = 1$;

V_1 – расход газовой смеси, $\text{м}^3/\text{с}$;

ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

d – безразмерный коэффициент, определяемый по формулам методов [8] как функция параметров выброса и размеров источника.

Допускается применение расчётных моделей, основанных на приближённом решении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Решение уравнения для пространственного распределения полей концентраций в гауссовой форме используется в большинстве нормативных документов, принятых во многих странах мира [9-14]. Из наиболее полных и достоверных зарубежных моделей следует отметить методику AERMOD, разработанную и утвержденную в 1995 году Агентством по защите окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) в качестве рабочей методики для расчёта полей концентраций загрязняющих веществ при выбросах из различных промышленных источников [15, 16].

Пример реализации методики

Приводимый ниже пример имеет цель демонстрации возможностей предложенной методики.

Исходные данные для расчёта выбраны для тепловой электростанции с установленной электрической мощностью около 50-55 МВт. Перечень исходных данных приводится в таблице 3. Рассматриваются два варианта органического топлива: природный газ и топочный мазут. Предполагается, что объект размещён в Тихвинском районе.

Суммарный годовой выброс загрязняющих веществ и парниковых газов приводится в таблице 4. Расчёт выполнен для случаев использования в качестве органического топлива природного газа и топочного мазута. Обращает на себя внимание значительное количество углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу.

На рис. 2 приводятся результаты расчётного прогноза сезонных концентраций загрязняющих веществ для наиболее вероятных летних и зимних условий. Из представленных данных видно, что при положительных температурах концентрации загрязняющих веществ в приземных слоях атмосферного воздуха выше, чем в условиях морозного воздуха. Различаются также расстояния от источника выброса, на котором приземная концентрация загрязняющего вещества достигает максимального значения.

Таблица 3. – Исходные данные для расчётного примера

Наименование	Обозначение	Размерность	Величина
Электрическая мощность, выработанная за год	Э	$\times 10^6$ кВт·ч	250
		ТДж	900
Коэффициент полезного действия оборудования станции	КПД	%	35
Годовой расход топлива в энергетических единицах ¹⁾ , ТДж	Q	ТДж	2 570
Годовой ресурс рабочего времени	$T_{р.в.}$	дней	365
Коэффициент температурной стратификации [8]	A	-	160
Коэффициент скорости оседания загрязняющих веществ [8]	F	-	1,0
Коэффициент рельефа местности [8]	η	-	1,0
Высота трубы	H	м	40,0
Диаметр устья трубы	D	м	1,4
Средняя скорость выхода ГВС из устья	w_0	м/с	зима: 5,0 лето: 4,0
Температура ГВС на выходе из устья	T_1	°С	100
Температура окружающего воздуха обеспеченностью 0,94 в январе и 0,98 в июле [18]	T_0	°С	зима: -12,0 лето: +25,0
Максимальная (в январе) и минимальная (в июле) из средних скоростей ветра по румбам [18]	u	м/с	зима: 3,2 лето: 3,3

¹⁾ Пересчёт абсолютных единиц топлива в энергетические регламентирован «Методологическими положениями...», утверждёнными Постановлением Госкомстата Российской Федерации от 23.06.1999 №46 [17].

Таблица 4. – Суммарный годовой выброс в атмосферу газообразных загрязняющих веществ при работе ТЭС

Наименование	Обозначение	Природный газ	Мазут
Диоксид углерода, т	CO ₂	144 260	199 030
Оксид углерода, т	CO	0	2
Оксиды азота (в пересчёте на NO ₂), т	NO _x	580	630
Оксиды серы (в пересчёте на SO ₂), т	SO _x	1	14
Метан, т	CH ₄	3	8
Закись азота, т	N ₂ O	0	2

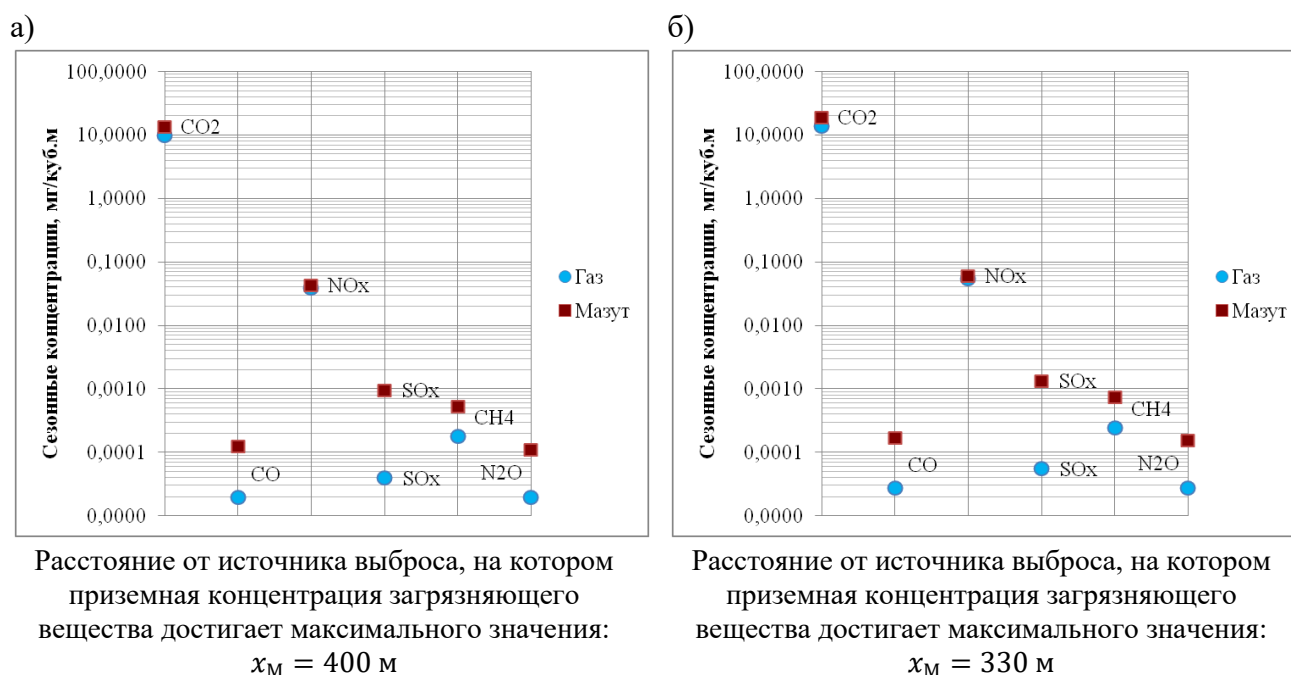


Рис. 2. Расчётная оценка выбросов основных загрязняющих веществ, выполненная по предложенной методике для климатических условий холодного и тёплого сезонов: а) – зима; б) – лето

Суммарное воздействие загрязняющих веществ \bar{C}_i определяется зависимостью:

$$\bar{C}_i = \frac{C_{NO_2i}}{ПДК_{NO_2i}} + \frac{C_{SO_2i}}{ПДК_{SO_2i}} + \frac{C_{COi}}{ПДК_{COi}}, \quad (5)$$

где индекс i принимает значение:

$i = 1$ – для природного газа;

$i = 2$ – для топочного мазута.

Приведённая концентрация (5) отражает случай суммации загрязняющих веществ [4]. В качестве значений концентраций приняты их среднегодовые

концентрации для преобладающих направлений ветра в Тихинском районе (рис. 3). Предельно допустимые концентрации соответствуют среднесуточным концентрациям.

Расчёт даёт следующие значения:

$$\bar{C}_1 = 1,080 ;$$

$$\bar{C}_2 = 1,199 .$$

Полученные результаты свидетельствуют о завышенных значениях суммарных воздействий, однако, величина превышения соизмерима с точностью оценки этих параметров и условности принятых исходных данных.

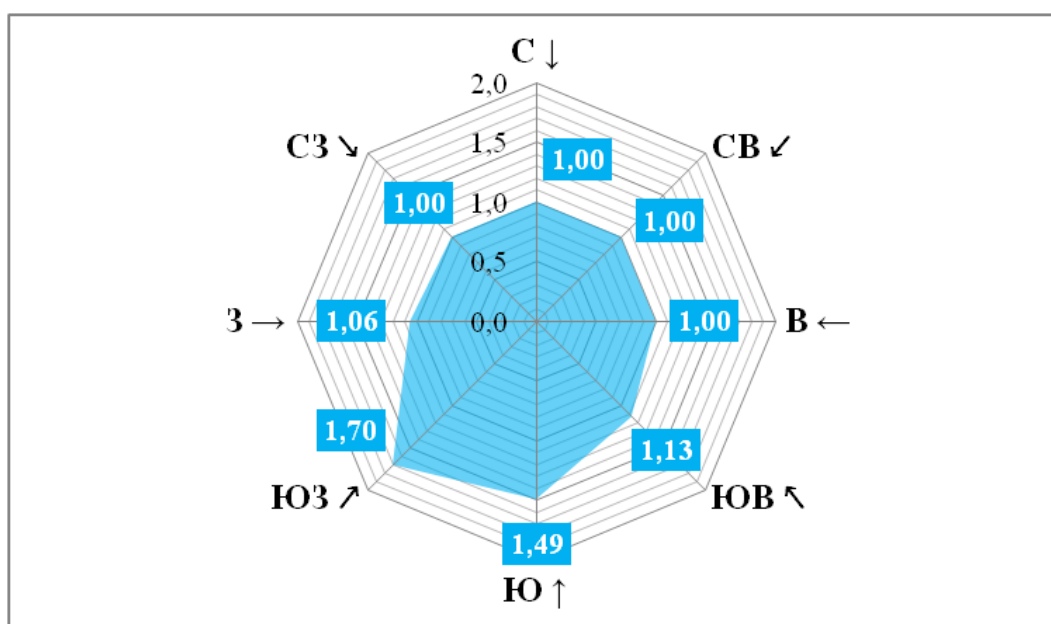


Рис. 3. Принятое в соответствии с рекомендациями методов [8] соотношение $\frac{P}{P_0}$ для климатических условий Тихвинского района

Заключение

Результатом настоящей работы является методика расчётного прогноза объёмов загрязнений атмосферного воздуха тепловыми электростанциями. Новизна предложенного подхода заключается в том, что в основу расчёта валовых выбросов загрязняющих веществ положен объём выработки электроэнергии за рассматриваемый период, в то время как традиционные методики базируются на массе израсходованного топлива в абсолютных единицах. В некоторых случаях такой подход обладает преимуществами, например, при проектировании объектов электроэнергетики, когда мощность станции является важнейшим параметром

технического задания. Прогноз объёма выбросов загрязняющих веществ, оценка и оптимизация параметров технических решений системы отведения дымовых газов в этом случае значительно облегчается.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России № 075-01351-23ПР на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов от 27 декабря 2022 года Санкт-Петербургскому научному центру РАН, тема FWGF-2019-0001.

Литература

1. Схема и программа развития электроэнергетики Ленинградской области на 2021-2025 годы. Пояснительная записка. Том 1. Книга 1. Часть 1. 2021. – 236 с.
2. Схема и программа развития электроэнергетики Ленинградской области на 2021-2025 годы (в части теплоснабжения). Том 1. Книга 3. 2021. – 138 с.
3. *Кляус К.М., Пожарская О.Д.* Методика расчёта загрязнения атмосферы на основе данных о производимой электрической и тепловой энергии // Проблемы современной экономики. Евразийский международный научно-аналитический журнал, 2022, № 4(84). – С. 177-182.
4. ГН 2.1.6.1338-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест: Гигиенические нормативы. – М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава РФ, 2003. – 86 с.
5. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
6. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2. Energy / Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme // The Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 2006.
7. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд. в 2-х частях. Под ред. С. Калверта и Г.М. Инглунда / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988.
8. Методы расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе / Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 №273.
9. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
10. *Turner D.B.* Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates / U.S. Department of Health, Education, and Welfare. – U.S. Government Printing Office, 1970. – 84 p.

11. *Lees F.P.* Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Vol. 1, 2, 3. Second Edition. – London: Butterworth-Heinemann (Reed Educational and Professional Publishing), 1996. – 2727 p.
12. *Mannan S.* Lee's Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Vol. 1, 2, 3. Third Edition. – Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 3708 p.
13. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Second Edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 1225 p.
14. *Stull R.* Meteorology for Scientists and Engineers. Third Edition / Chapter 19. Air Pollution Dispersion, 2015, p. 723-744.
15. *Cimorelli A.J., Perry S., Venkatram A.* et al. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization // Journal of Applied Meteorology. May 2005, Vol. 44. – pp. 682-693.
16. *Perry S., Cimorelli A.J., Pain R.J.* et al. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases // Journal of Applied Meteorology. May 2005, Vol. 44. – pp. 694-708.
17. Постановление Госкомстата «Об утверждении «Методологических положений по расчёту топливно-энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой» от 23.06.1999 №46.
18. СП 131.13330-2018 Свод правил. Строительная климатология. СНиП 23.01-99. – М.: Стандартинформ, 2019. 113 с.