

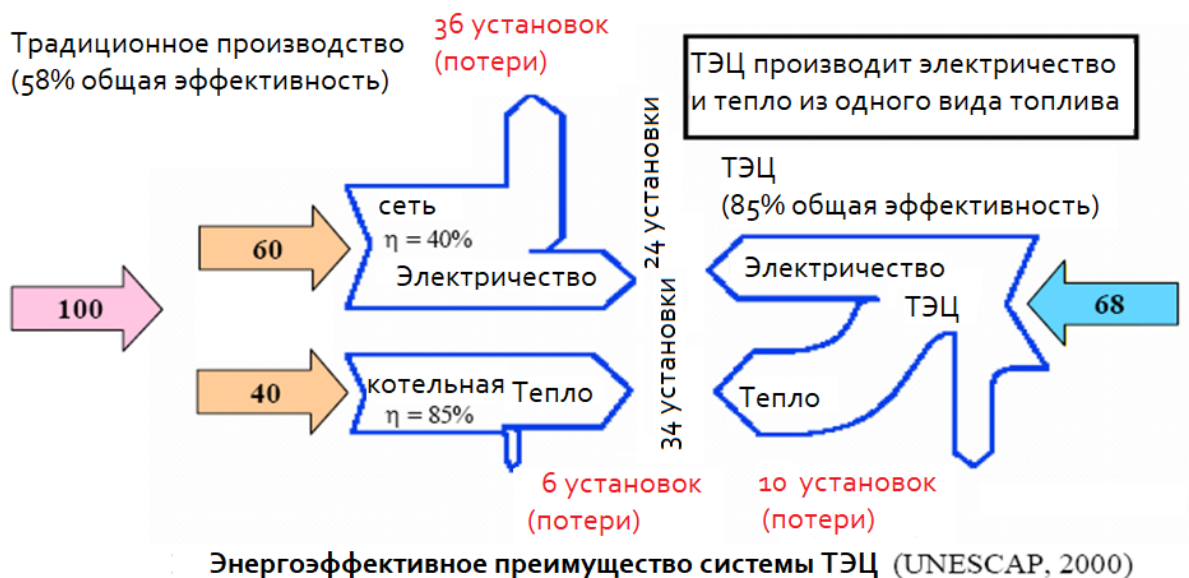
Расчет выбросов CO₂ в системах ТЭЦ и рекомендации

1 Мотивация

Методы распределения выбросов CO₂ являются очень важными инструментами энергетической политики, и они разрабатываются для поддержки планирования энергетических систем, а также принятия решений и разработки политики как на правительственном, региональном и промышленном уровнях. Распределение выбросов CO₂ на выработку энергии ТЭЦ необходимо, особенно в том случае, когда вырабатываемая теплоэнергия и электроэнергия потребляются разными потребителями и когда необходимо провести сравнение с другими способами подачи тепла.

Системы совместного производства тепла и энергии производят электрическую энергию и тепло, но тепло может быть произведено из ископаемого топлива или электроэнергии с КПД более 95%, электроэнергия производится из ископаемого топлива/тепла с КПД до 45%. Возникает следующий вопрос:

Сколько выбросов мы должны выделять на производство энергии и тепла?



2 Оценка ПГП выбросов

Существует 3 стандартных уравнения, описывающих выбросы CO₂ для каждого типа сжигаемого топлива:

$$\text{ПГП выбросов} = \text{топливо} * EF_1 \quad (1)$$

ПГП выбросов = количество выброшенного CO₂, CH₄ или N₂O, Топливо = масса или объем сжигаемого топлива, EF₁ = коэффициент выбросов CO₂, CH₄ или N₂O на единицу массы или объема,

$$\text{ПГП выбросов} = \text{топливо} * HHV * EF_2 \quad (2)$$

HHV = Теплосодержание топлива (более высокая теплотворная способность), в единицах энергии на массу или объем топлива; EF₂ = коэффициент выбросов CO₂, CH₄, или N₂O на единицу энергии

$$\text{ПГП выбросов} = \text{топливо} * CC * 44/12 \quad (3)$$

CC = Содержание углерода в топливе в единицах массы углерода на массу или объем топлива, 44/12 = соотношение молекулярных масс CO₂ и углерода.

2.1 Первичная энергия (ПЭ)

Первичная энергия означает энергию из возобновляемых и невозобновляемых источников, которая не подверглась никакому преобразованию или трансформации. ПЭ может быть ископаемой или возобновляемой, или сочетанием того и другого. Она может быть преобразована и доставлена конечным потребителям в виде конечной энергии, например электричества или тепла. Подача ПЭ обычно включает в себя процессы в цепочке поставок (например, добычу, транспортировку и подготовку исходного топлива).

2.2 Первичный энергетический фактор (ПЭФ)

Первичный энергетический фактор соединяет первичную и конечную энергию - показывает, сколько ПЭ используется для выработки единицы электроэнергии или единицы полезной тепловой энергии.

Первичная энергия * Эффективность системы = конечная энергия

Коэффициент первичной энергии = Первичная энергия/конечная энергия

3 Методы распределения выбросов CO₂

В рамках проекта LowTEMP были оценены следующие (наиболее популярные в ЕС) методы: энергетический метод, метод альтернативной генерации, метод бонусной энергии, эксергический метод, метод 200%, Pas 2050, дрезденский метод. В литературе описаны и другие методы: финский метод, рабочий метод, все сбережения направляются на электроэнергию, все сбережения направляются на тепло, 50%-50% распределение сбережений между теплом и электричеством, первичная энергоемкость тепла и электроэнергии.

3.1 Энергетический метод

Энергетический метод - расход топлива или выбросы CO₂ распределяются на выработанную теплоту и электроэнергию исходя из энергосодержания производимой продукции. Преимущество этого метода в том, что он очень прост и прозрачен. Недостатком является то, что по энергосодержанию продуктов не различают энергетические продукты, т.е. не учитывают их качества (электричество легче трансформировать в тепло, чем наоборот).

Коэффициент распределения выбросов CO₂ для производства тепла:

$$f_Q = Q / (Q + E)$$

3.2 Метод альтернативной генерации

Метод альтернативной генерации, также известный как Метод эффективности или Метод распределения выгод, был разработан Финской ассоциацией централизованного теплоснабжения. Этот метод распределяет выбросы CO₂ и ресурсы на производство тепловой и электрической энергии пропорционально топливу, необходимому для производства того же количества тепловой или электрической энергии на отдельных установках. Альтернативное производство на двух отдельных заводах будет зависеть от их эффективности η_{heat} и η_{elec} соответственно.

$$f_Q = (Q/\eta_{alt_heat}) / (Q/\eta_{alt_heat} + E/\eta_{alt_elec})$$

3.3 Метод бонусной энергии

Метод бонусной энергии часто используется для распределения выбросов CO₂ между производством тепловой и электрической энергии в Европейском Союзе. В этом методе тепло является основным продуктом, в то время как энергия, полученная в ходе процесса, рассматривается как бонус. Первичная энергия сначала распределяется на электроэнергию, вырабатываемую на ТЭЦ, которая затем вычитается из первичной потребляемой энергии.

$$f_Q = (E_{P,in} - W_{CHP} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$$

3.4 Эксергический метод

Эксергический метод (физически правильный метод) - расход топлива или выбросы CO₂ распределяются на произведенное тепло и электроэнергию на основе эксергетического содержания продуктов. Эксергетическое содержание продукта - это мера максимальной полезной работы, которую может выполнить продукт. Соотношение между содержанием энергии и эксергии называется фактором качества.

С термодинамической точки зрения электроэнергия, вырабатываемая при когенерации, оценивается с коэффициентом эксергии 1, поэтому эксергия электроэнергии определяется как $Ex_E = E$. Это означает, что 100% электроэнергии может быть преобразовано в любую форму энергии. Тепло может быть преобразовано в электроэнергию или любую другую форму энергии только в некоторой степени, поэтому эксергию тепла можно рассчитать как

$$Ex_Q = (1 - T_0/T) Q$$

где T_0 – средняя температура окружающей среды в течение отопительного периода, а T – средняя термодинамическая температура $T = (T_s - T_r) / \ln(T_s / T_r)$

$$f_0 = E_{xQ} / (E_{xQ} + E_{xE})$$

3.5 Метод 200%

предполагает 200% - ную эффективность производства тепла. Это означает, что для получения 1 единицы тепла необходимо использовать 0,5 единицы топлива, а остальные 0,5 единицы будут извлекаться из конденсатора турбины. Это означает, что половина выбросов, связанных с производством тепла, может быть связана с производством электроэнергии.

Этот метод, введенный Датским энергетическим агентством, может быть использован при распределении затрат топлива ТЭЦ на производство тепла в статистике энергетики и выбросов.

$$f_0 = Q / 2 \text{ Fuel}_{in}$$

3.6 Метод Pas 2050

Метод PAS 2050 - это британский стандарт, который объясняет расчет выбросов парниковых газов для производства товаров и услуг. При распределении выбросов от ТЭЦ к вырабатываемой тепловой и электрической энергии используется специальный коэффициент "интенсивности" n , который определяет выбросы, выделяющиеся при сжигании топлива

$$f_0 = Q / (Q + n E)$$

Распределение выбросов на тепло- и электроэнергию зависит от удельного технологического соотношения тепла и электроэнергии от каждой ТЭЦ-системы. Для ТЭЦ с котельными (уголь, древесина, твердое топливо) коэффициент n равен 2,5, а для турбинных ТЭЦ (природный газ, свалочный газ) $n = 2,0$.

3.7 Дрезденский метод

Дрезденский метод основан на оценке эксергии. На электростанциях вся первичная энергия связана с производством электроэнергии. В то же время на ТЭЦ одна часть первичной энергии расходуется на производство тепловой энергии. Дрезденский метод описывает, как оценить потери электроэнергии, вызванные отбором тепла (конденсацией водяного пара) на ТЭЦ

$$f_0 = \Delta E / E$$

Коэффициент распределения для системы ТЭЦ с годовой тепловой нагрузкой 27 ГВт ч и максимальной потребностью в тепле 14 МВт

Вес значимости параметров с точки зрения партнеров проекта и совокупная оценка (выведена арифметически)

Партнер	Простота метода	Сфера применения	Метод признан и проверен	Применим к распределению квот на CO ₂	Термодинамическая достоверность	Включает КПД ТЭЦ	Эксергия	Доступность данных	Чувствительность
AGFW	1	5	2	5	5	5	4	2	4
ZEBAU	1	5	2	5	5	5	3	2	3
BTU	2	3	3	4	5	4	4	3	4
RTU	3	3	3	3	3	3	3	3	3
IMP PAN	3	3	4	3	5	3	4	4	3
Thermopolis	4	4	4	4	3	2	1	4	4
HEM	5	4	3	5	3	3	2	5	4
Среднее	2.714	3.857	3.000	4.143	4.143	3.571	3.000	3.286	3.571

Источник: собственные вычисления с использованием многокритериального анализа принятия решений

4 Вывод

Проект LowTEMP оценил методы распределения CO₂ с использованием многокритериального анализа решений

- Партнеры выбрали **метод эксергии (Карно)** как наилучший доступный метод (выше 450 пунктов) распределения CO₂, по крайней мере, среди рассмотренных. В качестве возможной альтернативы следует рассматривать два других метода: PAS 2050 и 200% – они получили аналогичную оценку, то есть почти 400 баллов.
- Наиболее подходящий с термодинамической точки зрения – **эксергический метод** – лучше рассматривает качество энергии и отображает физический верхний предел распределения CO₂ на тепло как побочный продукт. Существует вариант эксергетического метода – **Дрезденский**, но он требует большей доступности данных и более обширных расчетов.
- Методы **альтернативной генерации** и **бонусной мощности** были признаны наименее полезными партнерами проекта LowTEMP.

Оценки методов с помощью многокритериального анализа принятия решений

Метод	AGFW	ZEBAU	BTU	RTU	IMP PAN	Thermopolis	HEM	Сумма	Место	Отклонение
Энергетический метод	52.000	52.000	49.857	52.286	53.143	59.143	53.143	371.57	5	5.0%
Метод альтернативной генерации	43.286	53.286	46.429	52.714	45.857	36.429	40.571	318.57	7	12.5%
Метод бонусной энергии	48.286	48.286	41.286	52.143	55.429	44.571	39.857	329.86	6	11.1%
Эксергический метод	71.000	71.000	70.714	60.714	60.571	59.429	57.000	450.43	1	9.0%
Метод 200%	60.286	56.857	59.143	56.143	53.143	44.571	66.000	396.14	3	10.9%
Метод PAS 2050	57.571	57.000	59.429	63.857	57.286	44.571	58.571	398.29	2	9.6%
Дрезденский метод	63.857	63.857	45.714	60.143	46.286	44.571	50.429	374.86	4	15.1%
	15.5%	12.4%	17.9%	7.7%	9.5%	16.5%	16.9%			

