

Расчет выбросов CO₂

в системах ТЭЦ и рекомендации

Обучающий пакет LowTEMP - ОБЗОР



LowTEMP2.0

Введение

Введение - Политика и цели в области защиты климата
Введение
Системы энергоснабжения и НЦТ
Системы энергоснабжения в регионе Балтийского моря

Энергетические стратегии и пилотные проекты

Методология разработки энергетических стратегий
Пилотные энергетические стратегии – цели и условия
Пилотные энергетические стратегии – Примеры
Пилотные проекты
Расчет выбросов CO₂
Расчет анализа жизненного цикла

Финансовые аспекты

Анализ затрат жизненного цикла проектов НЦТ
Экономическая эффективность и пробелы в финансировании
Заключение договоров и модели платежей
Бизнес-модели и инновационные структуры финансирования

Технические аспекты

Системы труб
ТЭЦ
Большие солнечные тепловые системы
Избыточное и бросовое тепло
Большие системы тепловых насосов

Конверсия электроэнергии в тепло и газ

Тепловые, солнечные и хранилища из материалов с фазовым переходом
Системы тепловых насосов
Низкотемпературные системы отопления
Подготовка питьевой воды
Системы вентиляции

Лучшие практики

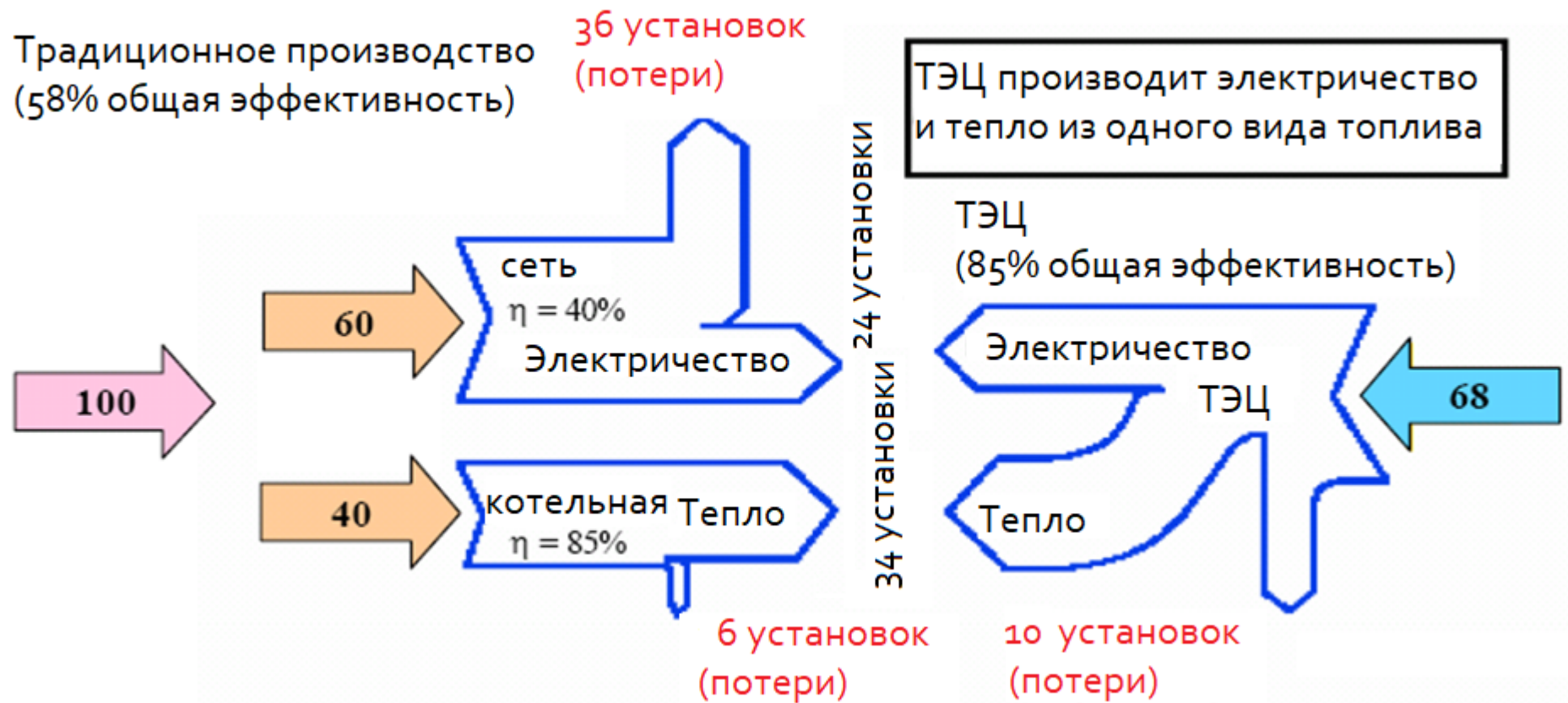
Лучшие практики – часть 1
Лучшие практики – часть 2

- 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.
- **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%**
- Сколько выбросов мы должны выделять на производство энергии и тепла ?



Source: <https://aero7.pl/poradnik/jak-chronic-sie-przed-smogiem>

Преимущества ТЭЦ



Энергоэффективное преимущество системы ТЭЦ (UNESCAP, 2000)

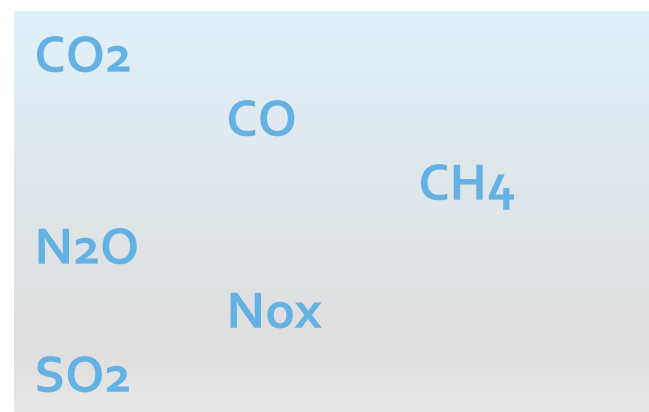
Source: UNESCAP, 2000



Источники выбросов и их потенциал глобального потепления

Потенциал глобального потепления

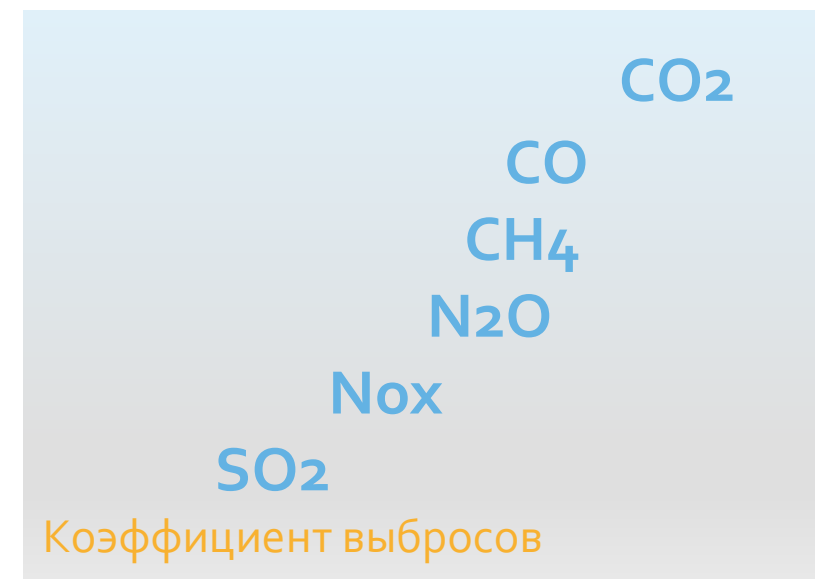
- Сжигание ископаемого топлива приводит к выбросам парниковых газов, в том числе в основном углекислого газа, метана, закиси азота и других. **Выбросы этих газов преобразуются в CO₂** путем умножения количества ПГ на их потенциал глобального потепления (ПГП).
- ПГП рассчитывается таким образом, чтобы отразить, как **долго газ остается в среднем в атмосфере и насколько сильно он поглощает энергию**, то есть относится к общему вкладу в глобальное потепление, который является результатом выброса одной единицы этого газа относительно одной единицы эталонного газа – CO₂.
- Примеры:**
 - ПГП CO₂ равен (по определению) 1
 - Метан (CH₄): 28–36
 - Закись азота (N₂O): 265–298.





Методы оценки ПГП выбросов

- Существуют **два основных метода** оценки выбросов ПГ из стационарных источников горения:
 - прямое измерение
 - анализ расхода топлива
- Прямое измерение выбросов CO₂ может быть выполнено с помощью **системы непрерывного мониторинга выбросов**.
- Расчет выбросов CO₂ с использованием метода анализа топлива включает определение содержания углерода в сгоревшем топливе;
- **Коэффициент выбросов** определяется как средняя норма выбросов данного ПГ для данного источника по отношению к единицам активности (обычно это количество сгоревшего топлива или кВтч потребляемой электроэнергии и т.д.).





Оценка ПГП различного топлива

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,

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

Руководство по инвентаризации парниковых газов Агентства по охране окружающей среды США, *Прямые выбросы от стационарных источников горения*, 2016;

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.



Первичная энергия и первичный энергетический фактор

Первичная энергия (ПЭ)

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).

Первичный энергетический фактор (ПЭФ)

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

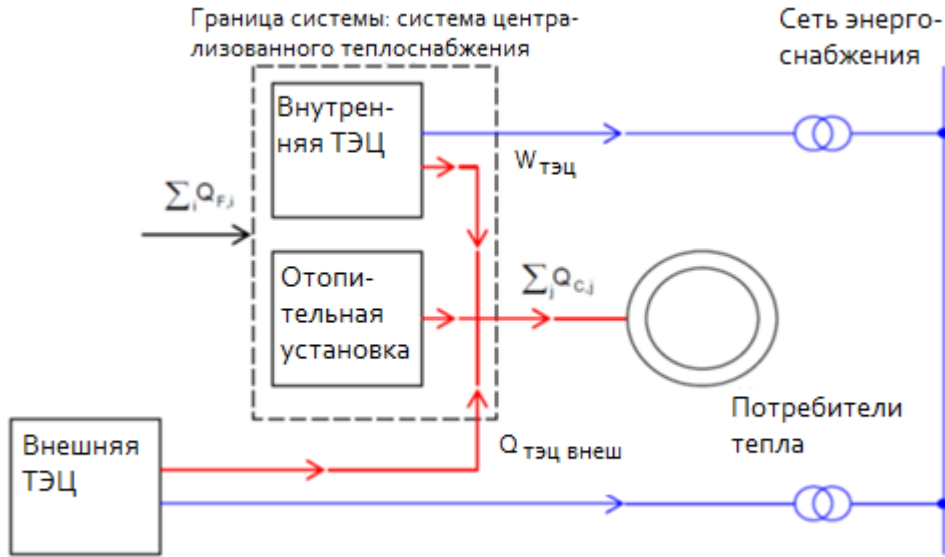


Source: Jenny Bengtsson, SBH, Malmö

Первичный энергетический фактор $f_{P,DH}$ системы централизованного теплоснабжения



LowTEMP2.0



- $Q_{F,i}$ – расход топлива (конечной энергии) на тепловые установки и когенерационные установки в рамках рассматриваемой системы в течение рассматриваемого периода (обычно одного года) - измеряется в точке поставки;
- W_{CHP} – производство электроэнергии когенерационными установками рассматриваемой системы;
- $Q_{C,j}$ – потребление тепловой энергии, измеренное на подстанциях заказчика в течение рассматриваемого времени (обычно один год);
- $Q_{CHP,ext}$ – подача тепла в рассматриваемую систему от внешних когенерационных электростанций
- $f_{P,F,i}$ – первичная энергия/ресурсный фактор топлива (конечные энергозатраты);
- $f_{P,elt}$ – первичная энергия/ресурсный фактор электрической энергии.

$$f_{P,DH} = \frac{\sum_i Q_{F,i} \cdot f_{P,F,i} - W_{CHP} \cdot f_{P,elt}}{\sum_j Q_{C,j}}$$

Выбросы CO₂ от системы централизованного теплоснабжения



LowTEMP2.0

$$K_{dh} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{F(i)} * K_{F,tot(i)} - \sum_{i=1}^n \frac{W_{chp(i)} * K_{F,chp(i)}}{\eta_{el,(i)}}}{\sum_{j=1}^n Q_{C(j)}}$$

- K_{dh} – коэффициент выбросов CO₂ для тепла, подаваемого в здание в кгCO₂/Мвтч,
- $Q_{F(i)}$ – чистая энергетическая ценность топлива "i", подаваемого в точку, где оно окончательно преобразуется в тепло [МВтч] (с использованием более низкой теплотворной способности),
- $K_{F,tot(i)}$ – коэффициент выбросов углекислого газа для топлива 'i' в кгCO₂/Мвтч_{топлива}
- $W_{chp(i)}$ – объем произведенной электроэнергии в ТЭЦ топливом 'i' (произведенной электроэнергии за вычетом электроэнергии вспомогательного использования),
- $K_{F,chp(i)}$ – общий коэффициент выбросов парниковых газов для электроэнергии, произведенной на ТЭЦ, в кгCO₂/МВтч,
- $\eta_{el,(i)}$ – по умолчанию электрическая эффективность конденсации для обычной тепловой электростанции установлена на уровне 40%,
- $Q_{C(j)}$ – поставляемой тепловой энергии в здание 'j' на границы системы

Распределение выбросов CO₂ на электрическую и тепловую энергию, вырабатываемую ТЭЦ



LowTEMP2.0

- **Распределение выбросов CO₂** на выработку энергии ТЭЦ необходимо, особенно в том случае, когда производимая тепловая энергия и электроэнергия потребляются разными потребителями и когда необходимо провести сравнение с другими способами подачи тепла.
- На **ТЭЦ**, когда тепло и электроэнергия вырабатываются одновременно, **трудно/спорно, как точно распределить первичные энергозатраты**, выбросы или эксплуатационные расходы на любой из этих видов энергогенерации.



ТЭЦ на 50 кВт

Source IMP PAN



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

Иные 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.

Энергетический метод

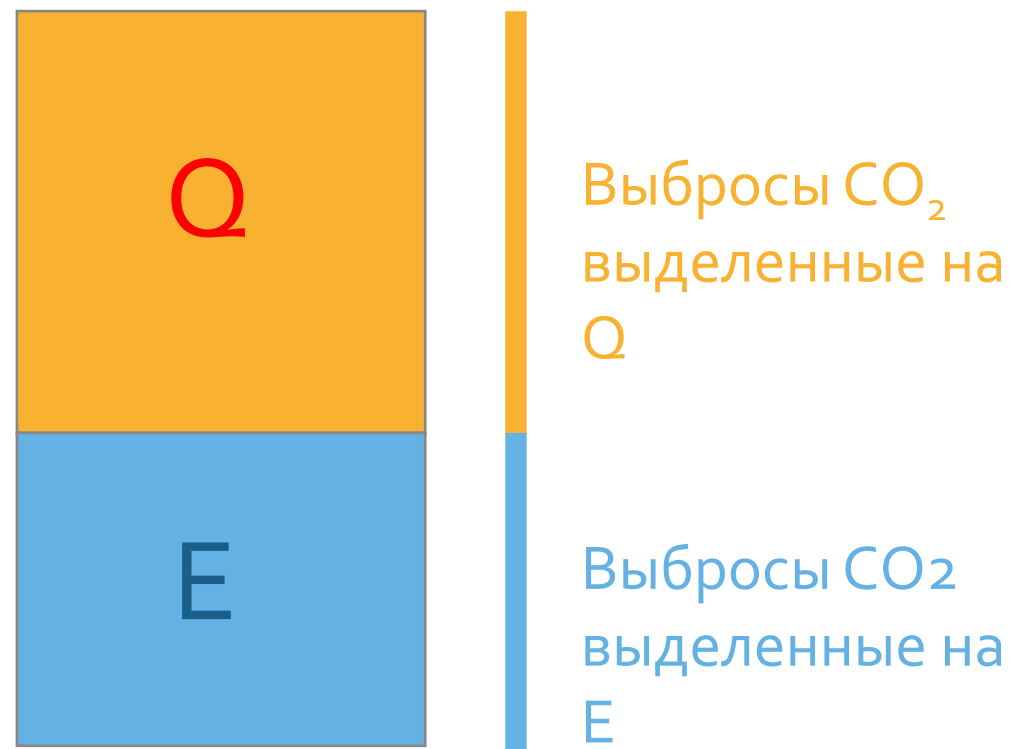


LowTEMP2.0

Энергетический метод - расход топлива или выбросы CO₂ распределяются на выработанную теплоту и электроэнергию исходя из энергоёмкости производимой продукции. Преимущество этого метода в том, что он очень прост и прозрачен. Недостатком является то, что по энергоёмкости 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:

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

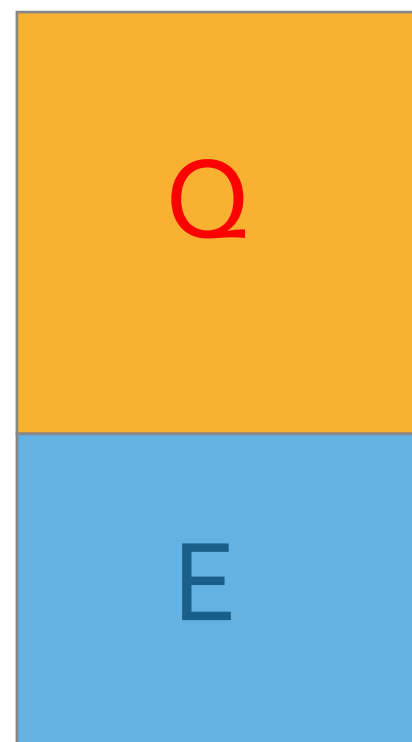


Произведенное тепло и энергия

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.

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



Выбросы CO₂
выделенные
на Q

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

Выбросы CO₂
выделенные
на E

$$f_E = 1 - f_Q$$

Произведенное тепло и энергия

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.

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



Произведенное тепло и энергия

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: $Ex_Q = (1 - T_o/T) Q$

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

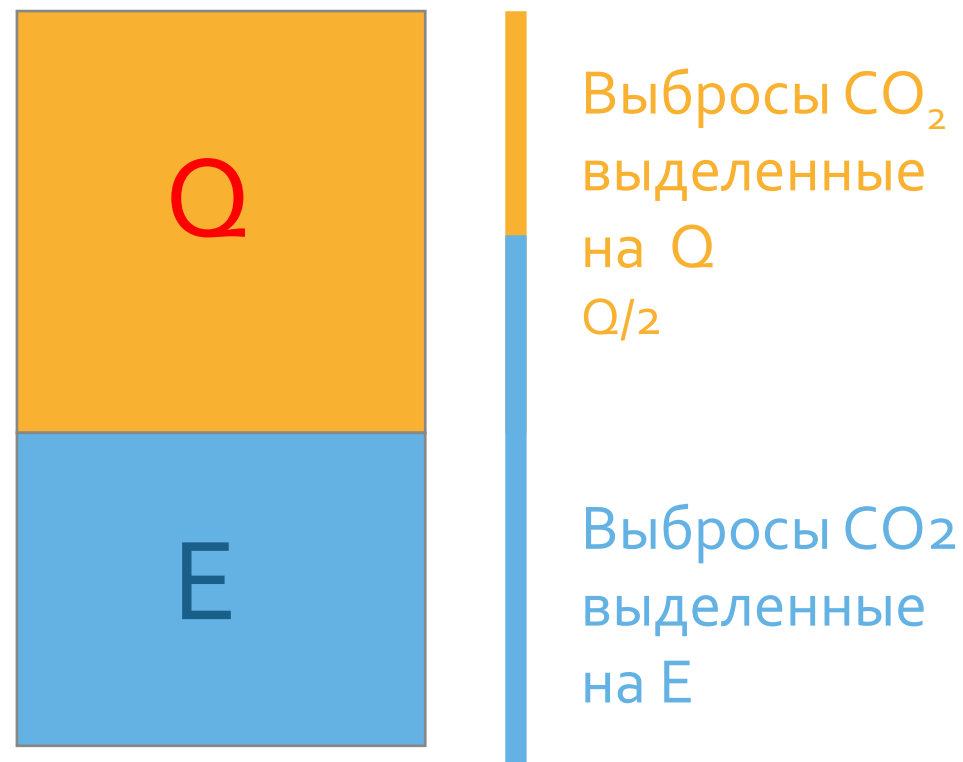
$$f_Q = Ex_Q / (Ex_Q + Ex_E)$$

Метод 200%

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.

$$f_Q = Q / 2 Fuel_{in}$$



Произведенное тепло и энергия

Метод PAS 2050

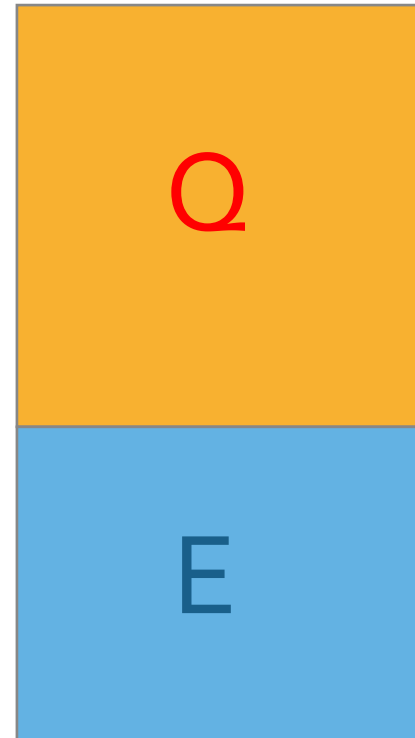


LowTEMP2.0

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

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

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) $n = 2,0$.



Выбросы CO₂
выделенные на Q
 $f_Q = Q / (Q + n E)$

Выбросы CO₂
выделенные на E
 $f_E = 1 - f_Q$

Произведенное тепло и энергия

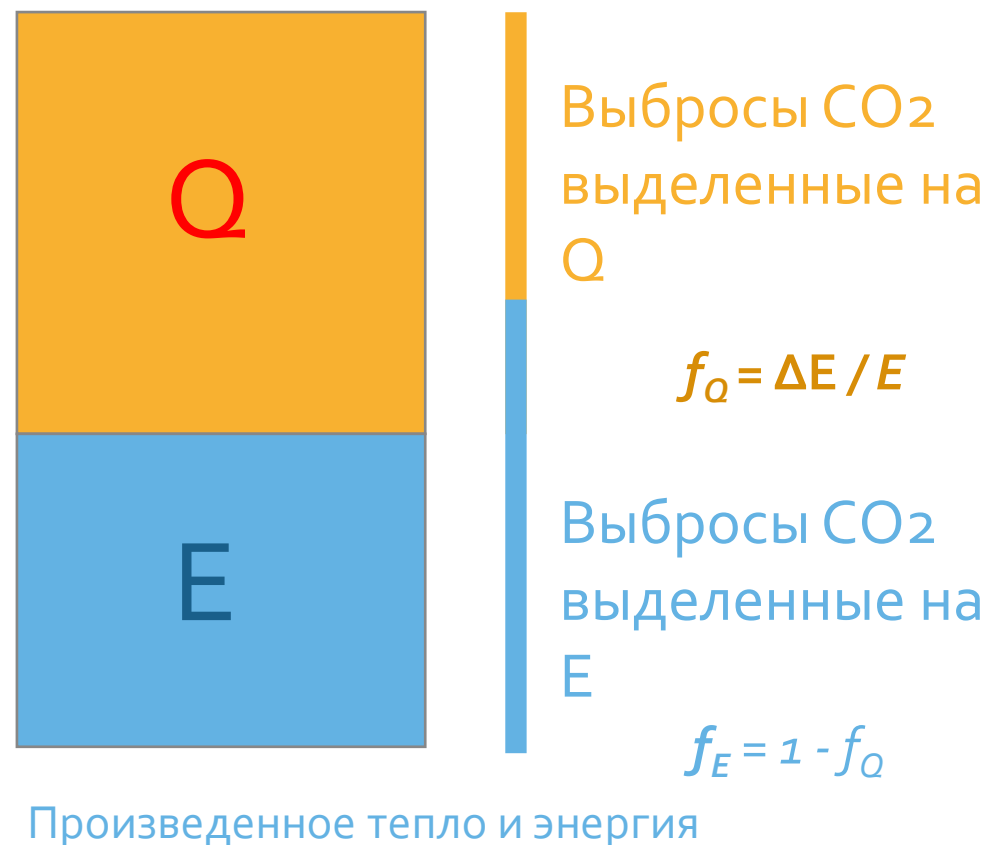
Дрезденский метод

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

$$\Delta E = Q \eta_c \nu_p,$$

где η_c это эффективность Карно и ν_p это степень качества процесса.

$$f_Q = \Delta E / E$$



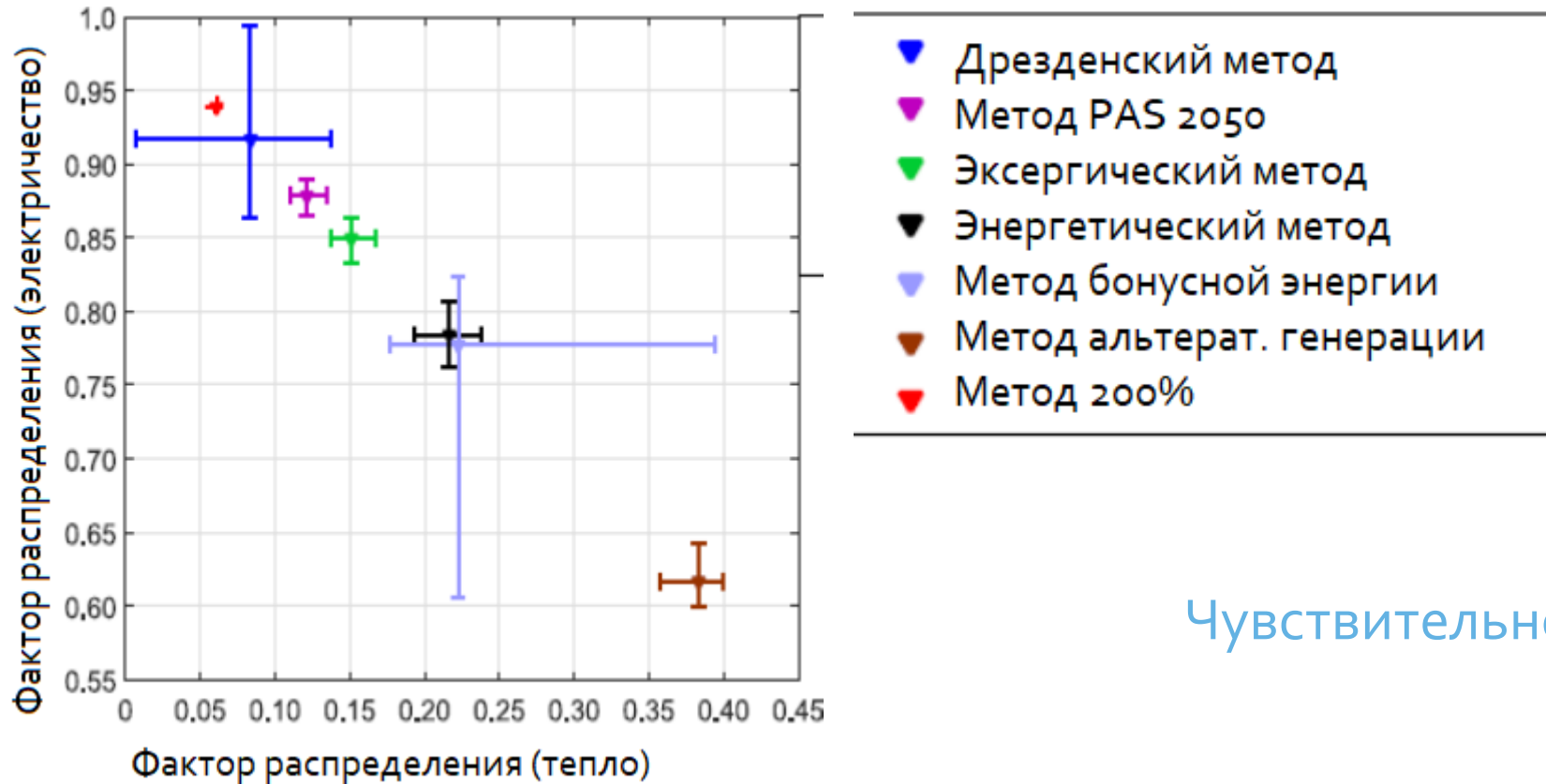
Распределение выбросов CO₂ на производство тепла

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

Метод	Фактор распределения выбросов при производстве тепла, f_a	Пример значения f_a
Энергетический метод	$Q / (Q + E)$	0,2162
Метод альтерн. генерации	$(Q/\eta_{alt_heat}) / (Q/\eta_{alt_heat} + E/\eta_{alt_elec})$	0,3830
Метод бонусной энергии	$(E_{P,in} - W_{CHP} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$	0,2226
Эксергический метод	$EX_Q / (EX_Q + EX_E)$	0,1507
Метод 200%	$Q / 2 Fuel_{in}$	0,0608
Метод PAS 2050	$Q / (Q + n E)$	0,1212
Дрезденский метод	$\Delta E / E$	0,0834

Source: Tereshchenko and Nord, 2015

Чувствительность методов распределения выбросов CO₂



Чувствительность зависит от системы

Source: Tereshchenko and Nord, 2015

Оценка методов распределения выбросов CO₂ в рамках проекта по низкотемпературному централизованному теплоснабжению



LowTEMP2.0

- Проект LowTEMP оценил методы распределения CO₂ с использованием многокритериального анализа решений и девяти критериев, принадлежащих к четырем группам:
- популярность (**простота метода, область применения, признанный и доказанный метод**), термодинамические аспекты (**целесообразность распределения выбросов CO₂, термодинамическая правдоподобность, включение КПД ТЭЦ, эксергия**), доступность данных и чувствительность.
- Критерии и более поздние методы были оценены 7 партнерами проекта LowTEMP: AGFW, ZEBAU, VTU, RTU, IMP PAN, Thermopolis и NEM из 5 стран региона Балтийского моря (Германия, Финляндия, Латвия, Польша и Швеция).

Критерии:

- простота метода,
- область применения,
- признанный и доказанный метод
- целесообразность распределения выбросов CO₂,
- термодинамическая правдоподобность,
- включение КПД ТЭЦ,
- эксергия,
- доступность данных,
- чувствительность.

Оценка методов распределения выбросов CO₂ в рамках проекта LowTEMP



LowTEMP2.0

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

Оценка методов распределения выбросов CO₂ в рамках проекта LowTEMP



LowTEMP2.0

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%			

Рекомендации проекта LowTEMP

- 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.

IMP PAN

Prof. Adam Cenian
Jarosław Losiński

14 Fiszera St
80-231 Gdańsk
Poland

E-mail: cenian@imp.gda.pl

Tel: +48 58 5225 276

www.imp.gda.pl

Перевод и адаптация: **АНО Центр энергетической эффективности,**
Анна Голованова, Александр Бердино



Адрес: 185035 Петрозаводск, ул. Энгельса 10, офис 504.
Тел/факс: +7 (8142) 76 93 91,
Сайт: <http://kaeec.org>
Эл.почта: kaeec@sampo.ru,
Twitter: https://twitter.com/ano_eec