

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ МИНИЭНЕРГОУСТАНОВОК
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
ACCOUNTING FOR THE IMPACT OF MINI-POWER PLANTS
ON THE ENVIRONMENT

Короткевич М. А., д-р техн. наук, профессор;
Старжинский А. Л., к-т техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
M. Korotkevich, Doctor of technical Sciences, Professor;
A. Starzhinsky, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Определено количество твердых частиц золы, оксидов серы, оксидов азота, оксидов углерода и углекислого газа, выбрасываемых в атмосферу вместе с дымовыми газами при сжигании твердого топлива, а также произведена экономическая оценка ущерба, причиняемая годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух при работе миниэнергоустановки.

Abstract. The amount of solid particles of ash, sulfur oxides, nitrogen oxides, carbon oxides and carbon dioxide emitted into the atmosphere together with flue gases during the combustion of solid fuels was determined, and an economic assessment was made of the damage caused by annual emissions of pollution into the atmospheric air during the operation of a mini-power plant.

Ключевые слова: миниэнергоустановка, местные виды топлива.
Key words: mini power plant, local fuels.

ВВЕДЕНИЕ

Включение в электрическую сеть миниэлектростанций приводит к изменению надежности сети, необходимости сохранения статической и динамической устойчивости электростанции и учета влияния миниэнергоустановок на окружающую среду.

Нами в порядке оценки влияния малой генерации на окружающую среду первоначально определяются объемы вредных выбросов в окружающий воздух (совместно с дымовыми газами: золы, оксидов серы, азота и углерода, а также углекислого газа), при сжигании твердого топлива на миниэнергоустановках. При этом интересно знать соотношение между удельными (приходящимся на 1 МВт мощности) объемами вредных веществ, испускаемых миниэнергоустановками и мощными электростанциями энергосистем. Выбрасываемые в атмосферу вредные вещества имеют различную токсичность. Поэтому суммирование объемов этих веществ для получения эквивалентного значения должно производиться с учетом их относительной агрессивности. Предстоит выяснить также соотношение между объемом израсходованного на

электростанции топлива и объемом выброшенного в воздух оксида углерода и углекислого газа.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оценим значения вредных выбросов (оксидов азота, сернистого ангидрида, золы, оксида углерода и углекислого газа) в атмосферу при сжигании топлива (древесной щепы и торфа) на электростанциях малой мощности [1].

Известно [2], что в структуре топлива электростанций Республики Беларусь 80 % занимает природный газ, далее идут сернистый мазут и попутный газ. Ежегодно на электростанциях сжигается $12 \cdot 10^6$ тонн условного топлива и ежегодно выбросы составляют: оксидов азота (NO и NO_2 или NO_x) – $(30 - 32) \cdot 10^3$, тонн, окислов серы (SO_2) – $60 \cdot 10^3$ тонн, золы – $6 \cdot 10^3$ тонн; оксида углерода (CO – угарный газ) – $5 \cdot 10^3$ тонн, т. е. объем выбросов составляет 0,86 % от всего сожженного топлива.

Критерии экологического воздействия энергетического объекта на окружающую среду должны учитывать факторы термодинамические (коэффициент полезного действия установки (КПД)), топливные (качество топлива) и технологические (особенности конструкции топочных устройств) [2].

К наиболее важному показателю, определяемому термодинамическим циклом, относится тепловое загрязнение окружающей среды, значение которого в относительных единицах приближенно может быть определено как

$$\Pi_{T^*} = \frac{1}{\eta} - 1, \quad (1)$$

где η – коэффициент полезного действия установки; равен 0,39; 0,44; 0,35; 0,7 [2] соответственно для паротурбинных, парогазовых, газотурбинных установок, теплоэлектроцентралей (ТЭЦ).

Значение Π_{T^*} определенное по данной формуле, равно 1,56; 1,27, 1,85 и 0,43; соответственно для паротурбинных, парогазовых, газотурбинных установок и ТЭЦ.

Чем меньше КПД, тем больше уровень теплового загрязнения окружающей среды. Так, загрязнение окружающей среды при работе газотурбинных установок примерно в 1,2 раза большее, чем при работе паротурбинных установок одинаковой мощности.

Основные характеристики местного топлива; подлежащего сжиганию в котельных установках мини-электростанций: торф – влажность до 50 %; теплота сгорания – $2560 \text{ ккал / кг} = 10,726 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг}$; зольность на сухую массу 1 % [2], например, в угле (0,2–5 %) [2]; щепа древесная влажность до 45–57 %; теплота сгорания – $2400 \text{ ккал / кг} = 10,056 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг}$; зольность на сухую массу 1 %.

В качестве основных загрязнителей воздушного бассейна основное место занимают оксиды азота, они составляют 6–8 % общего выброса всех загрязнителей, уступая лишь выбросу угарного газа, сернистого ангидрида и твердых частиц. Суммарное количество оксидов азота ($NO + NO_2 = NO_x$), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами при сжигании твердого или жидкого топлива определяется как [2].

$$M_{NO_x} = 10^{-3} \cdot k \cdot B \cdot \left(1 - \frac{Q_4}{100}\right) \cdot (1 - \varepsilon_1 \cdot r) \cdot (1 - \eta_{a3}), \text{ т / год}, \quad (2)$$

где $k = D / 20$ – коэффициент, характеризующий выход окислов азота, кг/т.у.т;

D – паропроизводительность котла, т/ч;

B – расход условного топлива за рассматриваемый период, т.у.т/год;

Q_4 – потеря теплоты от механической неполноты сгорания топлива; можно принять равным 4 % [2];

ε_1 – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов на снижение содержания оксидов азота; можно принять равным при сжигании твердого топлива 0,005 [2];

r – степень рециркуляции дымовых газов; равна не менее 0,3 [2];

η_{a3} – доля оксидов азота, улавливаемых в азотоочистительной установке, можно принять равной 0,85 [2].

Формула (2) составлена при условии одинаковой длительности работы азотоочистительной установки и котла, а также при твердом шлакоудалении, одноступенчатом сжигании топлива, без учета влияния качества топлива на выход оксидов азота.

При паропроизводительности котла 21,7 т/ч (Пружанская ТЭЦ мощностью 3,7 МВт), значение k равно 1,085 кг/т.у.т.; расход условного топлива $13 \cdot 10^3$ тонн за год: в том числе $7,8 \cdot 10^3$ тонн древесной щепы и $5,2 \cdot 10^3$ тонн торфа [1].

Значение M_{NO_x} определенное по формуле (2) и приведенным выше данным, равно 2,07 т/год (0,015 % от всего сожженного топлива или 559,4 кг/МВт).

Одним из наиболее агрессивных и трудно поддающихся очистке загрязнителей атмосферного воздуха, выбрасываемых главным образом энергетическими установками, являются оксиды серы SO_2 . Количество оксидов серы SO_2 , выбрасываемое в атмосферу с дымовыми газами при сжигании фрезерного торфа вычисляют по формуле [2]:

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot B_H \cdot S_P^P \cdot (1 - \eta_{SO_2}^c) \cdot (1 - \eta_{SO_2}^c), \text{ т / год}, \quad (3)$$

где B_H – расход натурального топлива за год, т/год;

S^P – содержание серы в топливе: равно 0,2 % для торфа [2];

η_{SO_2} – доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле: равна 0,15 для торфа [2];

η_{SO_2} – доля оксидов серы, улавливаемых в сероочистительных установках; примем равной 0,85.

Значение M_{SO_2} для мини-ТЭЦ мощностью 3,7 МВт, сжигающей за год фрезерного торфа в объеме $18,7 \cdot 10^3$ тонн, вычисленное по формуле (3), при отмеченных значениях S^P , η_{SO_2} , $\eta_{SO_2}^c$ равно 9,5 т/год. Заметим, что формула (3) составлена при условии одинаковой длительности работы сероочистительной установки и котла и использовании сухих золоуловителей.

Основными промышленными источниками выброса в атмосферу твердых частиц являются электростанции. Количество твердых частиц летучей золы и несгоревшего топлива, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, может быть определено по формуле:

$$M_{TB} = 0,01 \cdot B_H \cdot (a_{yH} \cdot A^P + q_4 \cdot \frac{Q_H^P}{32680}) \cdot (1 - \eta_3), \text{ т / год}, \quad (4)$$

где a_{yH} – доля золы в уносе; можно принять при сжигании древесных отходов равным 0,85; торфа 0,7 [2];

A^P – зольность рабочего топлива, дров – 1 %; торфа – 12,5 % [2];

Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

32680 кДж/кг – теплота сгорания углерода;

$\eta_3 = (0,8 \dots 0,995)$ коэффициент полезного действия золоулавливания [2].

При принятых исходных данных M_{TB} , определенное по формуле (4) будет равно 6,24 т/год. Здесь принято, что доля золы в уносе при сжигании древесного топлива равна 0,85; торфа – 0,7; зольность дров 1 %; торфа 12,5 %.

При экспертном сравнении между собой энергетических установок, та имеет большее преимущество, у которой меньшее суммарное значение массы M_i вредных выбросов, приходящихся на 1 мегаватт установленной мощности. Общая масса вредных выбросов при работе мини-электростанции (без окиси углерода) $M_{NO_2} = 2,07 \text{ т / год}$, $M_{SO_2} = 9,5 \text{ т / год}$, $M_{TB} = 6,24 \text{ т / год}$; $M_{СУМ1} = M_{NO_2} + M_{SO_2} + M_{TB} = 17,8 \text{ т / год}$ или на 1 МВт установленной мощности в год 4,8 т/(МВт·год).

Для крупных ТЭЦ Республики Беларусь, работающих на природном газе и мазуте, например на Гомельской ТЭЦ-2 мощностью 540 МВт при сжигании 498397 тыс. м³ природного газа (568429 т.у.т) и 48852 т мазута (63111 т.у.т) (соответственно 90,01 % и 9,99 % от всего сожженного топлива) характерен выброс окиси углерода 188,766 т/год или 0,35 т/(МВт·год). Общая масса вредных выбросов при работе Гомельской ТЭЦ (без окиси углерода) $M_{NO_2} = 1471,698 \text{ т / год}$, $M_{SO_2} = 1797,945 \text{ т / год}$, $M_{TB} = 5,639 \text{ т / год}$,

$M_{\text{СУМ2}} = M_{\text{NO2}} + M_{\text{SO2}} + M_{\text{TB}} = 3275,282 \text{ т/год}$ или 6,065 т/(МВт·год), что выше для приведенного нами примера миниэлектростанции мощностью 3,7 МВт 4,8 т/(МВт·год).

Одним из наиболее значительных токсичных веществ, попадающих в воздушный бассейн, является продукт неполного сгорания топлива: оксид углерода (CO). Оценим значение вредных выбросов оксида углерода в атмосферу при сжигании топлива на электростанциях малой мощности. Количество оксидов углерода M_{CO} в тоннах в год, выбрасываемого в атмосферу с дымовыми газами при сжигании твердого топлива вычисляются по формуле [2]:

$$M_{\text{CO}} = 0,01 \cdot C_{\text{CO}} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot K_p, \text{ т/год}, \quad (5)$$

где C_{CO} – выход оксида углерода при сжигании твердого топлива (кг/т) (для щепы $C_{\text{CO щепы}} = 2,978 \text{ кг/т}$, для торфа $C_{\text{CO торфа}} = 3,177 \text{ кг/т}$);

V – расход топлива за рассматриваемый период, т/год;

K_p – режимный коэффициент (при определении максимальных выбросов оксидов углерода значение $K_p = 1$).

При сжигании на Пружанской ТЭЦ топливной смеси древесной щепы 60 % и торфа 40 % по формуле (5) имеем $M_{\text{CO}} = 133,96 \text{ т/год}$ или на 1 МВт установленной мощности в год 36,205 т/(МВт·год).

Особое положение в составе выбросов в атмосферу от тепловых электростанций занимает углекислый газ, содержание которого в воздухе постоянно растет. Количество диоксида углерода M_{CO2} в тоннах за расчетный период, выбрасываемое в атмосферу с дымовыми газами при сжигании твердого или жидкого топлива, вычисляется по формуле [2].

$$M_{\text{CO2}} = 3,67 \cdot 0,01 \cdot C^P \cdot V \cdot \left(1 - \frac{q_3}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ т/год} \quad (6)$$

где 3,67 – количество диоксида углерода, образующееся при полном сжигании 1 т углерода, т/т;

C^P – содержание углерода в рабочей массе топлива, можно принять равным 31,21 % для щепы и 30 % для торфа фрезерного [2];

V – расход натурального топлива за расчетный период, т/год;

q_3 – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, % ($q_3 = 0,3$ % по [2]).

При сжигании на Пружанской ТЭЦ топливной смеси древесной щепы 60 % и торфа 40 % по формуле (6) имеем $M_{\text{CO2}} = 49175,12 \text{ т/год}$ или на 1 МВт установленной мощности в год 13290,6 т/(МВт·год). Выбросы CO_2 крупной электростанцией энергосистемы мощностью 540 МВт составляет 1131953 т/год или 2096,2 т/(МВт·год), что ниже примерно в 6 раз по сравнению с выбросами CO_2 мини-электростанцией.

При работе миниэлектростанций, использующих топливо (торф, древесную щепу) в атмосферу вместе с дымовыми газами выбрасывается зола, а также оксиды серы (при сжигании торфа), оксиды азота, оксиды углерода и углекислый газ (создающий так называемый «парниковый эффект»).

Экономическая оценка ущерба Y_i , причиняемая годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух для отдельного источника определяется как [2]

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i = a \sum_{i=1}^N M_i, \quad (7)$$

где $\gamma = 24$ руб/у.т – удельный ущерб (в ценах 1991 – 2,4 руб/у.т; в ценах 2022 г. – 24 руб/у.т);

σ – безразмерный коэффициент, зависящий от типа загрязняемой территории; для городов с населением свыше 300 тысяч человек, $\sigma = 8$ [2];

f – безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосферу, зависящий от высоты источника по отношению к среднему уровню и скорости ветра; равен 0,38 для газообразных (при высоте источника 75 м, разности температур газов 75 °С, средней скорости ветра 3 м/с) и равен 2,11 для золы торфа или дров;

A_i – показатель относительной агрессивности примеси i -го вида равен: для оксида углерода 1 усл. т/т; сернистого ангидрида 22 усл. т/т; оксида азота 41,1 усл. т/т; золы торфа 60 усл. т/т;

M_i – масса годового выброса примеси i -го вида в год, т/год, так, для Пружанской ТЭЦ характерно $M_{NO_2} = 2,07$ т/год, $M_{SO_2} = 9,5$ т/год, $M_{TB} = 6,24$ т/год; $M_{CO} = 33,96$ т/год; $M_{CO_2} = 49175,12$ т/год.

Эквивалентная масса годового выброса примесей с учетом их агрессивности, определенная для одной миниэлектростанции мощностью 3,7 МВт будет равна. Тогда значение ущерба, причиняемого годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух, пропорционально составляющей A_i (формула 7):

– при сжигании твердого топлива на мини-электростанциях:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i &= M_{SO_2} \cdot A_{SO_2} + M_{NO_x} \cdot A_{NO_x} + M_{TB} \cdot A_{TB} + (M_{CO} + M_{CO_2}) \cdot A_{CO} = \\ &= 9,5 \cdot 22 + 2,07 \cdot 41,4 + 6,24 \cdot 60 + (137,96 + 49175,12) \cdot 1 = \\ &= 49981,1 \text{ т/год или } 49981/3,7 = 13508,4 \text{ т/(МВт}\cdot\text{год)}; \end{aligned}$$

– при сжигании топлива (газ, мазут) на электростанции мощностью 540 МВт энергосистемы:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i &= 1797,945 \cdot 22 + 1471,698 \cdot 41,4 + 5,639 \cdot 60 + 188,766 + \\ &+ 1131953 = 232953,3 \text{ т/год или } 232953,3/540 = \\ &= 2283,26 \text{ т/(МВт}\cdot\text{год)}. \end{aligned}$$

Таким образом, учесть влияние миниэлектростанций на окружающую среду можно путем определения ущерба, причиняемого годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух.

Значения максимального коэффициента полезного действия миниэнергоустановки будет учтено в комплексной методике оценки эффективности сооружения миниэлектростанций наряду с минимумом приведенных затрат, максимумом надежности работы и минимумом выбросов загрязнений в окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены количественные показатели вредных выбросов в атмосферу за год, приходящиеся на один мегаватт мощности миниэлектростанции. Так, выбросы оксида углерода и углекислого газа миниэлектростанциями, сжигающими фрезерный торф и древесную щепу, соответственно на порядок и в шесть раз превышают указанные выбросы от электростанций энергосистемы, работающими на природном газе и мазуте. Выбросы золы от работы одного мегаватта мощности миниэлектростанций в 1,6 раза превышают соответствующие выбросы от мощных электростанций энергосистемы.

Масса выбрасываемых в атмосферный воздух углекислого газа и оксида углерода при сжигании твердого топлива на миниэлектростанциях во много раз превосходит массу сжигаемого топлива. Масса, отнесенная на один мегаватт установленной мощности выбрасываемого в атмосферный воздух оксида углерода при сжигании на миниэлектростанциях мощностью 3,7 МВт твердого топлива на два порядка превышает такое же значение характерное для электростанции мощностью 540 МВт энергосистемы.

Суммарная удельная, приходящаяся на 1 МВт установленной мощности, масса загрязняющих веществ от миниэлектростанций примерно в 5,9 раз большая, а без учета выбросов оксида углерода и углекислого газа в 1,26 раза меньшая, чем от крупных электростанций энергосистемы.

Наиболее полно негативное влияние работы миниэлектростанций на окружающую среду может быть оценено значением причиняемого денежного ущерба, учитывающего не только массу выбрасываемых вместе с дымовыми газами вредных веществ, но и их относительную агрессивность, характер рассеяния примесей в атмосферу и типа загрязняемой территории (населенная или ненаселенная местность).

ЛИТЕРАТУРА

1. Леоновец, С. В. Пружанская мини-ТЭЦ. Современные европейские технологии в использовании местных видов топлива / С. В. Леоновец // Энергетическая стратегия. – 2010. – № 1 (13). – с. 18–21.
2. Стриха, И. И. Экологические аспекты энергетики. Атмосферный воздух / И. И. Стриха, Н. Б. Карницкий. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 374 с.