

УДК 628.54:628.47

**РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ СЖИГАНИЯ  
ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТОВ ТБО  
И ОТХОДОВ КОКСОХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ**

**CALCULATION OF EMISSIONS OF POLLUTING SUBSTANCES FROM  
BURNING OF FUEL MIXTURE BASED ON COMPONENTS OF MSW  
AND WASTE OF COKE CHEMICAL PLANTS**

**Курченко Елена Николаевна**

Магистрант

E-mail: elenakurchenko96@mail.ru

**Калинин Олег Николаевич**

Кандидат технических наук, доцент

Доцент

ГОУВПО «Донецкий национальный  
технический университет»

*В статье рассмотрена проблема утилизации твёрдых бытовых и промышленных отходов. Представлены результаты расчета выбросов от сжигания брикетированного топлива на основе бумаги, древесины и кубовых остатков.*

**Ключевые слова:** твёрдые бытовые отходы, кубовые остатки, сжигание, расчёт, выброс, загрязняющие вещества.

**Elena Kurchenko**

Master's Degree Student

E-mail: elenakurchenko96@mail.ru

**Oleg Kalinihin**

Candidate of Technical Sciences, Associate

Professor

Associate Professor

Donetsk National Technical University

*The article considers the problem of disposal of solid household and industrial waste. The results of calculation of emissions from the combustion of briquetted fuel based on paper, wood and vat residues are presented.*

**Keywords:** municipal solid waste, bottoms, incineration, calculation, discharge, pollutants.

На сегодняшний день тема обращения с твёрдыми бытовыми отходами (ТБО) и отходами коксохимических заводов (КХЗ) является экономически и экологически актуальной.

Выбор тематики исследований связан с увеличением объемов производимых и утилизируемых ТБО и промышленных отходов, необходимостью поиска и внедрения более совершенных, экологически и экономически обоснованных производств по утилизации отходов.

Утилизация и переработка ТБО активно развивается во всем мире: закончившие жизненный цикл изделия являются более дешевым источником для производства различных веществ и материалов, чем природные источники. Этим и обусловлена экономическая эффективность получения вторичных топлив.

Целью данной работы является произвести расчёт выбросов от сжигания брикетированного топлива на основе бумаги, древесины и кубовых остатков, с учетом полученного ранее соотношения данных компонентов.

Для достижения поставленной цели были поставлены такие задачи:

- проанализировать полученные результаты оптимального соотношения компонентов топливной смеси;
- произвести расчёт выбросов от сжигания брикетированного топлива;
- сравнить полученные данные выбросов загрязняющих веществ от сжигания брикетированной смеси с данными выброса веществ от сжигания каменного угля.

Одним из методов термической утилизации отходов является производство Refuse Derived Fuel (RDF) – твердого вторичного топлива, производимого путем сортировки, измельчения и обезвоживания твёрдых бытовых отходов, характеристики которого определяются согласно действующим стандартам либо техническим условиям производства топлива [3].

Основными потребителями топлива RDF выступают крайне энергоемкие цементные производства и станции по генерации тепловой и электрической энергии. Учитывая морфологический состав ТБО, в производство RDF-топлива может быть вовлечено около 25% от объема вывозимых на захоронение отходов [4]. Преимущества состоят в том, что сокращается количество захороняемых отходов и потребление экспортируемых источников энергии.

При производстве RDF-топлива отдельные виды отходов КХЗ можно рассматривать в качестве потенциальных теплотворных добавок. Совместная утилизация в этом случае будет иметь более ощутимый природоохранный эффект.

Рассмотрим получение RDF-топлива на основе компонентов ТБО (бумага, древесина) и отхода КХЗ (кубовые остатки).

Процесс изготовления исходной смеси проводился в таком порядке: подбор основных компонентов; дробление и измельчение исходных компонентов (до среднего размера 5 мм); дозирование и смешение отдельных компонентов ТБО; доведение пробы до величины средней влажности; нагрев отходов КХЗ на водяной бане; смешение компонентов топливной смеси [2].

В ходе проведения работы важным моментом был выбор процентного соотношения компонентов ТБО и кубовых остатков в смесях.

При проведении оптимизационного эксперимента обработки данных использовалась программа Statistika 12, в которой изучалась топливная смесь, состоящая из бумаги, древесины и кубовых остатков (рис. 1).



Рис. 1. Состав изучаемой топливной смеси

По полученным данным в программе (рис. 2) показатель прочности брикета равен 12 и лежит вблизи доли бумаги – 0,27; древесины – 0,46 и доли кубовых остатков – 0,27.

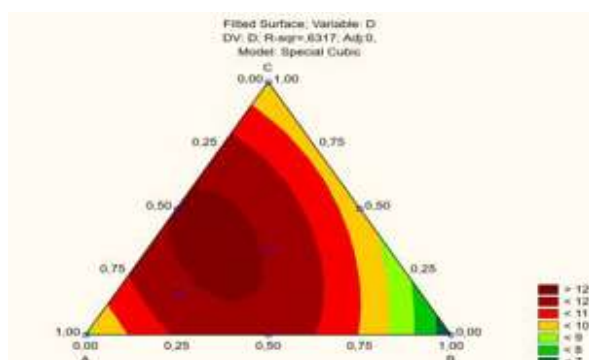


Рис. 2. Контурный график поверхности отклика

Расчёт выбросов от сжигания брикетируемой смеси, состоящей из бумаги, древесины и кубовых остатков, производился на основе методических указаний 34. 02. 305-2002 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от энергетических установок. Методика определения» [1], который действует от 01.07.2002 г. С помощью данной методики, возможно, прогнозировать объёмы выбросов загрязняющих веществ от энергетических установок, работающих на твердом, жидком и газообразном топливе.

Расчетные методы определения выброса загрязняющего вещества базируются на использовании показателя эмиссии. Показатель эмиссии характеризует массовое количество загрязняющего вещества, которое выбрасывается энергетической установкой в атмосферный воздух вместе с дымовыми газами, отнесенную к единице энергии, выделяющейся во время сгорания топлива.

В данной работе для расчетов используется специфический показатель эмиссии, который является удельной величиной выброса, определяемой для конкретной энергетической установки с учетом индивидуальных характеристик топлива, конкретных характеристик процесса сжигания и мер по снижению выброса загрязняющего вещества.

Во время работы печи, в атмосферный воздух выделяются следующие загрязняющие вещества: вещества в виде взвешенных твердых частиц, оксид азота (в пересчете на диоксид азота  $\text{NO}+\text{NO}_2$ ), оксид углерода, серы диоксид, диоксид углерода, азота (1) оксид ( $\text{N}_2\text{O}$ ), метан.

Фонд работы – 270 дней в год, 24 ч/день; 6480 ч/год.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения теплотехнических компонентов топлива

Компонент отходов	Общее содержание влаги, $W^r$ , % масс.	Зольность пробы на сухую массу, $A^r$ , % масс.	Выход летучих веществ на сухое беззольное топливо, $V^{\text{daf}}$ , % масс.	Содержание общей серы, $S^a$ , % масс.	Низшая теплота сгорания образца, $Q^{\text{daf}}_i$ , МДж/кг
Бумага	25,00	15,00	79,00	0,14	16,80
Древесные остатки	20,00	0,80	67,90	0,10	20,20
Кубовые остатки	8,10	6,10	81,00	3,00	38,94

Валовые выбросы загрязняющих веществ  $E_j$ , поступающих в атмосферный воздух с дымовыми газами энергетической установки, определяются по формуле:

$$E_{ji} = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q^r_i)_i, \quad (1)$$

где  $E_{ji}$  – валовой выброс  $j$ -го загрязняющего вещества при сжигании  $i$ -го топлива за промежуток времени  $P$ , т;

$k_{ji}$  – показатель эмиссии  $j$ -го загрязняющего вещества для  $i$ -го топлива, г/ГДж;

$B_i$  – расход  $i$ -го топлива за промежуток времени  $P$ , т;

$(Q^r_i)_i$  – низшая рабочая теплота сгорания  $i$ -го топлива, МДж/кг.

Низшая теплота сгорания с горючей массы на рабочую  $Q^r_i$  пересчитывается по формуле:

$$Q_i^r = Q_i^{daf} \cdot \left( \frac{100 - W^r - A^r}{100} \right) - 0,025 \cdot W^r, \quad (2)$$

где  $Q_i^{daf}$  – низшая горючая теплота сгорания топлива, МДж / кг;  
 $W^r$  – массовое содержание влаги в топливе, %.

Произведем пересчет по формуле (2) для каждого компонента смеси:

$$\begin{aligned} Q_o^r &= 16,80 \cdot \left( \frac{100 - 25 - 15}{100} \right) - 0,025 \cdot 25 = 9,46 \text{ МДж/кг}, \\ Q_d^r &= 20,20 \cdot \left( \frac{100 - 20 - 15}{100} \right) - 0,025 \cdot 20 = 15,49 \text{ МДж/кг}, \\ Q_{к.о.}^r &= 38,94 \cdot \left( \frac{100 - 8,1 - 6,1}{100} \right) - 0,025 \cdot 8,1 = 33,21 \text{ МДж/кг}. \end{aligned}$$

Тогда рабочая теплота смеси (согласно полученных ранее данных доля бумаги – 0,27; древесины – 0,46 и кубовых остатков – 0,27) составит:

$$Q_{смеси}^r = 9,46 \cdot 0,27 + 15,49 \cdot 0,46 + 33,21 \cdot 0,27 = 18,65 \text{ МДж/кг}.$$

Показатели эмиссии загрязняющих веществ определяются для каждого вещества индивидуально.

1) Расчет выбросов веществ в виде взвешенных твёрдых частиц

Показатель эмиссии вещества в виде взвешенных твёрдых частиц рассчитывается по формуле:

$$k_{мс} = \frac{10^6}{Q_i^r} a_{вин} \frac{A^r}{100 - \Gamma_{вин}} (1 - \eta_{зг}) + k_{мсS}, \quad (3)$$

где  $k_{мс}$  – показатель эмиссии взвешенных твёрдых частиц, г/ГДж;

$Q_i^r$  – низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг;

$A^r$  – массовое содержание золы в топливе на рабочую массу, %;

$a_{вин}$  – доля золы, выходящей из котла в виде летучей золы, %;

$\Gamma_{вин}$  – массовое содержание горючих веществ в виде взвешенных твёрдых частиц, %;

$\eta_{зг}$  – эффективность очистки дымовых газов от взвешенных твёрдых частиц;

$k_{мсS}$  – показатель эмиссии твёрдых продуктов взаимодействия сорбента и оксидов серы и взвешенных твёрдых частиц сорбента, г/ГДж.

Показатель эмиссии твёрдых продуктов взаимодействия сорбента и оксидов серы и взвешенных твердых частиц сорбента составляет  $k_{мсS} = 0$  г/ГДж.

Тогда:  $a_{вин} / (100 - \Gamma_{вин}) = 0,003$ .

Рассчитаем показатель эмиссии взвешенных твёрдых частиц для топливной смеси по формуле (3):

$$k_{мс} = \frac{10^6}{18,65} 0,003 \cdot 6,07 \cdot (1 - 0,5) + 0 = 48,82 \text{ г/ГДж}$$

Тогда, секундный расход топлива составит:

$$B_i^c = \frac{180 \cdot 10^6}{24 \cdot 270 \cdot 3600} = 7,72 \text{ з/с.}$$

Годовой выброс вещества в виде взвешенных твёрдых частиц при сжигании равен:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (48,82 \cdot 180 \cdot 18,65) = 0,164 \text{ т/з.}$$

Секундный выброс вещества в виде взвешенных твёрдых частиц при сжигании:

$$E^c = 10^{-6} \cdot (48,82 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 0,007 \text{ з/с.}$$

## 2) Расчет выбросов диоксида серы SO<sub>2</sub>

Показатель эмиссии k<sub>SO<sub>2</sub></sub>, г/ГДж, оксидов серы SO<sub>x</sub>, которые поступают в атмосферу с дымовыми газами, в пересчете на диоксид серы определяется по формуле:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}) , \quad (4)$$

где  $Q_i^r$  – нижняя рабочая теплота сгорания, МДж/кг;

$S^r$  – массовое содержание серы в топливе на рабочую массу за промежуток времени Р, %;

$\eta_I$  – эффективность связывания серы золой или сорбентом в установке сжигания;

$\eta_{II}$  – эффективность очистки дымовых газов от оксидов серы;

$\beta$  – коэффициент работы серо-очистной установки.

Показатель эмиссии диоксида серы SO<sub>2</sub> для топливной смеси, рассчитывается по формуле (4):

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{18,65} \cdot \frac{2 \cdot 0,8}{100} (1 - 0,1)(1 - 0) = 772,12 \text{ з/ГДж,}$$

Годовой выброс диоксида серы при сжигании, составит:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (772,12 \cdot 180 \cdot 18,65) = 2,59 \text{ т/з.}$$

Секундный выброс диоксида серы при сжигании:

$$E^c = 10^{-6} \cdot (772,12 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 0,11 \text{ з/с.}$$

## 3) Расчет выбросов диоксида азота.

Показатель эмиссии оксида азота без учета мер сокращения выброса, для топливной смеси составляет 140 г/ГДж. Рассчитаем годовой выброс оксида азота:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (140 \cdot 180 \cdot 18,65) = 0,46 \text{ т/з.}$$

Секундный выброс оксида азота при сжигании, составит:

$$E^c = 10^{-6} \cdot (140 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 0,02 \text{ з/с.}$$

## 4) Расчет выбросов оксида углерода (CO).

Образование оксида углерода (CO) является результатом неполного сгорания углерода органического топлива. С уменьшением мощности установки сжигания концентрация CO в дымовых газах растет. Основным методом определения выбросов оксида углерода является измерение его концентрации.

Показатель эмиссии оксида углерода,  $k_{CO}$ , г/ГДж, при сжигании органического топлива определяется по формуле:

$$k_{CO} = (k_{CO})_0 \cdot (1 - \frac{q_4}{100}), \quad (5)$$

где  $(k_{CO})_0$  – обобщенный показатель эмиссии CO, 420 г / ГДж  
 $q_4$  – потери тепла топлива через механический недожог,  $q_4 = 3 \%$ .

Расчет показателя эмиссии оксида углерода производим по формуле (5):

$$k_{CO} = 420 \cdot (1 - \frac{3}{100}) = 407,40 \text{ г/ГДж}.$$

Годовой и секундный выброс оксида углерода при сжигании, составит:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (407,40 \cdot 180 \cdot 18,65) = 1,37 \text{ т/г},$$

$$E^c = 10^{-6} \cdot (407,40 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 0,059 \text{ г/с}.$$

## 5) Расчет выбросов диоксида углерода (углекислого газа)

Диоксид углерода (углекислый газ CO<sub>2</sub>) относится к парниковым газам и является основным газообразным продуктом окисления углерода органического топлива. Объем выброса CO<sub>2</sub> напрямую связано с содержанием углерода в топливе и степенью окисления углерода топлива в установке сжигания.

Показатель эмиссии углекислого газа при сжигании топливной смеси определяется через показатель эмиссии углерода топлива по формуле:

$$K_{CO_2} = 3,67 \cdot \varepsilon \cdot k_C, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – степень окисления углерода топлива, = 0,99 МДж/кг;  
 $k_C$  – показатель эмиссии углерода, составляет 21100 г/ГДж.

Рассчитываем показатель эмиссии углекислого газа согласно формуле (6):

$$K_{CO_2} = 3,67 \cdot 0,99 \cdot 21100 = 76662,63 \text{ г/ГДж}.$$

Тогда, годовой и секундный выброс диоксида углерода при сжигании топливной смеси, равен:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (76662,63 \cdot 180 \cdot 18,65) = 257,36 \text{ т/г},$$

$$E^c = 10^{-6} \cdot (76662,63 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 11,04 \text{ г/с}.$$

6) Расчет выбросов оксида азота N<sub>2</sub>O

Для топливной смеси  $k_{N_2O} = 0,9$  г/ГДж.

Годовой и секундный выброс оксида азота при сжигании:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (0,9 \cdot 180 \cdot 18,65) = 0,003 \text{ м/г},$$

$$E^c = 10^{-6} \cdot (0,9 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 0,0001 \text{ г/с}.$$

#### 7) Расчет выбросов метана $\text{CH}_4$

$k_{\text{CH}_4}$  – показатель эмиссии метана составляет 3 г/ГДж – для топливной смеси. Пересчитываем годовой и секундный выброс метана при сжигании каменного угля:

$$E^p = 10^{-6} \cdot (3 \cdot 180 \cdot 18,65) = 0,01 \text{ м/г},$$

$$E^c = 10^{-6} \cdot (3 \cdot 7,72 \cdot 18,65) = 0,0004 \text{ г/с}.$$

Полученные данные в результате расчета выбросов от сжигания брикетированного топлива представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета выбросов загрязняющих веществ от сжигания топливной смеси

Загрязняющее вещество	Годовой выброс, т/год	Секундный выброс, г/с
Вещества в виде взвешенных твёрдых частиц	0,164	0,007
Диоксид серы	2,59	0,11
Оксид азота (в пересчете на диоксид азота $\text{NO}+\text{NO}_2$ )	0,46	0,02
Оксид углерода	1,37	0,059
Диоксид углерода	257,36	11,04
Оксид азота (I) ( $\text{N}_2\text{O}$ )	0,003	0,0001
Метан	0,01	0,0004

Рассмотрим сравнительную таблицу выбросов загрязняющих веществ от сжигания топливной смеси и сжигания каменного угля (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная таблица выбросов загрязняющих веществ от топливной смеси и каменного угля

Загрязняющее вещество	Топливная смесь		Каменный уголь	
	Годовой выброс, т/год	Секундный выброс, г/с	Годовой выброс, т/год	Секундный выброс, г/с
Вещества в виде взвешенных твёрдых частиц	0,164	0,007	2,7	0,12
Диоксид серы	2,59	0,11	7,776	0,33
Оксид азота (в пересчете на диоксид азота $\text{NO}+\text{NO}_2$ )	0,46	0,02	1,06	0,045
Оксид углерода	1,37	0,059	3,5	0,084
Диоксид углерода	257,36	11,04	471,5	20,2
Оксид (I) азота ( $\text{N}_2\text{O}$ )	0,003	0,0001	0,006	0,0003
Метан	0,01	0,0004	0,005	0,0002



Полученные величины выбросов загрязняющих веществ являются хорошим результатом в сравнении с численными показателями выброса от сжигания каменного угля.

Топливная смесь на основе компонентов ТБО и отхода КХЗ не уступает, а в большинстве случаях лучше, чем традиционное топливо.

Преимуществом топливных брикетов из отходов является сокращение количества захороняемых отходов и потребление экспортируемых источников энергии.

Таким образом, производство RDF-топлива из отходов позволит снизить негативное влияние на окружающую природную среду, получить экономическую выгоду и в целом вывести на новый уровень деятельность по обращению с отходами.

Следующее перспективное направление исследований – это работа с программой ChemCAD, в которой планируется построение оптимизационной модели технологической схемы производства брикетированного топлива.

Библиографический список

### Библиографический список

1. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення : ГКД 34.02.305-2002 [Электронный ресурс] // eco.com.ua : сайт. – Электрон. дан. – Москва, 2002. – Режим доступа: <http://eco.com.ua/content/vikidi-zabrudnyuvalnih-rechovin-u-atmosferu-vid-energetichnih-ustanovok-metodika>. – Дата обращения: 28.03.2020. – Загл. с экрана.
2. Калинин, О. Н. Определение эффективного связующего топливной композиции на основе компонентов твердых бытовых отходов и отходов коксохимических заводов / О. Н. Калинин, Д. Э. Синенко // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 2. – С. 33-46.
3. Коротаев, В. Н. Управление техногенными отходами : учеб. пособие / В. Н. Коротаев, Н. Н. Слюсарь, Я. А. Жилинская, Г. В. Ильиных, Т. Г. Филькин. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – 390 с.
4. Ламзина, И. В. Зарубежная практика использования альтернативного топлива из отходов для цементной промышленности / И. В. Ламзина, В. Ф. Желтобрюхов, И. Г. Шайхiev // Вестник технолог. ун-та. – 2015. – № 17. – С. 85-88.