

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. АЛЕКСЕЕВА»

Кафедра "Производственная безопасность, экология и химия"

## **ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ТЭС С ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

*Учебно-методическое пособие по выполнению практических работ по  
дисциплине «Экологическая безопасность» для бакалавров и магистров  
очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки  
13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»*



г. Н. Новгород, 2024

Составители: О.В.Маслеева, Т.И. Курагина, Крюков Е.В.

УДК 621.311.25:621.039(075.8)

Загрязнение атмосферного воздуха ТЭС с газотурбинными установками: Учебно-методическое пособие по выполнению практических работ по дисциплине “Экологическая безопасность” для бакалавров и магистров очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника», 140400 «Электроэнергетика и электротехника»/ НГТУ им. Р.Е.Алексеева; сост.: О.В. Маслеева и др. Н.Новгород, 2024. 26 с.

Даны краткие сведения из теории по образованию газов при сжигании топлива, нормированию токсичных веществ. Дана методика расчёта максимальных приземных концентраций вредных веществ и варианты заданий для практических работ.

Редактор Э.Б. Абросимова

Подп. к печ. 19.09.2023. Формат 60x841/16. Бумага газетная.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 30 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева.  
Типография НГТУ. 603950. Н. Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р. Е. Алексеева, 2024

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Целью работы является:

- изучить назначение и конструкция газотурбинных установок,
- изучить образование вредных веществ при работе газотурбинных установок,
- принципы нормирования вредных веществ,
- парниковые газы и парниковый эффект,
- выполнить экологический расчет.

## 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

### 2.1. Назначение и конструкция газотурбинных установок

Газотурбинная установка (рис.1) - это агрегат, состоящий из регенератора; воздушного компрессора; камеры сгорания; газовой турбины; пускового двигателя; топливного насоса и газового компрессора. Поток газа, образованный в результате сгорания топлива, воздействуя на лопатки турбины, создает крутящий момент и вращает ротор, который в свою очередь соединен с генератором. Генератор вырабатывает электроэнергию.



Рис.1. ТЭС с газотурбинными установками

### Отличительные особенности газотурбинных установок:

- Незначительный вред, причиняемый окружающей среде.
- Небольшие габариты и вес. Это позволяет располагать данное оборудование на небольших площадках, что экономит деньги.

- Незначительный уровень шума, а также вибрации. Данный показатель находится в пределах 80 – 85 дБА.
- Способность газотурбинного оборудования работать на различном топливе позволяет применять его практически в любом производстве. При этом предприятие сможет само выбирать экономически выгодный вид топлива, опираясь на специфику своей деятельности.
- Продолжительная работа с минимальной нагрузкой.
- На протяжении одной минуты данное оборудование способно выдерживать превышение номинальной величины тока в 1,5 раза. А в течение 2 часов – в 1,1 раза.
- Отсутствие водяного охлаждения.
- Высокая надежность работы.
- Продолжительный ресурс работы (около 200 000 часов).
- Использование оборудования в любых климатических условиях.

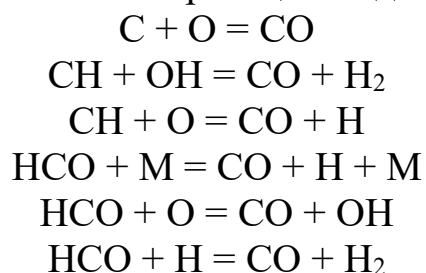
## 2.2. Образование вредных веществ при работе газотурбинных установок

При сгорании природного газа, используемого в виде топлива, в ГТУ образуются оксиды углерода (CO), оксиды азота (NO<sub>x</sub>), углеводороды и твердые частицы.

**Оксид углерода (CO)** образуется вследствие:

- неполного сгорания топлива в сильно обедненных топливо-воздушных смесях;
- наличия холодного пристеночного слоя в традиционной схеме заградительного охлаждения стенок жаровой трубы;
- нехватки кислорода при горении богатых смесей (коэффициент избытка воздуха  $\alpha < 1,0$ );
- диссоциации CO<sub>2</sub> при высоких температурах.

При моделировании выбросов CO в детальные кинетические механизмы обязательными к включению являются реакции вида:



Приведенные реакции показывают, что образование CO происходит за счет взаимодействия радикалов, которые содержатся в большом количестве во фронте пламени, а следовательно избежать их образования невозможно.

Оксид углерода CO – бесцветный газ без запаха и вкуса, плохо растворим в воде, горюч (образует с воздухом взрывчатые смеси), попадая в

легкие человека, а оттуда в кровь, вытесняет из крови кислород, поскольку обладает в 200 раз большей растворимостью; в результате снижения содержания кислорода возникает удушье. При небольших концентрациях СО в воздухе проявляются головокружение и тошнота.

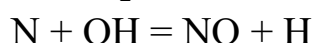
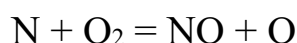
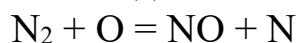
**Оксиды азота (NO<sub>x</sub>)** образуются в результате окисления азота, находящегося в атмосферном воздухе и в топливе. Легкие дистиллятные топлива содержат небольшие количества органического азота (менее 0,06 %), в то время как тяжелые продукты перегонки могут содержать до 1,8 %. В последнем случае доля NO из топлива может составлять значительную часть в общем выбросе оксида азота.

Процесс образования оксида азота эндотермичен и идет с заметной скоростью при температурах выше 1800 К, поэтому NO образуется только в горячих зонах и достигает максимальной концентрации на режиме наибольшей тяги. Окисление NO до NO<sub>2</sub> происходит при снижении температуры газа. Практический диапазон температуры газа, при которой образуется двуокись азота, составляет от 400 до 900 К. На режимах большой тяги доля NO<sub>2</sub> в оксидах азота NO<sub>x</sub> очень мала, но на режиме малого газа она может достигать 50 %.

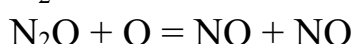
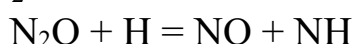
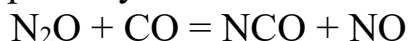
Установлено, что выброс NO<sub>x</sub> экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени и линейно возрастает с повышением времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах. Изменение давления от 0,5 до 3 МПа практически не влияет на уровень выброса NO<sub>x</sub>.

Известны следующие основные механизмы образования оксидов азота:

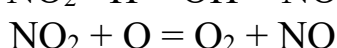
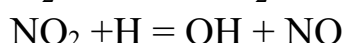
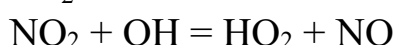
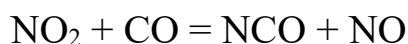
1. Термический механизм, который включает окисление N<sub>2</sub> кислородом по цепи механизма Зельдовича и взаимодействия атомов N с радикалами OH



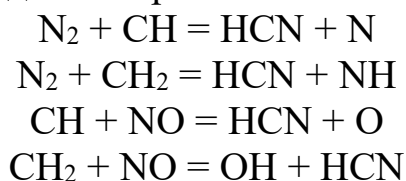
2. N<sub>2</sub>O – механизм. Этот механизм определяется группой реакций, в которых N<sub>2</sub>O выступает как промежуточное вещество при образовании NO



3. NO<sub>2</sub> – механизм, приводящий к образованию NO через следующие реакции



4. Механизм Фенимора (NO механизм). «Быстрые» оксиды азота образуются при горении топлива во фронте пламени в результате взаимодействия  $N_2$  с радикалами CH и  $CH_2$ , появляющимися при разрушении сложных молекул углеводородного горючего.



NO – бесцветный газ, плохо растворим в воде;  $NO_2$  – бурый газ с удушливым запахом, реагирует с водой с образованием азотистой  $HNO_2$  и азотной  $HNO_3$  кислот, которые разрушают легочную ткань, вызывая хронические заболевания, необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе. В соединении с углеводородами оксиды азота образуют токсичные нитроолефины, вызывающие заболевания слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, нервные расстройства.

### 2.3. Нормирование предельно допустимых концентраций (ПДК)

Для оценки влияния вредных веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, на организм человека в СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» установлены предельно-допустимое содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений.

ПДК—максимальное количество вредного вещества в единице объема или массы воздуха, которое при ежедневном воздействии в течение неограниченного времени не вызывает каких-либо болезненных изменений в организме человека и неблагоприятных наследственных изменений у потомства. ПДК для вредных веществ представлены в табл.1.

ПДК является основным критерием санитарно - гигиенической оценкой качества атмосферного воздуха. Для вредных веществ установлены две величины ПДК: максимально-разовая (ПДК<sub>мр</sub>), определяемая в пробах в течение 20 мин, и среднесуточная (ПДК<sub>сс</sub>).

По степени опасности (токсичности) различают четыре класса веществ:

- 1 - чрезвычайно опасные,
- 2 - опасные,
- 3 - умеренно опасные,
- 4 - относительно безопасные.

## Значение ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе

Загрязняющее вещество	ПДК <sub>мр</sub> , мг/м <sup>3</sup>	ПДК <sub>сс.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
Сажа	0,15	0,05	3
Оксиды серы	0,50	0,05	3
Диоксид азота	0,2	0,1	2
Оксид азота	0,4	0,06	3
Оксид углерода	5	3	4
Бенз(а)пирен	-	10 <sup>-6</sup>	1

## 2.4. Парниковые газы

Кроме веществ, обладающих вредным воздействием, в выбросах присутствует также безвредные продукты полного сгорания – диоксид углерода CO<sub>2</sub>.

Основными парниковыми газами являются – диоксид углерода, метан и закись азота. Со временем все большее внимание стали уделять “новым” промышленным газам, выбросы которых постоянно растут и время существования которых в атмосфере велико.

Парниковые газы, оказывающие основное влияние на атмосферу, выделяют в группу газов с прямым парниковым эффектом: водяной пар; углекислый газ (CO<sub>2</sub>); озон (O<sub>3</sub>); метан (CH<sub>4</sub>); закись азота (N<sub>2</sub>O), перфторуглероды (ПФУ).

К газам с косвенным парниковым эффектом, т.е. таким, которые не оказывают существенного влияния на климат ввиду небольшого содержания в атмосфере, относят: окись углерода (CO); оксиды азота (NO<sub>x</sub>); неметановые летучие органические соединения (НЛОС); гидрофторуглероды (ГФУ); гексафторид серы (SF<sub>6</sub>); двуокись серы (SO<sub>2</sub>) и др.

Основную роль в формировании парникового эффекта играет углекислый газ. Основными источниками являются тепловые станции и транспорт.

Основными антропогенными источниками метана являются пищеварительная ферментация у скота, рисоводство, горение биомассы, утечки при разработке месторождений каменного угля и природного газа, а также эмиссия метана в составе биогаза, образующегося на полигонах захоронения отходов.

При расчете эмиссии парниковых газов учитывается потенциал глобального потепления для каждого вещества. Потенциал глобального потепления (ПГП) оценивает радиационное (разогревающее) воздействие молекулы парникового газа относительно двуокиси углерода, осредненное за выбранный период времени после эмиссии. Потенциалы глобального потепления для парниковых газов приведены в табл.2.

Таблица 2

### Основные характеристики парниковых газов

Газ	Определение источников	ПГП
Двуокись углерода (CO <sub>2</sub> )	Сжигание природного топлива	1
Метан (CH <sub>4</sub> )	Выращивание риса, крупный рогатый скот, сжигание биомассы и ее разложение, производство природного топлива	21
Закись азота (N <sub>2</sub> O)	Производство удобрений, сжигание природного топлива	310

## 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

### 3.1. Расчет удельных выбросов вредных веществ ГТУ

Расчет удельных выбросов вредных веществ ГТУ выполняется в соответствии с СТО Газпром 2-3.5-039-2005 «Каталог удельных выбросов вредных веществ газотурбинных газоперекачивающих агрегатов».

Массовый расход продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ ( $G_2$ ) рассчитывается по формуле

$$G_2 = G_3 + G_{\text{ТГ}}, \quad (1)$$

где  $G_3$  - массовый расход циклового воздуха, кг/с,

$G_{\text{ТГ}}$  - массовый расход топливного газа, кг/с

Объемный расход влажных продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ  $Q_2$  (м<sup>3</sup>/с) (при 0 °С и 0,1013 МПа)

$$Q_2 = \frac{G_2}{\rho_{20}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{20}$  - плотность продуктов сгорания газа при 0 °С и 0,1013 МПа, кг/м<sup>3</sup>.  
Определяется в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{\text{в}}$  по табл.3.

Таблица 3

Плотность продуктов сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{\text{в}}$

$\alpha_{\text{в}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho_{20}$	1,237	1,263	1,272	1,276	1,280	1,282	1,284	1,285	1,286	1,288

Объемный расход влажных продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ  $Q_{2\phi}$  (м<sup>3</sup>/с) при их фактической температуре  $T_2$  (К)

$$Q_{2\phi} = Q_2 \cdot \frac{T_2}{273}. \quad (3)$$

Объемный расход влажных продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы ГТУ  $Q_{6\phi}$  (м<sup>3</sup>/с) при их фактической температуре  $T_6$  (К)

$$Q_{6\phi} = \frac{G_6}{\rho_{20}} \cdot \frac{T_6}{273}, \quad (4)$$

где  $G_6$  - массовый расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы, кг/с.

Объемный расход топливного газа  $q_{\text{ТГ}}$  (м<sup>3</sup>/ч) при 20°C и 0,1013 МПа

$$q_{\text{ТГ}} = \frac{3,6 \cdot N_c}{Q_p^H \cdot \eta_c} \cdot 10^6, \quad (5)$$

где  $Q_p^H$  - низшая теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>,

для природного газа  $Q_p^H = 33431$  кДж/м<sup>3</sup>.

$N_c$  - мощность газотурбинного привода, МВт;

$\eta_c$  - эффективный КПД газотурбинного привода.

Массовый расход топливного газа  $G_{\text{ТГ}}$  (кг/с)

$$G_{\text{ТГ}} = \frac{q_{\text{ТГ}}}{3600} \cdot \rho_{\text{ТГ}}^0, \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{ТГ}}^0$  - плотность топливного газа при 20°C и 0,1013 МПа,  $\rho_{\text{ТГ}}^0 = 0,668$  кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha_B$  показывает отношение поступившего в установку воздуха к его количеству, необходимому для полного сгорания топлива в соответствии со стехиометрическими уравнениями

$$\alpha_B = \frac{G_2 - G_{\text{ТГ}}}{G_{\text{ТГ}} \cdot L_0}, \quad (7)$$

где  $L_0$  - количество воздуха, необходимое для стехиометрического сгорания топлива, кг/кг ( $L_0 = 17,16$  кг/кг).

Коэффициент соотношения объемных расходов сухих и влажных продуктов сгорания определяется по соотношению

$$K_B = \frac{89.5}{110,5 - O_2} \quad (8)$$

Содержание (объемная доля, %) кислорода в сухих продуктах сгорания определяется по формуле

$$O_2 = \frac{2 \cdot (\alpha_B - 1)}{9,524 \cdot \alpha_B - 1} \cdot 100 \quad (9)$$

Приведенная концентрация  $C_i^{15}$  (мг/м<sup>3</sup>) приведена к 15% содержания кислорода (по объему) масса компонента  $i$ , содержащаяся в 1 м<sup>3</sup> сухих продуктов сгорания при 0°C и 0,1013 МПа, и вычисляется по формуле

$$C_i^{15} = C_i \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - O_2} \quad (10)$$

где  $O_2$  - содержание кислорода в сухих продуктах сгорания, %.

Концентрации  $NO_2$  и  $NO$  зависят от концентрации  $NO_x$  как

$$\begin{aligned} C_{NO_2} &= 0,8 \cdot C_{NO_x} \\ C_{NO} &= 0,13 \cdot C_{NO_x} \end{aligned}$$

Мощность выброса  $M_i$  (г/с) - массовое количество выброса компонента  $i$  с отработавшими газами в единицу времени, вычисляемая по формуле

$$M_i = C_i^{15} \cdot K_B \cdot Q_2 \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

где  $K_B$  - коэффициент соотношения объемных расходов сухого и влажного отработавших газов;

$Q_2$  - объемный расход влажных отработавших газов ГТУ при 0 °С и 0,1013 МПа, м<sup>3</sup>/с.

### **3.2. Методика расчета максимальных приземных концентраций вредных веществ**

Степень опасности загрязнения атмосферного воздуха характеризуется наибольшим рассчитанным значением концентрации, соответствующим

неблагоприятным метеорологическим условиям, в том числе опасной скорости ветра.

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $C_m$  (мг/м<sup>3</sup>) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  (м) от источника и определяется по формуле

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \dot{q}}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta t}}, \quad (12)$$

где  $A$  - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, принимается равным:

- 250 - для районов Бурятии и Читинской области;
- 200 - для Европейской территории: для районов южнее 50° с. ш., для Дальнего Востока и территории Сибири;
- 180 - для Европейской территории и Урала от 50 до 52° с. ш. ;
- 160 - для Европейской территории и Урала севернее 52° с. ш.,
- 140 - для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

$M$  - масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$F$  - безразмерный коэффициент. Значение  $F$  принимается:

- для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей  $F = 1$  ;
- для мелкодисперсных аэрозолей при коэффициенте очистки выбросов не менее 90 %  $F = 2$ ; от 75 до 90 %  $F = 2,5$ ; менее 75 % и при отсутствии очистки  $F = 3$ .

$H$  - высота источника выброса над уровнем земли, м;

$$\Delta t = t_r - t_b$$

$t_r$  - температура выбрасываемой газовой смеси.  $t_r = t_6$ , °С

$t_b$  - температура окружающего атмосферного воздуха, °С. Следует принимать равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года по табл. 8.

$V_1$  - расход газовой смеси из дымовой трубы, м<sup>3</sup>/с,  $V_1 = Q_{6ф}$ ,

$w_0$  - средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с,

$m$  и  $n$  - коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса,

$\eta$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ .

Средняя скорость выхода газозадушной смеси из устья источника выброса определяется по формуле

$$w_0 = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot D^2} \quad (13)$$

где  $D$  - диаметр устья источника выброса, м;

Значение коэффициента  $m$  определяются в зависимости от параметра  $f$ .

$$f = 1000 \cdot \frac{w_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta t} \quad (14)$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \sqrt[3]{f}} \quad (16)$$

Значение коэффициента  $n$  определяется в зависимости от параметра  $v_m$ .

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta t}{H}} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} n &= 1, & v_m &> 2 \\ n &= 0,532 \cdot v_m^2 - 2,13 \cdot v_m + 3,13, & 0,5 < v_m \leq 2 \\ n &= 4,4 \cdot v_m, & v_m &\leq 0,5 \end{aligned} \quad (17)$$

**Расстояние**  $x_m$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) достигает максимального значения  $C_m$ , определяется по формуле

$$x_m = \frac{5 - F}{4} \cdot d \cdot H, \quad (18)$$

где  $d$  - безразмерный коэффициент, находится по формулам

$$\begin{aligned}
d &= 2,48 \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}), & v_m &\leq 0,5 \\
d &= 4,95 \cdot v_m \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}), & 0,5 < v_m &\leq 2 \\
d &= 7 \cdot \sqrt{v_m} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}). & v_m &> 2
\end{aligned}
\tag{19}$$

Приземная концентрация вредных веществ  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях  $x$  от источника выброса определяется по формуле

$$C = S_1 \cdot C_M. \tag{21}$$

Безразмерный коэффициент  $S_1$  определяется в зависимости от отношения  $x/x_m$ , по формулам

$$\begin{aligned}
S_1 &= 3 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^3 + 6 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^2, & x &\leq x_m \\
S_1 &= \frac{1,13}{0,13 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 + 1}, & x_m < x &\leq 8 x_m \\
S_1 &= \frac{\left(\frac{x}{x_m}\right)}{3,58 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 - 35,2 \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right) + 120}. & x &> 8 x_m
\end{aligned}
\tag{22}$$

### 3.3 Расчет эмиссии парниковых газов

Расчет эмиссии парниковых газов был выполнен в соответствии с методикой Минприроды России от 30.06.2015 N 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации».

В энергетике при расчете учитывались следующие парниковые газы: углекислый газ, закись азота и метан. Исходными данными для расчета являются величины расхода топлива, а именно: расход угля, расход топливного мазута, природного газа или других видов топлива.

Выбросы двуокиси углерода при стационарном сжигании топлива являются результатом высвобождения углерода из топлива в ходе его сгорания и зависят от содержания углерода в топливе. Расчет эмиссии CO<sub>2</sub>

для каждого вида топлива производится по формуле

$$E = M \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot 44/12, \quad (23)$$

где:  $E$  - годовой выброс  $\text{CO}_2$  (т/год);

$M$  - фактическое потребление топлива за год (т/год);

$K_1$  - теплотворное значение топлива:

• для природного газа  $K_1 = 0,03371 \cdot 10^{12}$  Дж/т;

$K_2$  - коэффициент эмиссии углерода:

• для природного газа  $K_2 = 14,96 \cdot 10^{-12}$  т/Дж;

$K_3$  - коэффициент окисления углерода в топливе (для учета неполного сгорания топлива):

• для природного газа  $K_3 = 0,995$ ;

44/12 - коэффициент пересчета углерода в углекислый газ.

Расчет эмиссии метана и закиси азота для каждого вида топлива производится по формуле

$$E_i = M \cdot K_1 \cdot K_4, \quad (24)$$

где:  $E_i$  - годовой выброс парникового газа (кг/год);

$M$  - фактическое потребление топлива за год (т/год);

$K_1$  - теплотворное значение топлива (Дж/т);

$K_4$  - коэффициенты эмиссии парниковых газов:

• для  $\text{CH}_4$   $K_4 = 5 \cdot 10^{-12}$  кг/Дж;

• для  $\text{N}_2\text{O}$   $K_4 = 0,1 \cdot 10^{-12}$  кг/Дж.

Расчет эмиссии парниковых газов в  $\text{CO}_2$ -экв производится с учетом ПГП (табл.2) по формуле

$$E_{\text{CO}_2} = E_i \cdot \text{ПГП}_i. \quad (25)$$

#### 4. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

Выполнить расчет следующих параметров согласно варианта (табл. 7):

- технические характеристики ГТУ,
- валовые выбросы вредных веществ для заданного варианта,
- максимальные значения приземных концентрации вредных веществ,
- расстояние от источника выбросов, на котором приземная концентрация достигает максимального значения,

- изменение приземной концентрации вредных веществ по оси факела выброса на расстояниях (100, 200, 300, 400; 500, 600, 700, 800, 900, 1000 м) от источника выброса. Построить графики для каждого вредного вещества. Сравнить полученные значения с ПДКсс,
- суммарной эмиссии парниковых газов в пересчете на CO<sub>2</sub>-экв.

Принять:

- низшая теплота сгорания топлива природного газа  $Q_p^H = 33431$  кДж/м<sup>3</sup>,
- температура продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы ГТУ  
 $t_6 = 110^\circ\text{C}$  или  $T_6 = 383$  К.

## 5. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные для экологического расчета выбросов ГТУ представлены в табл. 4.

Таблица 4

### Исходные данные

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
Город			Пенза
Широта		°	53,2
Тип ГТУ			ГПА-Ц-25
Мощность в стационарных условиях	$N_c$	МВт	25,0
Эффективный КПД в стационарных условиях	$\eta_c$	%	34,5
Температура продуктов сгорания на срезе патрубка	$T_2$	К	698
Расход циклового воздуха	$G_3$	кг/с	99,6
Расход продуктов сгорания (на срезе выхлопной трубы)	$G_6$	кг/с	101,0
Концентрация в сухих продуктах сгорания:			
- оксидов азота	$C_{NOx}$	мг/м <sup>3</sup>	120
- оксида углерода	$C_{CO}$	мг/м <sup>3</sup>	80
Высота выхлопной трубы (шахты)	$H$	м	20
Диаметр (размеры) выхлопной трубы (шахты)	$D$	м	3
Низшая теплота сгорания топлива природного газа	$Q_p^H$	кДж/м <sup>3</sup>	33431
Плотность топливного газа	$\rho_{TG}^0$	кг/м <sup>3</sup>	0,668
Температура продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы	$t_6$	°C	110
	$T_6$	К	383
Количество воздуха, необходимое для стехиометрического сгорания топлива	$L_0$	кг/кг	17,16

## Расчет мощности выбросов вредных веществ

Объемный расход топливного газа

$$N_c = 25 \text{ МВт}$$

$$Q_p^H = 33431 \text{ кДж/м}^3.$$

$$\eta_c = 0,345$$

$$q_{\text{ТГ}} = \frac{3,6 \cdot N_c}{Q_p^H \cdot \eta_c} \cdot 10^6 = \frac{3,6 \cdot 25}{33431 \cdot 0,345} \cdot 10^6 = 7803 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Массовый расход топливного газа

$$q_{\text{ТГ}} = 7803 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$\rho_{\text{ТГ}}^0 = 0,668 \text{ кг/м}^3$$

$$G_{\text{ТГ}} = \frac{q_{\text{ТГ}}}{3600} \cdot \rho_{\text{ТГ}}^0 = \frac{7803}{3600} \cdot 0,668 = 1,448 \text{ кг/с}.$$

Массовый расход продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ

$$G_3 = 99,6 \text{ кг/с}$$

$$G_{\text{ТГ}} = 1,448 \text{ кг/с}.$$

$$G_2 = G_3 + G_{\text{ТГ}} = 99,6 + 1,448 = 101,048 \text{ кг/с}.$$

Коэффициент избытка воздуха

$$G_2 = 101,048 \text{ кг/с}$$

$$G_{\text{ТГ}} = 1,448 \text{ кг/с}.$$

$$L_0 = 17,16 \text{ кг/кг}$$

$$\alpha_B = \frac{G_2 - G_{\text{ТГ}}}{G_{\text{ТГ}} \cdot L_0} = \frac{101,048 - 1,448}{1,448 \cdot 17,16} = 4,01.$$

Для  $\alpha_B = 4,01$  находим  $\rho_{20} = 1,276 \text{ кг/м}^3$  (табл. 3).

Объемный расход влажных продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ

$$G_2 = 101,048 \text{ кг/с}$$

$$\rho_{20} = 1,276 \text{ кг/м}^3$$

$$Q_2 = \frac{G_2}{\rho_{20}} = \frac{101,048}{1,276} = 79,19 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объемный расход влажных продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ при их фактической температуре

$$Q_2 = 79,19 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$T_2 = 698 \text{ К}$$

$$Q_{2\phi} = Q_2 \cdot \frac{T_2}{273} = 79,19 \cdot \frac{698}{273} = 202,47 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объемный расход влажных продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы ГТУ при их фактической температуре

$$G_6 = 101,0 \text{ кг/с}$$

$$T_6 = 383 \text{ К}$$

$$\rho_{20} = 1,276 \text{ кг/м}^3$$

$$Q_{6\phi} = \frac{G_6}{\rho_{20}} \cdot \frac{T_6}{273} = \frac{101,0}{1,276} \cdot \frac{383}{273} = 111,0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Содержание (объемная доля) кислорода в сухих продуктах сгорания  
 $\alpha_B = 4,01$

$$O_2 = \frac{2 \cdot (\alpha_B - 1)}{9,524 \cdot \alpha_B - 1} \cdot 100 = \frac{2 \cdot (4,01 - 1)}{9,524 \cdot 4,01 - 1} \cdot 100 = 16,2 \text{ \%}.$$

Коэффициент соотношения объемных расходов сухих и влажных продуктов сгорания

$$O_2 = 16,2 \text{ \%}$$

$$K_B = \frac{89,5}{110,5 - O_2} = \frac{89,5}{110,5 - 16,2} = 0,95.$$

Приведенная концентрация загрязняющего вещества:

$$C_i^{15} = C_i \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - O_2},$$

$$C_{\text{NO}_x} = 120 \text{ мг/м}^3$$

$$C_{\text{CO}} = 80 \text{ мг/м}^3$$

$$C_{\text{NO}_x}^{15} = C_{\text{NO}_x} \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - 0_2} = 120 \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - 16,2} = 150 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{\text{NO}_2}^{15} = 0,8 \cdot C_{\text{NO}_x}^{15} = 0,8 \cdot 150 = 120 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{\text{NO}}^{15} = 0,13 \cdot C_{\text{NO}_x}^{15} = 0,13 \cdot 150 = 19,5 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{\text{CO}}^{15} = 80 \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - 16,2} = 100 \text{ мг/м}^3.$$

Мощность выброса

$$K_B = 0,95$$

$$Q_2 = 79,19 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$M_{\text{NO}_2} = C_i^{15} \cdot K_B \cdot Q_2 \cdot 10^{-3} = 120 \cdot 0,95 \cdot 79,19 \cdot 10^{-3} = 9,03 \text{ г/с}.$$

$$M_{\text{NO}} = 19,5 \cdot 0,95 \cdot 79,19 \cdot 10^{-3} = 1,47 \text{ г/с}.$$

$$M_{\text{CO}} = 100 \cdot 0,95 \cdot 79,19 \cdot 10^{-3} = 7,52 \text{ г/с}.$$

**Расчет максимальных приземных концентраций вредных веществ**

$$C_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1} \cdot \Delta t}.$$

$A = 160$  (для Европейской территории севернее  $52^\circ$  с. ш.)

$$F = 1$$

$$t_\Gamma = t_6 = 110^\circ\text{C}$$

$$t_B = 23,6^\circ\text{C} \text{ для Пензы (табл.8)}$$

$$\Delta t = t_\Gamma - t_B = 110 - 23,6 = 86,4^\circ\text{C}$$

$$D = 3 \text{ м}$$

$$H = 20 \text{ м}$$

$$\eta = 1$$

$$V_1 = Q_{6\phi} = 111 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$w_0 = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 111}{\pi \cdot 3^2} = 15,71 \text{ м/с.}$$

$$f = 1000 \cdot \frac{w_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta t} = 1000 \cdot \frac{15,71^2 \cdot 3}{20^2 \cdot 86,4} = 21,42.$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}}$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{21,42} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{21,42}} = 0,482.$$

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta t}{H}} = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{111 \cdot 86,4}{20}} = 5,08.$$

$$v_m = 5,08 > 2$$

$$n = 1.$$

$$C_{M(\text{NO}_2)} = \frac{160 \cdot 9,03 \cdot 1 \cdot 0,482 \cdot 1 \cdot 1}{20^2 \cdot \sqrt[3]{111 \cdot 86,4}} = 0,0845 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{M(\text{NO})} = \frac{160 \cdot 1,47 \cdot 1 \cdot 0,482 \cdot 1 \cdot 1}{20^2 \cdot \sqrt[3]{111 \cdot 86,4}} = 0,0138 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{M(\text{CO})} = \frac{160 \cdot 7,52 \cdot 1 \cdot 0,482 \cdot 1 \cdot 1}{20^2 \cdot \sqrt[3]{111 \cdot 86,4}} = 0,0703 \text{ мг/м}^3.$$

**Расстояние от источника выбросов, на котором приземная концентрация достигает максимального значения**

$$v_m > 2$$

$$d = 7 \cdot \sqrt{v_m} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}).$$

$$d = 7 \cdot \sqrt{5,08} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{21,42}) = 28,03.$$

$$x_M = \frac{5 - F}{4} \cdot d \cdot H = \frac{5 - 1}{4} \cdot 28,03 \cdot 20 = 561 \text{ м.}$$

Таблица 4

## Результаты расчета

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
Расход топливного газа	$q_{TG}$	м <sup>3</sup> /ч	7803
	$G_{TG}$	кг/с	1,448
Коэффициент избытка воздуха	$\alpha_B$		4,01
Расход продуктов сгорания (на срезе выхлопного патрубка турбины)	$G_2$	кг/с	101,0
	$Q_2$	м <sup>3</sup> /с	79,19
Расход продуктов сгорания (на срезе выхлопной трубы)	$Q_{6ф}$	м <sup>3</sup> /с	111,0
Содержание кислорода в сухих продуктах сгорания	O <sub>2</sub>	%	16,2
Мощность выброса:			
- диоксида азота	$M_{NO_2}$	г/с	9,03
- оксида азота	$M_{NO}$	г/с	1,47
- оксида углерода	$M_{CO}$	г/с	7,52
Температурой окружающего атмосферного воздуха.	$t_B$	°C	23,6
Максимальная приземная концентрация			
- диоксида азота	$C_{M(NO_2)}$	мг/м <sup>3</sup>	0,0845
- оксида азота	$C_{M(NO)}$	мг/м <sup>3</sup>	0,0138
- оксида углерода	$C_{M(CO)}$	мг/м <sup>3</sup>	0,0703
Расстояние от источника выбросов, на котором приземная концентрация достигает максимального значения	$x_M$	м	561

**Расчет приземной концентрации вредных веществ на различных расстояниях от источника выброса**

$$C = S_1 \cdot C_M.$$

$$S_1 = 3 \cdot \left(\frac{x}{561}\right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{x}{561}\right)^3 + 6 \cdot \left(\frac{x}{561}\right)^2, \quad x \leq 561$$

$$S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot \left(\frac{x}{561}\right)^2 + 1}, \quad 561 < x \leq 4488$$

Расстояние от источника выбросов

$$x = 100 \text{ м}$$

$$S_1 = 3 \cdot \left(\frac{100}{561}\right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{100}{561}\right)^3 + 6 \cdot \left(\frac{100}{561}\right)^2 = 0,148.$$

$$C_{\text{NO}_2} = 0,148 \cdot 0,845 = 0,0125 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{\text{NO}} = 0,148 \cdot 0,0138 = 0,00204 \text{ мг/м}^3.$$

$$C_{\text{CO}} = 0,148 \cdot 0,0703 = 0,0104 \text{ мг/м}^3.$$

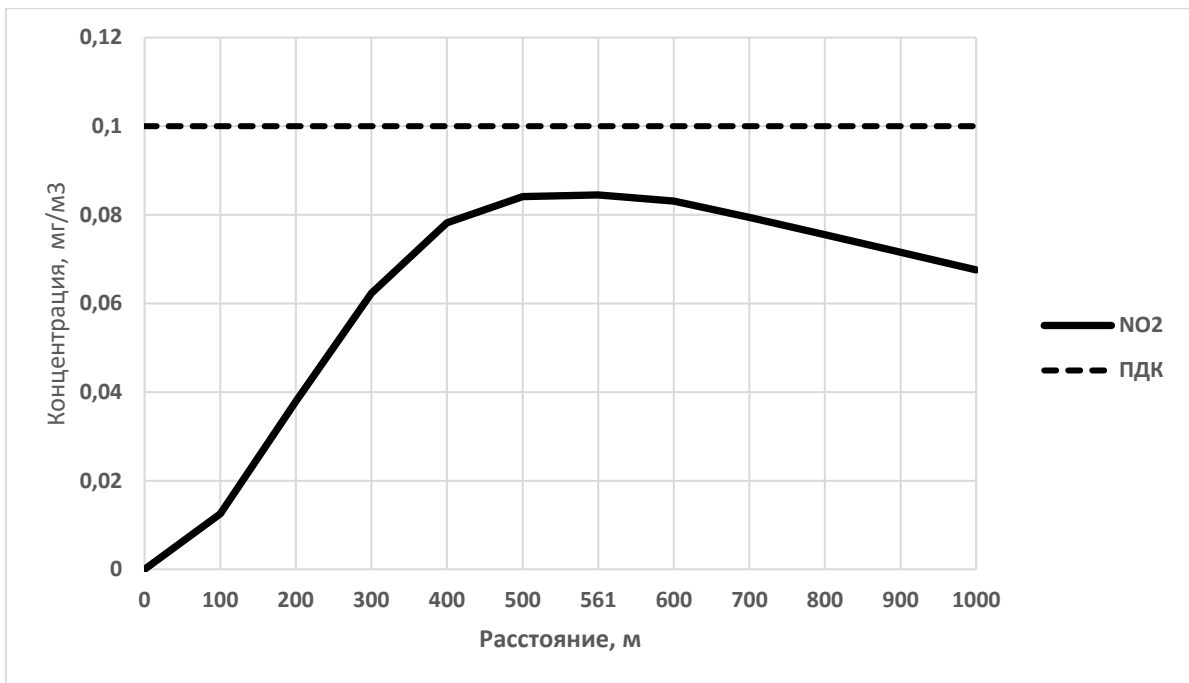
Результаты расчёта приземных концентраций вредных веществ в зависимости от расстояния показаны в табл. 5.

*Таблица 5*

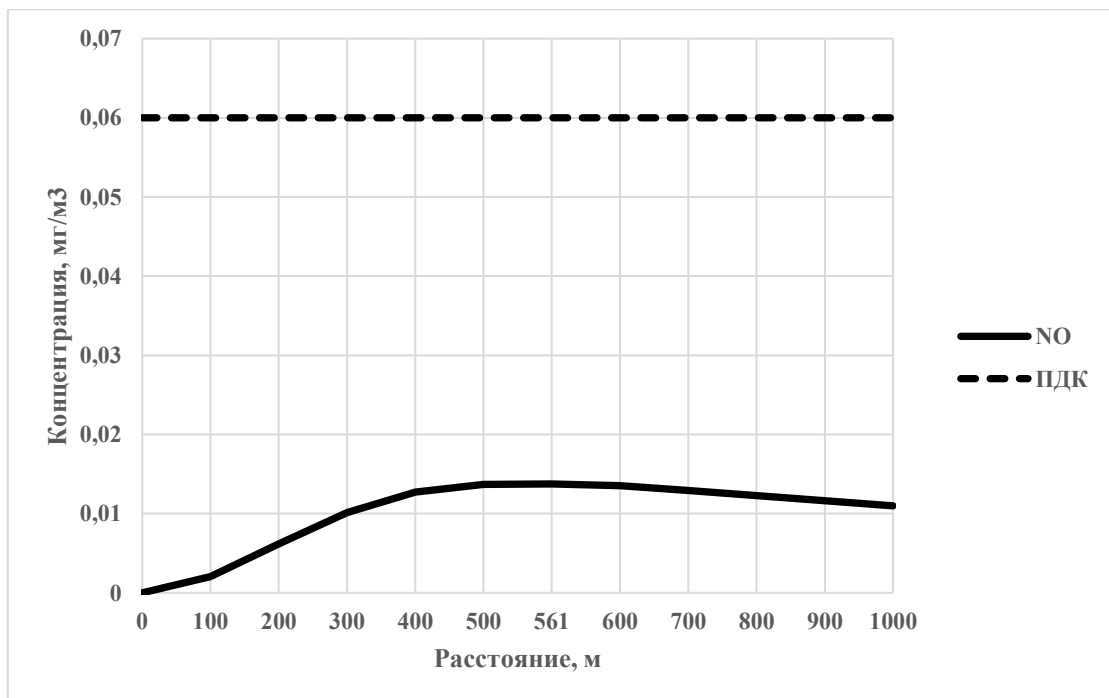
**Зависимость приземных концентраций вредных веществ от расстояния**

Расстояние от источника, м	$S_1$	Приземных концентраций вредных веществ, мг/м <sup>3</sup>		
		NO <sub>2</sub>	NO	CO
0	0	0	0	0
100	0,148	0,0125	0,00204	0,0104
200	0,449	0,0379	0,00618	0,0316
300	0,738	0,0624	0,0102	0,0519
400	0,926	0,0782	0,0127	0,0652
500	0,995	0,0841	0,0137	0,0700
561	1	0,0845	0,0138	0,0704
600	0,984	0,0831	0,0135	0,0692
700	0,940	0,0794	0,0129	0,0661
800	0,894	0,0755	0,0123	0,0629
900	0,847	0,0716	0,0116	0,0596
1000	0,800	0,0676	0,0110	0,0563
ПДКсс	-	0,1	0,06	3

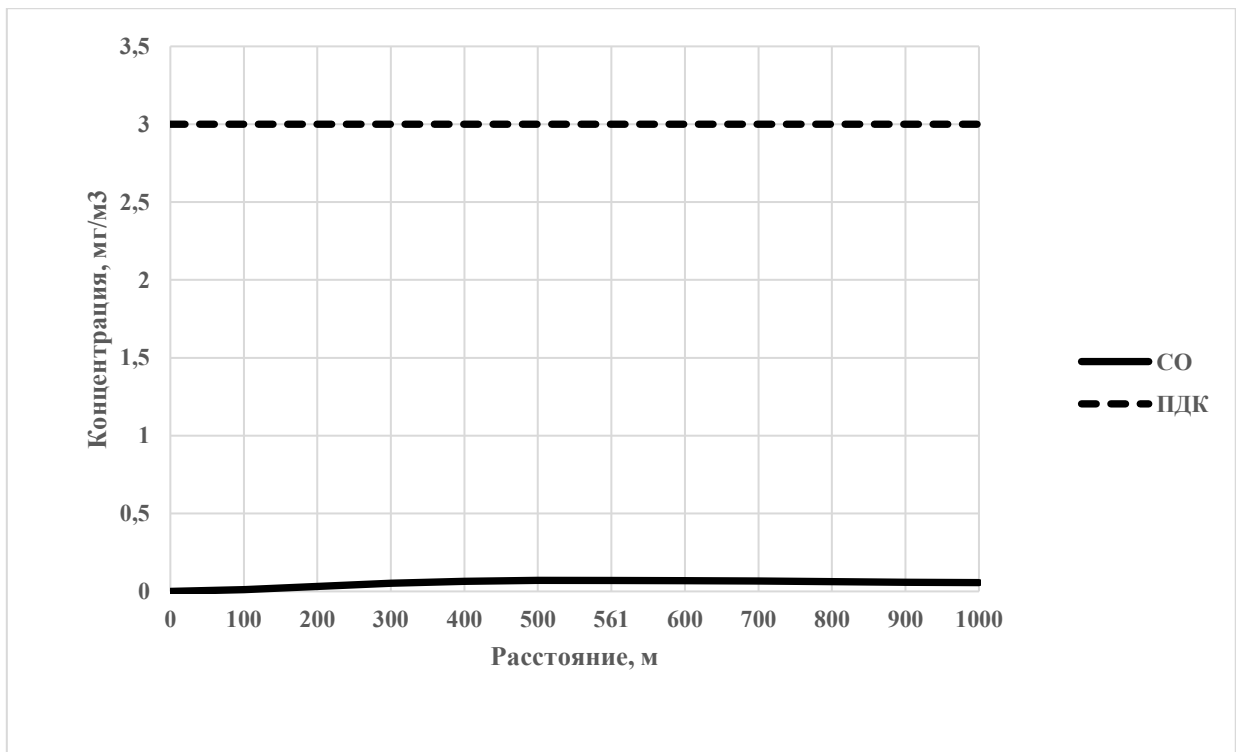
Зависимость концентраций от расстояния до источника показаны на рис. 2 - для NO<sub>2</sub>, на рис. 3 - для NO, на рис. 4 - для CO.



**Рис.2. Зависимость концентрации NO<sub>2</sub> от расстояния до источника**



**Рис.3. Зависимость концентрации NO от расстояния до источника**



**Рис.4. Зависимость концентрации CO от расстояния до источника**

### Расчет эмиссии парниковых газов

Фактическое потребление топлива за год

$$M = G_{\text{ТТ}} = 1,448 \text{ кг/с} = 40973 \text{ т/год.}$$

Расчет эмиссии CO<sub>2</sub>:

для природного газа  $K_1 = 0,03371 \cdot 10^{12} \text{ Дж/т}$ ;

для природного газа  $K_2 = 14,96 \cdot 10^{-12} \text{ т/Дж}$  ;

для природного газа  $K_3 = 0,995$

$$E = M \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{44}{12}$$

$$E = 40973 \cdot 0,03371 \cdot 10^{12} \cdot 14,96 \cdot 10^{-12} \cdot 0,995 \cdot \frac{44}{12} = 75384 \text{ т/год.}$$

$$\text{ПГП}_{\text{CO}_2} = 1$$

$$E_{\text{CO}_2} = E_i \cdot \text{ПГП}_i = 75384 \cdot 1 = 75384 \text{ т/год.}$$

Расчет эмиссии метана CH<sub>4</sub>

для природного газа  $K_1 = 0,03371 \cdot 10^{12} \text{ Дж/т}$

для CH<sub>4</sub>  $K_4 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ кг/Дж}$ ;

$$E = M \cdot K_1 \cdot K_4 = 40973 \cdot 0,03371 \cdot 10^{12} \cdot 5 \cdot 10^{-12} = 6906 \text{ кг/год} = 6,906 \text{ т/год.}$$

$$\text{ПГП}_{\text{CH}_4} = 21$$

$$E_{\text{CH}_4} = 6,906 \cdot 21 = 145 \text{ т/год.}$$

Расчет эмиссии закиси азота N<sub>2</sub>O

для природного газа  $K_1 = 0,03371 \cdot 10^{12} \text{ Дж/т}$

для N<sub>2</sub>O  $K_4 = 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ кг/Дж.}$

$$E = M \cdot K_1 \cdot K_4 = 40973 \cdot 0,03371 \cdot 10^{12} \cdot 0,1 \cdot 10^{-12} = 138 \text{ кг/год} = 0,138 \text{ т/год.}$$

$$\text{ПГП}_{\text{N}_2\text{O}} = 310$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 0,138 \cdot 310 = 43 \text{ т/год.}$$

*Таблица 6*

**Результаты расчета эмиссии парниковых газов**

Эмиссия парниковых газов	Парниковые газы		
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Эмиссия парниковых газов, т/год	75384	6,906	0,138
ПГП	1	21	310
Эмиссия парниковых газов в пересчете на CO <sub>2</sub> экв, т CO <sub>2</sub> /год	75384	145	43
Суммарная эмиссия парниковых газов в пересчете на CO <sub>2</sub> экв, т CO <sub>2</sub> /год	75572		

**Выводы:**

Выбросы вредных веществ:

- расстояние от источника выбросов, на котором приземная концентрация достигает максимального значения, составляет 561 м,
- концентрации NO<sub>2</sub>, NO и CO на всем расстоянии не превышают ПДКсс,
- работа ТЭС соответствует экологическим требованиям.

Парниковые газы:

- эмиссия парниковых газов ТЭС с газотурбинными двигателями мощностью 25 МВт составляет 75,6 тыс т CO<sub>2</sub>/год.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО Газпром 2-3.5-039-2005 Каталог удельных выбросов вредных веществ газотурбинных газоперекачивающих агрегатов
2. СНиП 23-01-99 Строительная климатология
3. ОНД-16 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий
4. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
5. Методика Минприроды России от 30.06.2015 N 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации»
6. Вредные вещества в промышленности, том 1-3. Под ред. Н. В. Лазарева, Справочник– Л: Химия, 1977
7. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний ; под ред. А.Г. Костюка. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016.-557с.

Таблица 7

## Варианты заданий к работе

Вариант		1	2	3	4	5	6
Наименование показателя	Обозначение	Центавр Т-3002	Центавр Т-4500	Центавр Т-4700	ГПА-4РМ	ПГ-700-5	ГТК-5
Мощность в стационарных условиях, МВт	$N_e$	2,6	3,05	3,25	4,0	4,25	4,4
Эффективный КПД в стационарных условиях, %	$\eta_c$	25,3	26,2	26,7	32,0	25,0	26,0
Температура продуктов сгорания на выхлопе ГТУ (на срезе патрубка), К	$T_2$	683	723	723	659	556	556
Расход циклового воздуха, кг/с	$G_3$	16,3	18,0	18,25	21,70	45,2	45,2
Расход продуктов сгорания (на срезе выхлопной трубы), кг/с	$G_6$	16,5	18,2	18,50	21,95	45,5	45,5
Концентрация в сухих продуктах сгорания, мг/м <sup>3</sup> :							
- оксидов азота	$C_{NOx}$	136	107	66	82	202	202
- оксида углерода	$C_{CO}$	49	50	51	82	74	74
Высота выхлопной трубы, м	$H$	5,3	9,6	9,6	21,6	13,0	22,0
Диаметр выхлопной трубы, м	$D$	1,35	1,1	1,1	1,47	2,8	3,0

Продолжение таблицы 7

Вариант		7	8	9	10	11	12
Наименование показателя	Обозначение	Таурус-60S	ГТ-6-750	ГТН-6	ГПА-Ц-8Б	ГТК-10ИР	ГПА-Ц-10Б
Мощность в стационарных условиях, МВт	$N_e$	5,2	6,0	6,3	8,0	9,5	10,0
Эффективный КПД в стационарных условиях, %	$\eta_c$	31,5	24,0	24,0	30,0	33,0	33,0
Температура продуктов сгорания на выхлопе ГТУ (на срезе патрубка), К	$T_2$	763	688	688	810	626	780
Расход циклового воздуха, кг/с	$G_3$	21,4	47,0	47,0	36,6	51,5	37,0
Расход продуктов сгорания (на срезе выхлопной трубы), кг/с	$G_6$	21,7	47,5	47,5	37,1	52,1	37,1
Концентрация в сухих продуктах сгорания, мг/м <sup>3</sup> :							
- оксидов азота	$C_{NOx}$	42	78	92	120	141	137
- оксида углерода	$C_{CO}$	25	58	150	239	92	275
Высота выхлопной трубы, м	$H$	15,0	14,0	23,5	9,0	21,5	12,93
Диаметр выхлопной трубы, м	$D$	1,524	3,0	2,5	2,7	1,9	2,84

Продолжение таблицы 7

Вариант		13	14	15	16	17	18
Наименование показателя	Обозначение	ГТК-10М3	ГПА-Ц	ГПА-ГТН	ГПА-ГТ	ГПА-ГТ	ГПА-4
Мощность в стационарных условиях, МВт	$N_e$	10,3	6,3	6,3	6	6	4
Эффективный КПД в стационарных условиях, %	$\eta_c$	32,2	29	30,5	30	27	24
Температура продуктов сгорания на выхлопе ГТУ (на срезе патрубка), К	$T_2$	547	770	683	749	749	690
Расход циклового воздуха, кг/с	$G_3$	84,7	34,6	32,1	58,2	58,2	27,81
Расход продуктов сгорания (на срезе выхлопной трубы), кг/с	$G_6$	85,3	36,1	32,5	58,6	58,6	28,14
Концентрация в сухих продуктах сгорания, мг/м <sup>3</sup> :							
- оксидов азота	$C_{NOx}$	74/25	105	105	105	74	35
- оксида углерода	$C_{CO}$	25/74	209	210	33	45	29
Высота выхлопной трубы, м	$H$	22,0	21,5	11,3	28,0	13,5	
Диаметр выхлопной трубы, м	$D$	2,3	2,0	3,0	3,2	3,2	

Таблица 8

Климатические параметры теплого периода года

№	Край, область	Широта, °	Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца, °С
1	Архангельск	64,3	20,9
2	Барнаул	53,2	26
3	Воркута	67,3	18
4	Екатеринбург	56,5	23,1
5	Иркутск	52,2	24,7
6	Казань	55,8	24,7
7	Кемерово	55,2	25,1
8	Красноярск	56,0	24,3
9	Магадан	59,6	14,9
10	Москва	-	23,6
11	Мурманск	68,6	17,5
12	Нижний Новгород	56,2	23,5
13	Новосибирск	55	24,6
14	Пермь	58	23,4
15	Санкт-Петербург	59,6	22
16	Тюмень	57,1	24
17	Челябинск	55,1	24,1
18	Якутск	62	25,2