

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 662.613

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА НА ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Демин А.В.¹, Демина Г.В.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

alexei_demin@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение количественных характеристик выбросов оксидов азота при сжигании газовых смесей, содержащих водород, монооксид углерода и метан. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассматривалось несколько типов газов различных химических составов и количественного содержания компонентов: CH_4 ; CO ; H_2 ; 7 типов синтез-газа с разным содержанием CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , N_2 . Такие типы синтез-газа имели низкие, средние и высокие значения теплоты сгорания. При выполнении численных исследований параметров и состава продуктов сгорания использовался подход, основанный на химически равновесном состоянии многокомпонентной реагирующей смеси при минимальном значении изобарно-изотермического потенциала. Получены значения основных параметров продуктов сгорания и оценки выбросов оксидов азота при различном соотношении исходных компонентов в газовой смеси и различных значениях коэффициента избытка воздуха. Значения относительных показателей расхода продуктов сгорания достаточно сильно коррелируют со значениями относительных показателей выбросов оксидов азота. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Получены численные оценки взаимосвязи между теплотой сгорания генераторных газов, расходными характеристиками продуктов сгорания, определяемыми составом исходной газовой смеси, и выбросами оксидов азота. Количественный показатель W_{nc} , определяемый отношением массовых расходов продуктов сгорания базового топлива и альтернативного генераторного газа, при условии одинаковой тепловой мощности энергоустановки, дает возможность предварительной сравнительной оценки ожидаемого уровня выбросов NO_x . При значениях $W_{nc} \approx 1$ уровень выбросов NO_x у сравниваемых топливных композиций примерно одинаков. Соответственно, при значениях этого показателя больше или меньше единицы уровни выбросов оксидов азота при сжигании альтернативного генераторного газа выше или ниже, чем при сжигании базового топлива. Практическое использование показателя W_{nc} наиболее эффективно на стадиях разработки и проектирования новых энергоустановок, включая оптимизацию планирования вычислительных и натурных экспериментов, а также при переводе эксплуатируемых энергоустановок на альтернативное газовое топливо.

Ключевые слова: генераторный газ; горение; моделирование; численные исследования; выбросы; оксиды азота.

Для цитирования: Демин А.В., Демина Г.В. Влияние состава генераторного газа на выбросы загрязняющих веществ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 131-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140.

THE INFLUENCE OF GENERATOR GAS COMPOSITION ON POLLUTANT EMISSIONS

Demin A.V.¹, Demina G.V.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

alexei_demin@mail.ru

Abstract: PURPOSE. Determination of quantitative characteristics of nitrogen oxide emissions during combustion of gas mixtures containing hydrogen, carbon monoxide and methane. **RESULTS.** Several types of gases with different chemical compositions and quantitative content of components were considered: CH₄; CO; H₂; 7 types of synthesis gas with different content of CH₄, CO, H₂, CO₂, N₂. These types of synthesis gas had low, medium and high values of heat of combustion. When performing numerical studies of the parameters and composition of combustion products, an approach based on the chemical equilibrium state of a multicomponent reacting mixture at a minimum value of isobaric-isothermal potential was used. The values of the main parameters of combustion products and estimates of nitrogen oxide emissions were obtained at different ratios of the initial components in the gas mixture and different values of the excess air coefficient. The values of the relative indicators of combustion product consumption correlate quite strongly with the values of the relative indicators of nitrogen oxide emissions. **CONCLUSION.** Numerical estimates of the relationship between the combustion heat of generator gases, the flow characteristics of the combustion products determined by the composition of the initial gas mixture, and nitrogen oxide emissions are obtained. The quantitative indicator W_{ps} , determined by the ratio of the mass flow rates of the combustion products of the base fuel and alternative generator gas, under the condition of the same thermal power of the power plant, makes it possible to preliminary compare the expected level of NO_x emissions. At $W_{ps} \approx 1$, the level of NO_x emissions for the compared fuel compositions is approximately the same. Accordingly, at values of this indicator greater or less than one, the levels of nitrogen oxide emissions during combustion of the alternative generator gas are higher or lower than during combustion of the base fuel. The practical use of the W_{ps} indicator is most effective at the stages of development and design of new power plants, including optimization of planning of computational and full-scale experiments, as well as during the transfer of operating power plants to alternative gas fuel.

Keywords: flammable gas; combustion; modeling; numerical studies; emissions; nitrogen oxides.

For citation: Demin A.V., Demina G.V. The influence of generator gas composition on pollutant emissions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 131-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

В настоящее время в энергетике постоянно возрастает доля использования альтернативных возобновляемых топливных ресурсов, к которым, в частности, относится биомасса. При термохимической конверсии биомассы основным продуктом является генераторный газ (синтез-газ), в составе которого находятся горючие газы (H₂, CO, CH₄ и др.) и газы, которые считаются балластными (CO₂, N₂ и др.). Для производства синтез-газа основным способом является газификация. Эффективность процессов газификации биомассы во многом определяется её химическим составом, видом газифицирующего агента, технологией подвода необходимой тепловой энергии и т.д.

Для наиболее эффективной организации процессов газификации необходимо выполнение соответствующих теоретических и экспериментальных исследований. Многими исследователями уделяется большое внимание поиску решений такой сложной задачи, как повышение степени конверсии исходного сырья в конечные продукты, содержащие горючие газы в наибольшем количестве, при уменьшении затрат на технологические процессы газификации [1-8].

При практическом использовании генераторных газов – сжигании с целью получения тепловой энергии, основными научными задачами являются повышение полноты сгорания и снижение эмиссии загрязняющих веществ (NO_x, CO и др.) [9-13].

Еще одним важным аспектом данной проблемы является организация производственного экологического контроля при увеличении доли использования синтез-газа при генерации тепловой энергии [14]. В производственных условиях генераторные газы сжигают непосредственно в смеси с воздухом или в определенных соотношениях с природным газом, содержащим в наибольших количествах метан. В зависимости от состава генераторного газа или его доли в смеси с природным газом выбросы загрязняющих веществ, главным образом, оксидов азота, могут превышать или быть меньшими по сравнению с выбросами при сжигании природного газа [9-11]. Например, в работе [9] представлены результаты исследований горения чистого метана и синтез-газов различного состава: синтез-газ А (67% CO: 33% H₂), синтез-газ В (50% CO: 50% H₂) и синтез-газ С (33%

СО: 67% Н₂). Результаты показали, что для полного сгорания синтез-газа с более высоким содержанием СО требуется больше времени пребывания в камере сгорания по сравнению с другими газами. Также подтверждена высокая зависимость выбросов NO_x от максимального уровня температуры продуктов горения. Продукты горения синтез-газа С характеризуются наиболее высокими выбросами NO_x, а продукты горения синтез-газа А – наименьшими. Результаты исследований [13] показали, что при сжигании синтез-газа, содержащего СО и Н₂, при определенных условиях выбросы NO_x могут быть выше, более чем на порядок, выбросов NO_x при сжигании метана.

В данной работе рассматриваются горючие газы нескольких типов в зависимости от состава компонентов: CH₄; СО; Н₂; 7 типов синтез-газа с различным содержанием CH₄, СО, Н₂, СО₂, N₂ в зависимости от вида газифицирующего агента. Такие типы синтез-газа имели низкие, средние и высокие значения теплоты сгорания.

Основной целью работы являлось выявление взаимосвязей между соотношением исходных компонентов в газовой смеси при различных значениях коэффициента избытка воздуха и выбросами оксидов азота.

Новизна результатов исследования заключается в определении факторов, в наибольшей степени влияющих на эмиссию NO_x при сжигании генераторных газов. Прежде всего, состав газовой смеси предопределяет значение низшей теплоты сгорания и количество воздуха, необходимого для полного сжигания газа. В свою очередь, эти показатели однозначно определяют максимальную температуру продуктов сгорания и, соответственно – уровень эмиссии термических оксидов азота.

Полученные результаты практически значимы при выборе методов подавления образования оксидов азота, проектировании и создании горелочных устройств с возможностью регулирования режимных параметров в зависимости от состава сжигаемых газов в тепловых энергоустановках.

Материалы и методы (Materials and methods)

При моделировании процессов горения использован метод расчета, основанный на допущении, что химически реагирующая многокомпонентная смесь продуктов горения находится в состоянии термодинамического и химического равновесия [3]. Такому состоянию смеси соответствует минимальное значение изобарно-изотермического потенциала.

Принятые условные обозначения и показатели:

Q_n – низшая теплота сгорания газообразного горючего, кДж/кг;

k_{m0} – массовое стехиометрическое соотношение окислителя (воздух) и горючего;

k_m – массовое соотношение окислителя и горючего;

$\alpha_v = k_m / k_{m0}$ – коэффициент избытка воздуха;

$m_{nc} = (1 + k_m)$ – массовый расход продуктов сгорания при сжигании 1 кг газа, кг/с;

$\beta = Q_{nCH_4} / Q_{ni}$ – отношение низшей теплоты сгорания метана к низшей теплоте сгорания газа i -го типа;

$M_{nc} = \beta \cdot (1 + k_m)$ – массовый расход продуктов сгорания при сжигании газа в количестве, необходимом для достижения одинаковой тепловой мощности энергоустановки, кг/с;

T – температура продуктов сгорания, К;

m_{NOx} – массовый расход оксидов азота при сжигании 1 кг газа, кг/с;

M_{NOx} – массовый расход оксидов азота при сжигании β кг газа, кг/с;

$W_{nci} = M_{ncCH_4} / M_{nci}$ – отношение массовых расходов продуктов сгорания метана и i -го газа;

$W_{NOxi} = M_{NOxi} / M_{NOxCH_4}$ – отношение массовых расходов оксидов азота при сжигании i -го газа и метана.

Показатели, характеризующие выбросы СО₂ при сжигании топлива:

G_C – количество углерода в топливе, т/С/т;

$W_C = G_C \cdot 10^3 / H_f$ – энергетический эквивалент содержания углерода, т/С/ТДж;

$EF_{CO_2} = W_C \cdot 44 / 12$ – коэффициент выбросов СО₂ при сжигании топлива, т СО₂/ТДж.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

На первом этапе работы прогнозирование состава и параметров продуктов сгорания было выполнено для газов, содержащих только метан, монооксид углерода, водород и еще для следующих четырех типов генераторного газа.

Тип А: условная формула – $C_{0,37}H_{0,38}O_{0,5}N_{0,96}$; газифицирующий агент – продукты неполного сгорания части биомассы при подводе воздуха [8];

Тип В: условная формула – $C_{0,58}H_{1,12}O_{0,75}N_{0,04}$; газифицирующий агент – продукты неполного сгорания части биомассы при подводе кислорода [8];

Тип С: условная формула – $C_{0,6}H_{0,8}O_{0,8}$; газифицирующий агент – водяной пар [8];

Тип D: условная формула – $C_{0,501}H_{1,046}O_{0,527}N_{0,008}$; газифицирующий агент – водяной пар [15].

Основные характеристики генераторных газов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Характеристика генераторного газа
Characteristics of generator gas

Состав и параметры генераторного газа	Тип генераторного газа			
	А	В	С	D
CO, об. %	20	25	40	44,7
H ₂ , об. %	15	40	40	49,5
CH ₄ , об. %	2	8	0	1,4
CO ₂ , об. %	15	25	20	4,0
N ₂ , об. %	48	2	0	0,4
Q _m , кДж/кг	4145	11209	10081	16507
k _{m0}	1,1298	3,2417	2,6534	4,4191
G _C , т C/т	0,1689	0,3369	0,3459	0,3849
W _C , т C/ТДж	40,76	30,06	34,33	23,36
EF _{CO2} , т CO ₂ /ТДж	149,5	110,2	125,9	85,68

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Наиболее информативные параметры продуктов сгорания различных газов при значениях коэффициентов избытка воздуха > 1 приведены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры продуктов сгорания
Combustion product parameters

Газ	Параметры	Значения параметров			
		α=1,0	α=1,1	α=1,2	α=1,4
CH ₄	k _m	17,211	18,932	20,654	24,096
	T, К	2224	2143	2043	1859
	NO _x , масс. %	0,2095	0,3349	0,35174	0,2774
CO	k _m	2,4644	2,7108	2,9573	3,4502
	T, К	2376	2332	2275	2138
	NO _x , масс. %	0,4469	0,4993	0,5198	0,4831
H ₂	k _m	34,241	37,665	41,089	47,938
	T, К	2369,2	2292,8	2198,6	2019,4
	NO _x , масс. %	0,3039	0,4669	0,5135	0,4450
А	k _m	1,129	1,242	1,355	1,581
	T, К	1839	1770	1727	1622
	NO _x , масс. %	0,0305	0,0834	0,0993	0,0907
В	k _m	3,241	3,565	3,89	4,538
	T, К	2160,4	2091,4	2026,3	1875,2
	NO _x , масс. %	0,1724	0,2518	0,28455	0,2498
С	k _m	2,653	2,918	3,184	3,714
	T, К	2225	2177	2110	1966
	NO _x , масс. %	0,2331	0,3101	0,3395	0,3122
D	k _m	4,419	4,861	5,303	6,186
	T, К	2328	2274	2202	2044
	NO _x , масс. %	0,3443	0,4325	0,4647	0,4193

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При сжигании генераторных газов в одной и той же установке, при условии достижения одинаковых значений тепловой мощности, такой же, как при сжигании CH_4 , требуется изменение расхода газов пропорционально отношению низшей теплоты сгорания метана к низшей теплоте сгорания газа конкретного состава. В таблицах 3-6 приведены расходные характеристики продуктов сгорания и выбросов NO_x при сжигании одного ($m_{\text{пс}}$, m_{NO_x}) и β ($M_{\text{пс}}$, M_{NO_x}) кг газа в секунду.

Таблица 3
Table 3

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	18,211	3.464	35.242	2,129	4,241	3,653	5,419
m_{NO_x} , кг/с	0,0381	0.0154	0.1070	0,0006	0,0073	0,0085	0,0186
$M_{\text{пс}}$, кг/с	18,211	17.122	14.705	25,69	18,921	18,12	16,414
M_{NO_x} , кг/с	0,0381	0.0765	0.0446	0,0078	0,0326	0,0422	0,0565
$W_{\text{пс } i}$	1,0	1.0636	1.2385	0,7088	0,9624	1,005	1,1095
$W_{\text{NO}_x i}$	1,0	2.0055	1.1712	0,2053	0,8552	1,1072	1,4814

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4
Table 4

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1,1$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1.1$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	19,933	3.710	38.666	2,242	4,565	3,918	5,861
m_{NO_x} , кг/с	0,0667	0.0185	0.1805	0,0018	0,0114	0,0121	0,0253
$M_{\text{пс}}$, кг/с	19,933	18.34	16.134	27,054	20,367	19,436	17,753
M_{NO_x} , кг/с	0,0667	0.0915	0.0753	0,0225	0,05128	0,0602	0,0767
$W_{\text{пс } i}$	1,0	1.086	1.235	0,736	0,978	1,025	1,122
$W_{\text{NO}_x i}$	1,0	1.371	1.128	0,338	0,768	0,903	1,15

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 5
Table 5

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1,2$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1.2$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	21,654	3.957	42.09	2,355	4,89	4,184	6,302
m_{NO_x} , кг/с	0,0761	0.0205	0.2161	0,0023	0,0139	0,0142	0,0292
$M_{\text{пс}}$, кг/с	21,654	19.558	17.562	28,415	21,813	20,752	19,091
M_{NO_x} , кг/с	0,0761	0.1016	0.0901	0,0282	0,062	0,0704	0,0887
$W_{\text{пс } i}$	1	1.107	1.233	0,762	0,992	1,043	1,134
$W_{\text{NO}_x i}$	1	1.3348	1.1841	0,3707	0,8149	0,925	1,165

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6
Table 6

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1,4$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1.4$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	25.096	4.4502	48.938	2.581	5.538	4.714	7.186
m_{NO_x} , кг/с	0.0696	0.0214	0.2177	0.0023	0.0138	0.0147	0.0301
$M_{\text{пс}}$, кг/с	25.096	21.994	20.42	31.141	24.705	23.384	21.768
M_{NO_x} , кг/с	0.0696	0.1062	0.0908	0.0282	0.0617	0.073	0.0912
$W_{\text{пс } i}$	1	1.141	1.229	0.805	1.015	1.073	1.152
$W_{\text{NO}_x i}$	1	1.525	1.305	0.405	0.886	1.048	1.311

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При сравнении полученных относительных показателей $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NO}_x i}$ получено, что

при их значениях близких к 1,0 выбросы оксидов азота вполне сопоставимы с выбросами при использовании базового топлива – метана. В большинстве случаев при значениях $W_{\text{пс } i} > 1$ значение $W_{\text{NOx } i} > 1$, и наоборот.

Значения показателя расхода $W_{\text{пс } i}$ достаточно сильно коррелируют со значениями показателя выбросов $W_{\text{NOx } i}$. Результаты статистической обработки с использованием функции КОРРЕЛ (Excel) представлены в таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Значения коэффициентов корреляции между $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NOx } i}$
Values of the correlation coefficients between $W_{\text{пс } i}$ and $W_{\text{NOx } i}$

Коэффициент корреляции	Коэффициент избытка воздуха			
	1,0	1,1	1,2	1,4
r	0,713	0,865	0,911	0,925

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные значения коэффициента корреляции r показывают, что существует высокая сила связи между переменными $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NOx } i}$. В камерах сгорания тепловых энергоустановок сжигание горючих газов, как правило, осуществляется при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,2-1,4$. При таких значениях α сила связи очень высокая.

На следующем этапе работы выполнены численные исследования для генераторных газов, имеющих в своем составе одинаковые компоненты, но в различных концентрациях. В качестве базового горючего был выбран газ типа С (табл. 1). В таком газе балластом является диоксид углерода. Другие варианты содержания компонентов формировались при уменьшении доли CO_2 . Таким образом, увеличивалось содержание CO и H_2 . Основные характеристики газовых смесей группы С приведены в таблице 8.

Таблица 8
Table 8

Характеристика генераторного газа
Characteristics of generator gas

Состав и параметры генераторного газа	Тип генераторного газа		
	C_1	C_2	C_3
CO , об. %	42,5	45	47,5
H_2 , об. %	42,5	45	47,5
CO_2 , об. %	15	10	5
Q_{H} , кДж/кг	11506	13169	15125
k_{m0}	3,0303	3,4682	3,9833
G_{C} , т С/т	0,3563	0,3684	0,3826
W_{C} , т С/ТДж	30,968	27,976	25,299
EF_{CO_2} , т CO_2 /ТДж	113,55	102,58	92,762

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Некоторые параметры продуктов сгорания газов, входящих в группу С, представлены в таблицах 9 и 10.

Таблица 9
Table 9

Параметры продуктов сгорания
Combustion product parameters

Газ	Параметры	Значения параметров			
		$\alpha=1,0$	$\alpha=1,1$	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,4$
C_1	k_{m}	3,03	3,333	3,636	4,242
	T , К	2256	2206	2137	1988
	NO_x , масс. %	0,2645	0,3442	0,3737	0,3406
C_2	k_{m}	3,468	3,815	4,162	4,855
	T , К	2293	2242	2173	2021
	NO_x , масс. %	0,3059	0,3877	0,4186	0,3811
C_3	k_{m}	3,983	4,382	4,78	5,577
	T , К	2327	2275	2206	2052
	NO_x , масс. %	0,3475	0,4314	0,4633	0,4215

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions

Коэффициент избытка воздуха	Параметры	Значения параметров для различных типов газа			
		C	C ₁	C ₂	C ₃
$\alpha=1,0$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	3,653	4,03	4,468	4,983
	m_{NO_x} , кг/с	0,0085	0,0106	0,0136	0,0173
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,034	1,068	1,1
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,096	1,228	1,355
$\alpha=1,1$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	3,918	4,333	4,815	5,381
	m_{NO_x} , кг/с	0,0121	0,0149	0,0186	0,0232
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,032	1,063	1,092
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,075	1,1756	1,2731
$\alpha=1,2$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	4,184	4,636	5,162	5,78
	m_{NO_x} , кг/с	0,0142	0,0173	0,0216	0,0267
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,03	1,059	1,086
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,069	1,164	1,256
$\alpha=1,4$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	4,714	5,242	5,855	6,576
	m_{NO_x} , кг/с	0,0147	0,0178	0,0223	0,0277
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,026	1,052	1,076
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,063	1,161	1,255

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Приведенные в таблице 10 значения показателей $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NO}_x i}$ определены для условия, что базовым в данном случае является газ типа C. Полная взаимосвязь этих показателей при изменении состава газа также подтверждается значениями коэффициента корреляции $r > 0,99$.

Изменение массовых расходов продуктов сгорания газов, входящих в группу C, и выбросов оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха приведено при одинаковой тепловой мощности энергоустановки на рисунках 1 и 2.

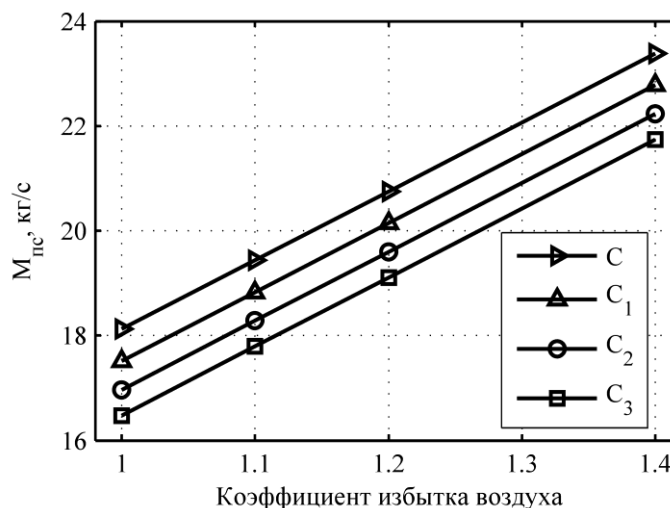


Рис. 1. Массовые расходы продуктов сгорания генераторных газов (C, C₁, C₂, C₃) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Fig. 1. Mass flow rates of combustion products of generator gases (C, C₁, C₂, C₃) depending on the equivalent ratio

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

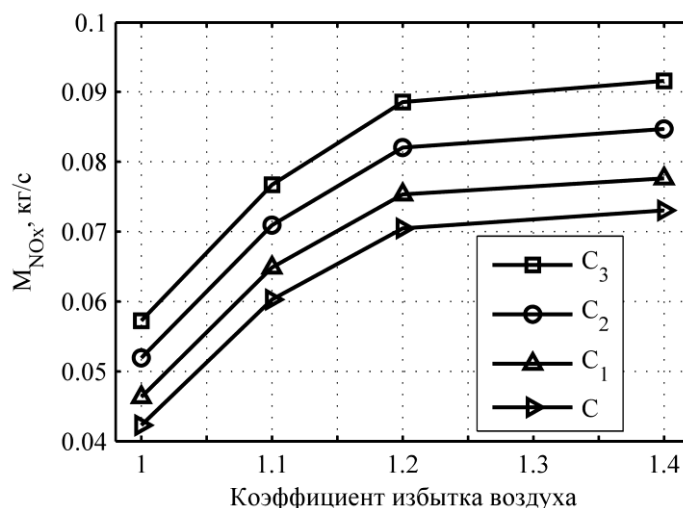


Рис. 2. Выбросы оксидов азота при сжигании генераторных газов (C, C₁, C₂, C₃) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ данных (табл. 10 и рис.1, 2) показывает, что при увеличении доли горючих газов и, следовательно, увеличении теплоты сгорания газовой смеси, соответственно снижается расход продуктов сгорания, но увеличиваются выбросы оксидов азота.

Заключение (Conclusions)

Выполнены численные исследования влияния состава генераторных газов при их сжигании на выбросы оксидов азота.

Подтверждено существование и получены численные оценки взаимосвязи между теплотой сгорания генераторных газов, расходными характеристиками продуктов сгорания, определяемыми составом исходной газовой смеси, и выбросами оксидов азота.

Количественный показатель W_{nc} , определяемый отношением массовых расходов продуктов сгорания базового топлива и альтернативного генераторного газа, при условии одинаковой тепловой мощности энергоустановки, дает возможность предварительной сравнительной оценки ожидаемого уровня выбросов NO_x. При значениях $W_{nc} \approx 1$ уровень выбросов NO_x у сравниваемых топливных композиций примерно одинаковый. Соответственно, при значениях этого показателя больше или меньше единицы уровни выбросов оксидов азота при сжигании альтернативного генераторного газа выше или ниже, чем при сжигании базового топлива.

Практическое использование показателя W_{nc} наиболее эффективно на стадиях разработки и проектирования новых энергоустановок, включая оптимизацию планирования вычислительных и натуральных экспериментов, а также при переводе эксплуатируемых энергоустановок на альтернативное газовое топливо.

Литература

1. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 110. pp. 188 – 206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
2. Mazaheri N., Akbarzadeh A.H., Madadian E., et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production // Energy Conversion and Management. 2019. V. 183. pp. 671 – 688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
3. Naoumov V. I., Krioukov V.G., Abdullin A.L., et al. Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
4. Perera S., Wickramasinghe C., Samarasinghe B., et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review // Biofuel Research Journal. 2021. V. 8(4). pp. 1481 – 1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
5. Kushwah A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview // Science of the Total Environment. 2022. V. 834. pp. 155243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.
6. Ajorloo M., Ghodrati M., Scott J., et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation // Journal of the Energy Institute. 2022. V. 102. pp. 395 – 419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.

7. Tezer Ö., Karabağ N., Öngen A., et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47(34). pp. 15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158
8. Khan M. J., Al-attab K. A. Steam Gasification of Biomass for Hydrogen Production – A Review and Outlook // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. V. 98(2). pp. 175 – 204. doi: 10.37934/arfmts.98.2.175204
9. Sanusi Y.S., Dandajeh H.A. Effect of different syngas compositions on the combustion characteristics and emission of a model combustor // *Nigerian Journal of Technology*. 2020. V. 39(3). pp. 767 – 775 doi: 10.4314/njt.v39i3.16
10. Othman N.F., Boosroh M.H. Effect of H₂ and CO contents in syngas during combustion using Micro Gas Turbine // *IOP Publishing IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* V. 32. 2016. 012037. doi:10.1088/1755-1315/32/1/012037
11. Van Huynh C., Kong S-C. Combustion and NO_x emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam // *Fuel*. V. 107. pp. 455-464. doi:10.1016/j.fuel.2012.12.016
12. Таймаров М.А., Ильин В.К., Чикляев Е.Г., Сунгатуллин Р.Г. Особенности применения метано-водородной фракции в качестве топлива для котлов ТЭС. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2019;21(3):109-116. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-109-116>
13. Гнутикова М.И. Влияние температуры топливно-воздушной смеси на массовую долю выбросов оксидов азота в процессе термохимической рекуперации // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021; (5): 115-118. doi:10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_5_115
14. Иваницкий М.С. Производственный экологический контроль полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания органического топлива. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12>
15. Демин А.В., Демина Г.В. Экологические характеристики термической утилизации отходов с внешним и внутренним подводом тепловой энергии. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(6):143-152. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152>.

Авторы публикации

Демин Алексей Владимирович – профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>. alexei_demin@mail.ru

Демина Галина Владимировна – доцент кафедры «Ботаника и физиология растений», Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия.

References

1. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 110. pp. 188 – 206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
2. Mazaheri N., Akbarzadeh A.H., Madadian E., et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production // *Energy Conversion and Management*. 2019. V. 183. pp. 671 – 688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
3. Naoumov V. I., et al. Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
4. Perera S., Wickramasinghe C., Samarasinghe B., et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review // *Biofuel Research Journal*. 2021. V. 8(4). pp. 1481 – 1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
5. Kushwah A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 834. pp. 155243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.
6. Ajourloo M., Ghodrat M., Scott J., et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation // *Journal of the Energy Institute*. 2022. V. 102. pp. 395 – 419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.
7. Tezer Ö., Karabağ N., Öngen A., et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47(34). pp. 15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158
8. Khan M. J., Al-attab K. A. Steam Gasification of Biomass for Hydrogen Production – A Review

and Outlook // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2022. V. 98(2). pp. 175 – 204. doi: 10.37934/arfmts.98.2.175204

9. Sanusi Y.S., Dandajeh H.A. Effect of different syngas compositions on the combustion characteristics and emission of a model combustor // Nigerian Journal of Technology. 2020. V. 39(3). pp. 767 – 775 doi: 10.4314/njt.v39i3.16

10. Othman N.F., Boosroh M.H. Effect of H₂ and CO contents in syngas during combustion using Micro Gas Turbine // IOP Publishing IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 32. 2016. 012037. doi:10.1088/1755-1315/32/1/012037

11. Van Huynh C., Kong S-C. Combustion and NO_x emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam // Fuel. V. 107. pp. 455-464. doi:10.1016/j.fuel.2012.12.016

12. Taymarov M.A., Ilyin V.K., Chiklyaev E.G., Sungatullin R.G. Features of application of the methane-hydrogen fraction as fuel for thermal power plant boiler. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3):109-116. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-109-116>

13. Gnutikova M.I. Influence of fuel-air mixture temperature on the mass rates of nitrogen oxides emissions during thermochemical recovery // *Mathematical methods in technologies and technics*. 2021; (5): 115-118. doi:10.52348/2712-8873_MMTT_2021_5_115

14. Ivanitskiy M.S. Industrial environmental control of polycyclic aromatic hydrocarbons in organic fuel combustion product. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(1):3-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12>

15. Demin A.V., Demina G.V. Environmental characteristics of thermal utilization of waste with external and internal supply of thermal energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):143-152. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152>

Authors of the publication

Alexey V. Demin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>. alexei_demin@mail.ru

Galina V. Demina – Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **27.05.2025 г.**

Отредактировано **22.10.2025 г.**

Принято **01.11.2025 г.**