

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ СМЕСИ МЕТАНА И АЗОТА С ВОЗДУХОМ

Матюнин О.О.¹, Бачев Н.Л.¹, Шилова А.А.¹, Бульбович Р.В.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Ключевые слова: экспериментальные исследования, эмиссия NO_x , эмиссия CO , горение забалластированных газов

Утилизация нетоварных топливных газов со значительным содержанием балластных компонентов может быть сопряжена с рядом проблем. Забалластированность азотом и меньшая теплотворная способность таких топлив может приводить снижению устойчивости пламени и увеличению эмиссии вредных веществ. На сегодняшний день существует множество аппроксимационных зависимостей выхода NO_x и CO [1-3], однако все они справедливы либо для жидких углеводородных топлив, либо для чистых топливных газов. В данной работе экспериментально исследуется эмиссия вредных веществ при сжигании метана, забалластированного азотом, с изменением их объемных соотношений при различных коэффициентах избытка и фиксированном расходе воздуха на диффузионном и гомогенном режимах горения.

Для проведения экспериментов по горению и эмиссии NO_x и CO при сжигании балластных газов была разработана установка. Схема стенда изображена на рис. 1.

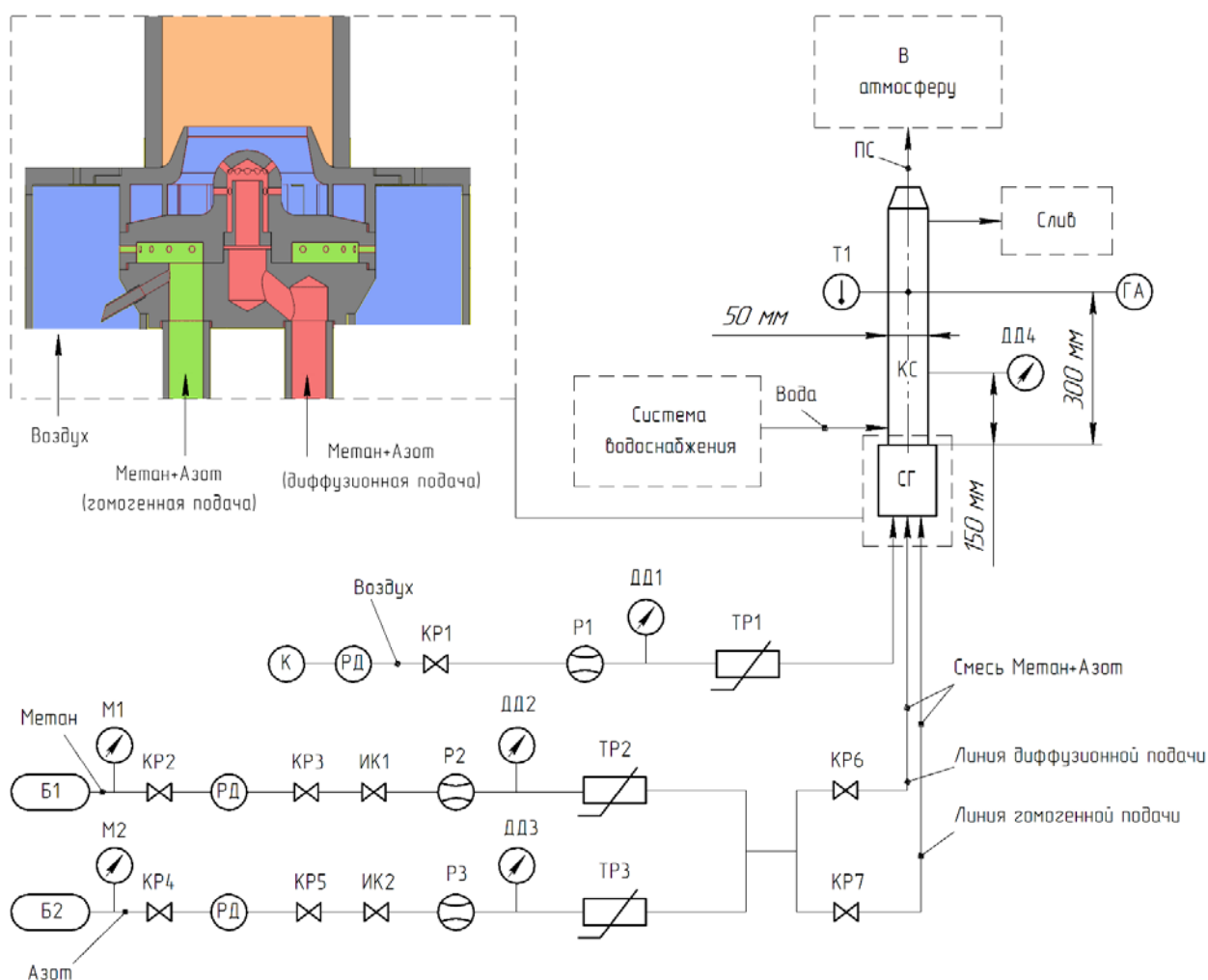


Рис. 1 – Схема стенда

Воздух подавался из ресивера компрессора К через редуктор РД и фильтр в воздушный коллектор смесительной головки. Метан хранился в жидком состоянии в баллоне Б1 под

давлением 200 атм. Азот в газообразном состоянии в баллоне Б2 под давлением 150 атм. На выходе из баллонов были установлены редукторы. Метан и азот по своим линиям подавались в тройник, который являлся для них смесителем. Получившаяся смесь подавалась в смесительную головку по одной из двух линий – диффузионной или гомогенной. По линиям метана, азота и воздуха были установлены краны КР1, КР3 и КР5 для грубой регулировки подачи, массовые тепловые расходомеры Р1, Р2 и Р3, терморезисторы ТР1, ТР2 и ТР3 и датчики давления ДД1, ДД2, ДД3. Дополнительно по линиям метана и азота были установлены игольчатые краны ИК1 и ИК2 для тонкой регулировки их подачи.

В камере сгорания были установлены датчик давления ДД4, высокотемпературная вольфрам-рениевая термопара Т1 и отборник пробы для газоанализатора ГА. Датчик давления был установлен на расстоянии 150 мм, термопара и отборник на расстоянии 300 мм от форсуночной головки. Термопара в защитном керамическом колпаке была заглублена до оси камеры сгорания. Отбор пробы для газоанализатора также осуществлялся через керамическую трубку из центра камеры сгорания. Дополнительно по длине камеры сгорания с внешней стороны стенки были установлены три хромель-алюмелевые термопары. Для защиты стенок камеры от перегрева применялось наружное проточное водяное охлаждение.

Характеристики датчиков были подобраны в соответствии с планом эксперимента. Он включал изменение объемной доли метана в смеси метан-азот от 100 до 20 % об. с шагом 20 % об и для каждого состава изменение коэффициента избытка воздуха в диапазоне от 1 до 7 с шагом 1 для диффузионного и гомогенного режимов подачи смеси в камеру сгорания.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты экспериментов

№	СН ₄ в горючей смеси	α	Q_B	Q_{CH_4}	Q_{N_2}	T_{KC}	P_{KC}	CO	NOx
	% об.	—	л/мин	л/мин	л/мин	К	Па	ppm	ppm
Диффузионный режим подачи ТВС в КС									
1	100	0.88	172.69	19.28	0.00	1278.8	107212	1494	38.78
2	100	1.68	168.35	9.80	0.00	799.8	108485	1627	1.66
3	100	2.75	168.42	6.00	0.00	531.9	108048	1263	0.72
4	100	3.74	167.85	4.39	0.00	431.4	108481	1029	0.48
5	81	0.81	160.70	19.52	4.52	1277.0	105650	1425	32.70
6	80	1.68	160.31	9.34	2.38	747.6	106688	1778	0.89
7	81	2.63	159.53	5.95	1.37	519.0	106629	1322	0.43
8	75	3.35	158.20	4.63	1.54	427.0	105524	1201	0.27
9	59	0.89	171.81	18.94	13.39	1256.7	106076	935	20.33
10	60	1.96	174.32	8.72	5.76	612.3	106527	1693	0.39
11	61	2.91	176.23	5.95	3.73	453.7	106517	1442	0.18
12	39	0.91	172.12	18.50	28.65	1231.9	105213	705	10.56
13	40	1.97	174.68	8.71	12.97	506.1	106519	1717	0.23
14	20	0.94	175.19	18.21	74.13	890.6	106280	1555	0.72
Гомогенный режим подачи ТВС к КС									
15	100	0.90	175.39	19.18	0.00	1206.7	104418	1861	20.67
16	81	0.91	170.55	18.49	4.25	1194.3	102840	1158	11.91
17	59	0.92	170.13	18.06	12.69	1239.8	103879	1244	4.79

Видно, что температура в области измерения значительно ниже, чем в аналогичных экспериментах других авторов для чистого метана [4]. Это можно объяснить не завершенностью реакций в области измерения, охлаждением стенок, отсутствием теплоизоляции камеры. С увеличением коэффициента избытка воздуха наблюдается

значительное падение температуры пламени и как следствие выхода NO_x. С этим также связан дальнейший срыв пламени, при уменьшении температуры ниже 400-450 К на всех режимах. Эмиссия СО имеет пик в районе коэффициента избытка воздуха от 1 до 2. При увеличении коэффициента избытка воздуха выше 2 эмиссия СО уменьшается.

Разбавление метана азотом приводит к уменьшению выхода NO_x. Стоит заметить, что температура пламени при коэффициенте избытка воздуха близком к единице падает незначительно, тогда как выход NO_x уменьшается почти в 2 раза для смеси метан-азот 60/40 по сравнению с чистым метаном. Выход СО при коэффициентах избытка воздуха близких к единице уменьшается с добавлением азота, однако при увеличении избытка воздуха выше пиковых значений СО – увеличивается на 5-10 %.

На гомогенном режиме подачи ТВС в камеру не удалось получить подробных результатов, т.к. при увеличении коэффициента избытка воздуха выше 1.5-1.8 для всех составов наблюдался срыв пламени, даже для чистого метана. Это может быть связано с особенностями смесительной головки, плохо подходящей для низких расходов. Также это говорит о узком диапазоне устойчивого горения при гомогенной подаче ТВС в камеру. По результатам видно, что на гомогенном режиме по сравнению с диффузионным выход NO_x значительно уменьшается, выход СО либо возрастает, либо практически не меняется. Температура уменьшается на 1-6 %.

Полученные результаты можно использовать для верификации численной модели, а также для идентификации инженерных моделей выхода вредных веществ при наличии в горючем газе балласта.

Список литературы

1. Rizk N.K., Mongia H.C. Semianalytical Correlations for NO_x, CO, and UHC Emissions // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1992. Vol. 115, Issue 3. <https://doi.org/10.1115/1.2906750>
2. Zhao Q., Wang G., Zhang H., Xu Y., Yang S. Estimation of NO_x emissions from the combustion chamber of heavy-duty gas turbines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 657. 012004. 10.1088/1755-1315/657/1/012004.
3. Мингазов, Б.Г. Процессы горения и Автоматизированное проектирование камер сгорания ГТД и ГТУ: учеб. / Б.Г. Мингазов, Ю.Б. Александров, А.В. Костерин, Ю.В. Токмовцев. изд-во КНИТУ - КАИ, Казань, 2015. – 160 с.
4. Zhang C., Hu G., Liao S., Cheng Q., Xiang C., Yuan C. Comparative study on the effects of nitrogen and carbon dioxide on methane/air flames // Energy. 2016. Vol. 106. PP. 431-442. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.087>.
- 5.

EXPERIMENTAL STUDIES OF VARIOUS COMBUSTION MODES OF A MIXTURE OF METHANE AND NITROGEN WITH AIR

Matyunin O.O.¹, Bachev N.L.¹, Shilova A.A.¹, Bulbovich R.V.¹

¹Perm national research polytechnic university, Perm

This paper presents the results of an experimental study of combustion of a methane-nitrogen mixture with air in diffusion and premixed flames. It is shown that in the diffusion flame with an excess air coefficient equal to 1, an increase in the volume fraction of nitrogen in methane leads to a decrease in the yield of nitrogen oxides NO_x and carbon oxides CO. An increase in the excess air coefficient leads to a drop in the yield of NO_x. The yield of CO has a maximum in excess air coefficients range from 1 to 2. Preliminary mixing of combustible gas with air for all compositions helps to reduce the yield of harmful substances, but combustion becomes less stable. In the experiments conducted, premixed flame breakdown for all compositions was observed already at excess air coefficients greater than 2. The obtained results can be used to verify the numerical model, as well as to identify engineering models of the release of harmful substances in the presence of ballast in the combustible gas.