

К ВОПРОСУ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК NO_x ФРОНТОВЫХ УСТРОЙСТВ КАМЕР СГОРАНИЯ

Д.П. ТКАЧЕНКО

В статье представлены результаты экспериментального исследования эмиссионных характеристик NO_x сложного модельного фронтowego устройства, в котором удалось разделить процесс горения на диффузионное и гомогенное.

Введение

Камера сгорания является одним из основных узлов ГТД и ее надежность, токсичность и экономичность практически полностью определяют показатели двигателя. Традиционные камеры сгорания ГТД с центробежными форсунками подошли к пределу своего совершенствования, и жестко накладываемые современные требования к камерам привели к поиску новых принципов организации горения жидкого топлива.

Предотвращение загрязнения окружающей среды токсичными компонентами, образующимися при сжигании углеводородных топлив, является в настоящий момент приоритетной задачей при создании и модернизации газотурбинных двигателей (ГТД).

В настоящее время совершенство конструкции камеры сгорания ГТД оценивается, главным образом, по содержанию вредных веществ в отработавших газах на выходе из двигателя. Как в нашей стране, так и за рубежом большое количество работ посвящено проблеме снижения вредных выбросов ГТД. При этом основное внимание уделяется эмиссии окислов азота.

Рассматривая практические методы снижения выбросов загрязняющих веществ, концентрируем внимание на отдельных составляющих этих выбросов. Конструкция камеры сгорания выбирается в результате целого ряда компромиссов, и не только между той или иной составляющей выбросов, но и между требованиями к различным характеристикам, таким, как устойчивость горения и размеры камеры. Задача снижения выбросов загрязняющих веществ потребовала нового подхода к конструированию фронтowych устройств камер сгорания, и в настоящее время разрабатывается уже ряд перспективных схем.

В данной работе представлены результаты сложного модельного фронтowego устройства.

Экспериментальный стенд

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого представлена на рис. 1.

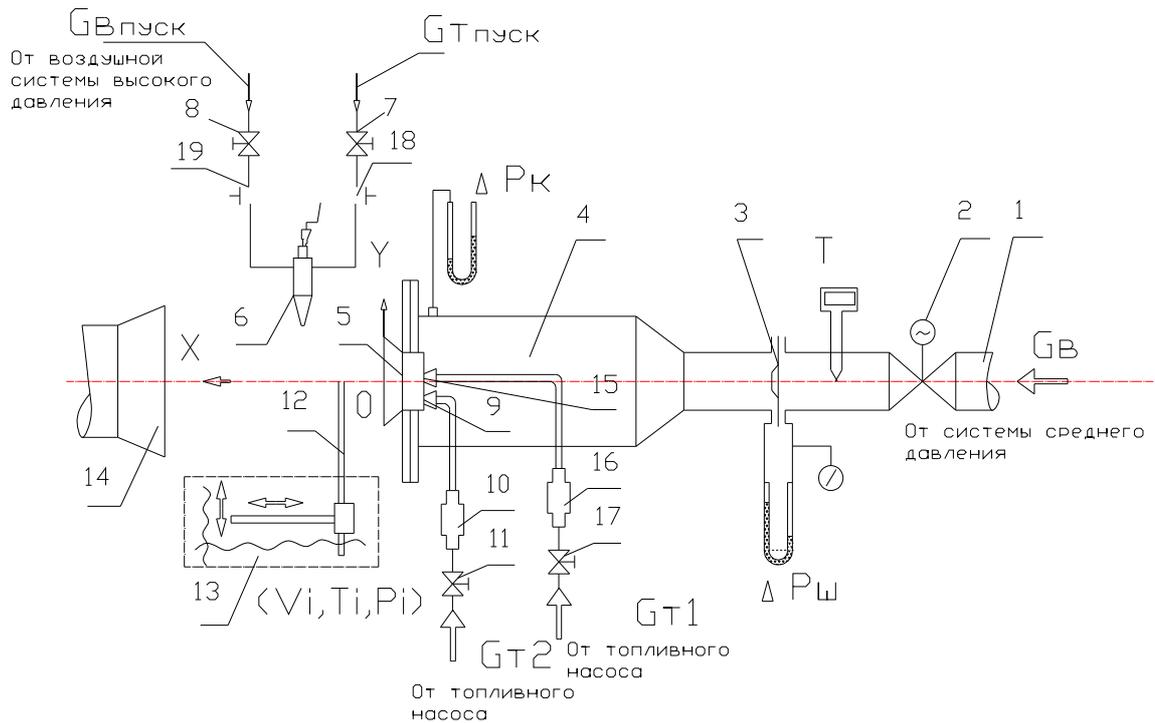


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – воздушная магистраль; 2 – входная заслонка с электроприводом; 3 – мерная шайба; 4 – ресивер; 5 – исследуемая горелка; 6 – пусковой воспламенитель; 7 – кран подачи пускового топлива; 8 – кран подачи пускового воздуха; 9 – струйная топливная форсунка второго контура исследуемого ФУ; 10 – топливный расходомер второго контура; 11 – дозирующий топливный кран второго контура; 12 – пробоотборник газоанализатора; 13 – координатник; 14 – канал шумоглушения; 15 – топливная осевая центробежная форсунка первого контура; 16 – топливный расходомер первого контура; 17 – дозирующий топливный кран первого контура; 18 – 19 электроклапаны

Для проведения холодных продувок и горячих запусков использовалась штатная система подачи воздуха низкого давления, которая обеспечивала подачу воздуха на стенд через воздушную магистраль 1, обеспечивая давление на входе в установку до 5 кг/см^2 и расход воздуха до 4 кг/с . Регулировка расхода воздуха осуществлялась входной заслонкой с электроприводом 2. После заслонки воздух подводится к мерной шайбе 3, диаметром 59 мм, на которой производится замер перепада давления для дальнейшего расчета фактического расхода воздуха. Перепад измерялся с помощью водяного пьезометра, установленного в аппаратной. Для определения температуры воздуха, поступающего на стенд, в магистрали за входной заслонкой установлена термопара ТПР 0392 – 01 – 400 с диапазоном измерения температуры от 0 до $1600 \text{ }^\circ\text{C}$, далее воздух поступает в ресивер 4, на выходном фланце которого установлена исследуемая вихревая горелка 5. Конструкция фланца выполнена таким образом, чтобы была возможность быстрой смены фронтального устройства (ФУ). После выхода из ФУ газ (воздух) попадает в отводной канал шумоглушения 14.

В качестве топлив при проведении экспериментов, как в основной системе так и в системе поджига, использовался авиационный керосин марки ТС-1.

Исследование концентрации вредных выбросов проводилось с помощью прибора ЭКОМ. Газоанализатор ЭКОМ предназначен для определения химического состава газа и определения концентраций таких продуктов процесса горения, как CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2 , наличия сажи и т.д., а так же температуры. Газоанализатор имеет специальное оборудование для определения концентраций NO , NO_2 и NO_x , которое включает в себя датчик NO , датчик NO_2 . Количество NO_x определяется как сумма NO и NO_2 . Концентрация NO_x может вычисляться в различных размерностях:

$$NO_x (ppm) = NO(ppm) + NO_2(ppm),$$

$$NO_x (мг/м^3) = (NO(ppm) + NO_2(ppm)) \times 2,056.$$

Отбор проб осуществляется с помощью точечного отборника, по специальному шлангу, в котором происходит охлаждение потока для предотвращения продолжения реакций, отобранная проба подается в прибор, где происходит осушение и определение химического состава газа. Принцип работы прибора – электрохимический. Максимальная температура, которая может быть измерена с использованием конкретного пробоотборника, составляет $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В процессе проведения экспериментов измерялись расходы воздуха и топлива, перепад давлений на исследуемой горелке, поля осевых скоростей, распределение скоростных напоров, давлений, поля температур при горении. Измерение скоростей и давлений проводились с помощью специального насадка полного напора. Измерение температур при горении осуществлялось с помощью термопар. Перепады давлений регистрировались водяными пьезометрами.

Исследуемые фронтные устройства

В эксперименте исследовались два типа фронтных устройств. Фронтное устройство №1 с противоположным направлением вращения воздушных потоков (рис. 2). Устройство имеет двухконтурный подвод воздуха и два контура подачи топлива. Воздух в камеру сгорания подается через внутренний лопаточный завихритель (первый контур); второй контур представляет собой лопаточный завихритель с противоположным направлением вращения воздуха относительно первого контура. Топливо подается через осевую центробежную форсунку в первый контур и осевую струйную форсунку во второй контур.

Устройство № 1 имеет два завихрителя противоположного вращения. В нем не удалось получить двух отдельных зон горения, т.к. при течении образуется одна мощная зона обратных токов, вследствие чего не происходит разделение процесса горения.

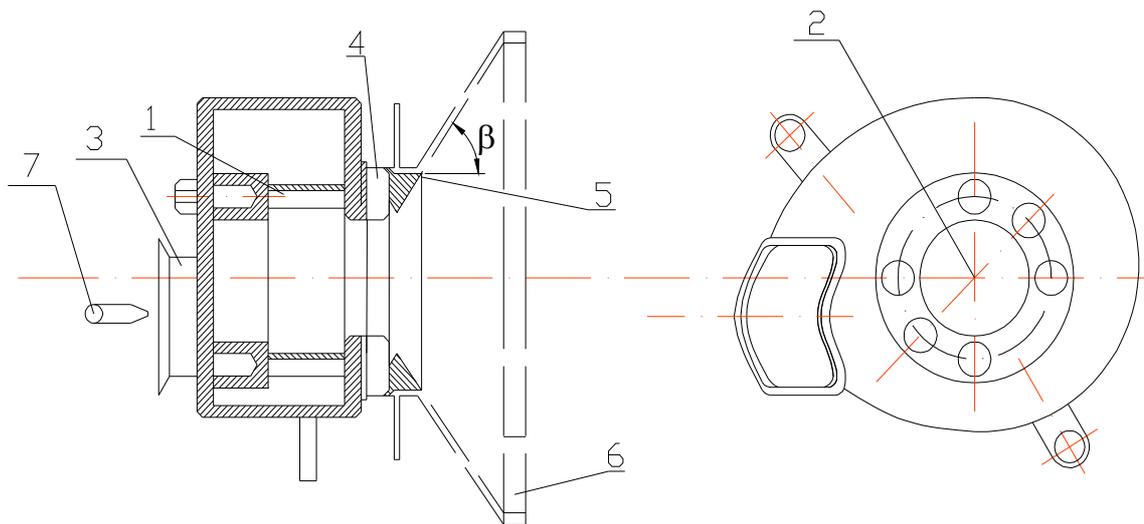


Рис. 3. Схема фронтального устройства № 1:

- 1 – воздушный завихритель центральной зоны; 2 – центробежная топливная форсунка первого контура;
 3 – воздухозаборник центральной зоны; 4 – воздушный завихритель второго контура; 5 – конический насадок;
 6 – цилиндрический насадок; 7 – струйная топливная форсунка второго контура

В процессе экспериментов были проведены замеры поля температур и определение наличия в следе за горелкой вредных выбросов, а именно NO_x замеренные в сечениях 50, 100, 160, 280 мм от среза ФУ по его оси и в сечениях 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80 мм от оси фронтального устройства в радиальном направлении. Всего было произведено 28 замеров в потоке за фронтальным устройством.

Исследования проводились при суммарном расходе воздуха $G_v = 0,38 \pm 0,02$ кг/с и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,5 - 2,5$.

В результате анализа схем перспективных фронтальных устройств было разработано сложное ФУ № 2. Принципиальная схема модельного фронтального устройства № 2 представлена на рис. 3. На рис. 4 показано ФУ № 2а с модельной жаровой трубой. Данное фронтальное устройство состоит из двух контуров подвода воздуха и топлива.

Внутренний контур (рис. 3) состоит из воздушного канала 1, топливного трубопровода 2, осевой центробежной форсунки 3, лопаточного завихрителя 4, в котором направление вращения воздуха противоположно вращению топлива. Внешний контур (рис. 4) состоит из воздушного канала 1, топливного коллектора второго контура со струйными форсунками 2, набора внешних пластин с фрезеровкой 3, набора внутренних пластин с фрезеровкой 4, диафрагмы 5 для изменения расхода воздуха через второй контур.

Фронтальное устройство № 2 испытывалось в двух конфигурациях: в первом случае горение проходило в открытом потоке за фронтальным устройством № 2 (рис. 3), во втором - № 2а, с целью исключения подмешивания воздуха их окружающего пространства, на срез фронтального устройства устанавливалась модельная жаровая труба, длиной 280 мм с выходным сечением, диаметром 75 мм (рис. 4). Принцип работы предложенного фронтального устройства заключается

в следующем. Воздух, поступающий в первый (внутренний) контур через лопаточный завихритель, подается в центральную зону, в которую через осевую центробежную форсунку подается топливо первичной (дежурной) зоны, необходимое для работы на пониженных режимах и для обеспечения поджога основного топлива при переходе на повышенные режимы. Закрутка воздушного потока первичной зоны имеет противоположное направление относительно закрутки топлива в центробежной топливной форсунке. Это способствует лучшему смесеобразованию и облегчает запуск.

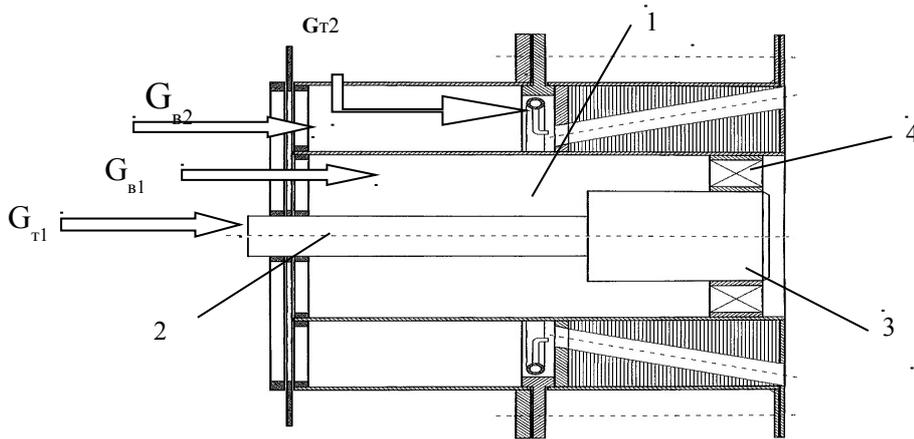


Рис. 3. Исследуемое фронтное устройство (ФУ №2)

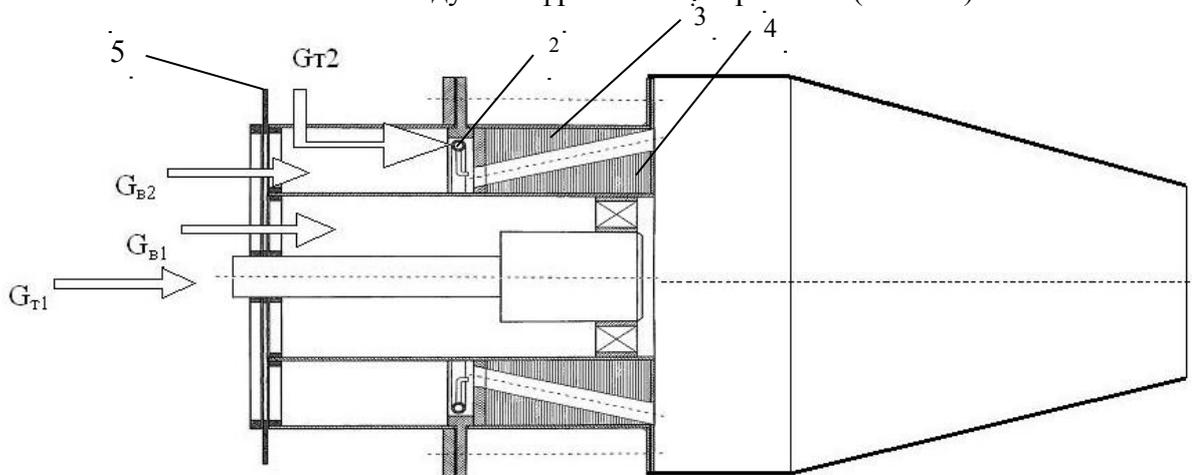


Рис. 4. Исследуемое фронтное устройство (ФУ № 2а) с модельной жаровой трубой

Внешний контур выполнен по следующей схеме. Воздух в осевом направлении попадает во второй (внешний) контур ФУ, который представляет собой 44 канала, диаметром 10 мм, 22 из которых расположены во внешнем и 22 во внутреннем корпусах ФУ. Каналы в корпусах расположены под углом 30° к оси ФУ. Кроме того, имеется возможность изменять угол положения каналов относительно друг друга (угол выхода потока). Неизменным остается тот факт, что верхний и нижний каналы всегда пересекаются независимо от угла их взаимного расположения. Геометрические размеры воздушного тракта ФУ выполнены так, что при полном

открытии диафрагмы обеспечивают соотношение расходов воздуха между контурами, равное 0,4.

Конструкцией ФУ была предусмотрена возможность изменения угла выхода из каналов второго контура, как из внешнего корпуса, так и из внутреннего, не зависимо друг от друга. Изменять угол выхода возможно в пределах от 0 до 40° относительно оси исходного канала.

Для обеспечения возможности проведения необходимых замеров на расстоянии 50, 100, 160 мм от среза ФУ в модельной жаровой трубе были выполнены отверстия для доступа пробоотборника.

Результаты проведенных экспериментальных исследований

В результате проведенных экспериментов были получены данные по выделению NO_x в следе за исследуемыми фронтowymi устройствами. Исследования проводились примерно на одном режиме и замеры выполнялись в одинаковых сечениях 50, 100, 160 и 280 мм от среза фронтowego устройства. Данные, полученные в результате проведенных работ, представлены в таблицах 1, 2, 3.

Параметры газового потока за ФУ № 1 при $G_b = 0,40$ кг/с

Таблица 1

Радиальное расстояние, мм	Температура $t_{г}^*$, °С				Значения NO_x , ppm			
	Осевое расстояние от ФУ, мм				Осевое расстояние от ФУ, мм			
	50	100	160	280	50	100	160	280
0	450	880	1000	800	6	30	48	54
10	550	860	970	790	14	24	38	48
20	700	950	950	750	18	26	30	41
30	750 1150	1000	740	22	28	31	38	
40	1000	1300	960	700	24	34	34	34
50	1300	1260	300	610	28	36	36	30
60	1200	1100	750	500	14	32	28	24
70	750	760	500	300	0	18	19	18
80	250	250	300	150	0	0	4	8

Параметры газового потока за ФУ № 2 при $G_b = 0,40$ кг/с

Таблица 2

Радиальное расстояние, мм	Температура t^*_r , °C				Значения NO_x , ppm			
	Осевое расстояние от ФУ, мм				Осевое расстояние от ФУ, мм			
	50	100	160	280	50	100	160	280
0	460	900	1200	900	2	11	25	18
10	400	870	1250	950	5	11	22	18
20	410	940	1300	1050	6	14	19	20
30 145	1000	1400	1100	9	15	16	24	
40	750	1050	1450	1100	14	19	14	23
50	1150	1500	1300	1000	20	21	7	19
60	1200	1460	1100	860	22	12	2	17
70	400	1000	800	600	9	5	1	5
80	300	550	550	400	4	3	1	1

Параметры газового потока за ФУ № 2 а при $G_b = 0,40$ кг/с

Таблица 3

ммрасстояние, Радиальное	Температура t^*_r , °C				Значения NO_x , ppm			
	Осевое расстояние от ФУ, мм				Осевое расстояние от ФУ, мм			
	50	100	160	280	50	100	160	280
0	1000	1300	1500	1400	1	6	20	23
10	1100	1350	1700	1450	4	9	18	21
20	1200	1500	1800	1400	8	16	16 20	
30	1250	1700	1750	1200	11	18	11	15
40	1300	1700	1600	-	15	17	6	-
50	1500	1500	1200	-	20	10	3	-
60	1700	1100	-	-	18	10	-	-
70	1300	-	-	-	10	19	-	-
80	1100	-	-	-	5	-	-	-

Из представленных данных видно, что максимальное количество NO_x получается в зоне повышенных температур на границе зоны обратных токов.

Полученные результаты говорят о том, что при использовании ФУ конструкции, аналогичной исследуемой, можно получить уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу по сравнению с ныне существующими ФУ на фоне сохранения высоких средних температур. По сравнению с ФУ № 1 уменьшение вредных выбросов NO_x на исследуемых режимах составило примерно 15 - 25%.

Использование в новом фронтном устройстве расширяющихся, пересекающихся конических каналов воздушного тракта второго контура способствует улучшению смесеобразования за счет интенсивной турбулизации внутри каналов, что приводит к более мелкому дроблению капель топлива и подачи в зону горения подготовленной и подогретой топливовоздушной смеси.

В ФУ № 2 зона обратных токов образуется в центральной зоне и имеет небольшие размеры вследствие того, что расходы воздуха и топлива через внутренний контур малы по сравнению с внешним контуром. Малая зона обратных токов в районе центрального завихрителя обеспечивает поддержание пламени на малых режимах и служит источником тепла для поджога подготовленной топливовоздушной смеси, поступающей из второго контура, основная часть топливовоздушной смеси горит во втором контуре при $\alpha \approx 2$ с более низкой температурой, что способствует уменьшению NO_x .

В качестве примера на рис. 5 – 10 приведены результаты ряда экспериментов.

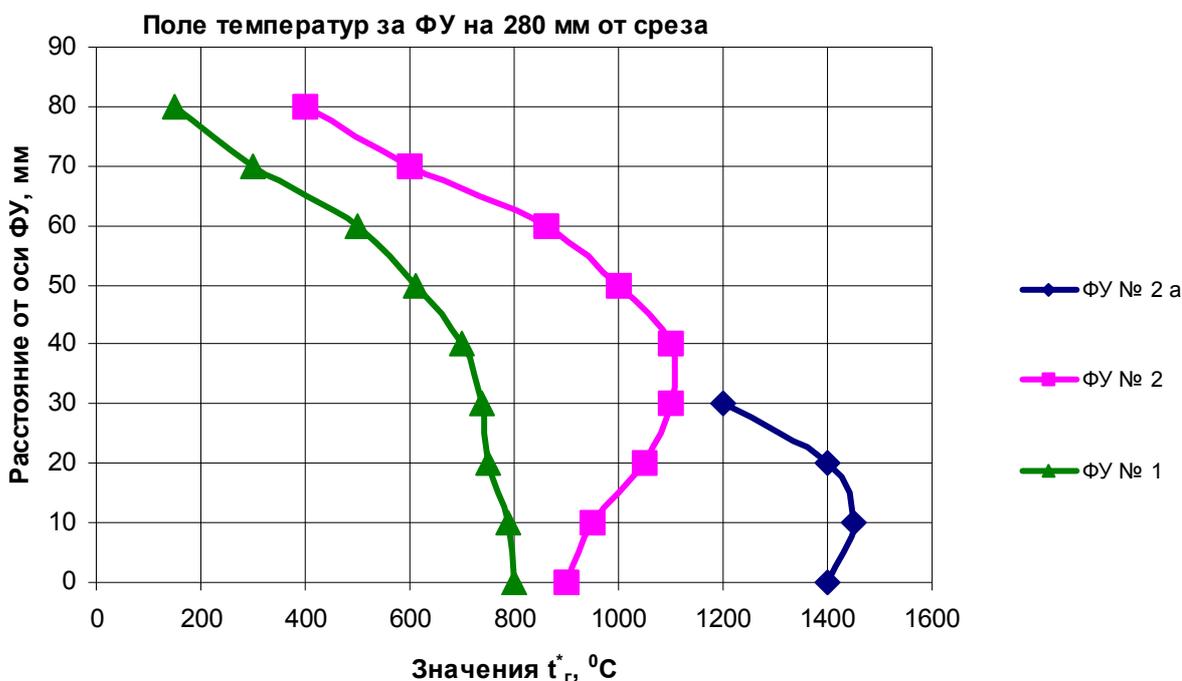


Рис. 5

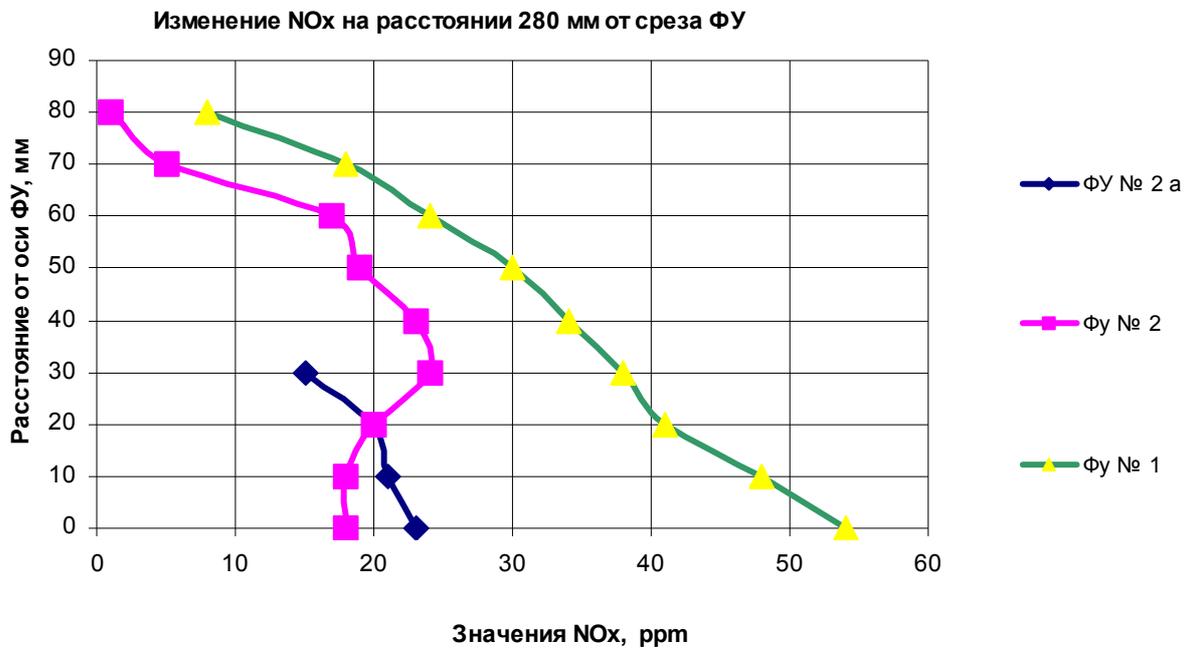


Рис. 6

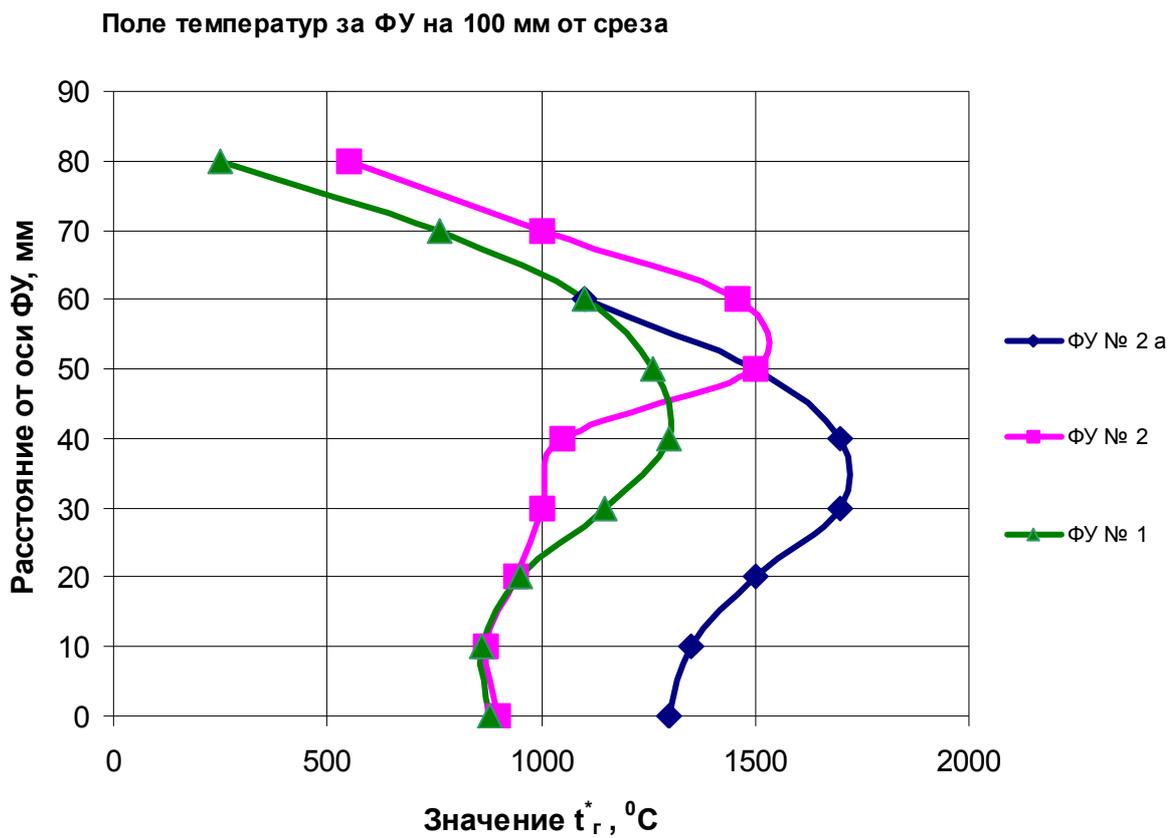


Рис. 7

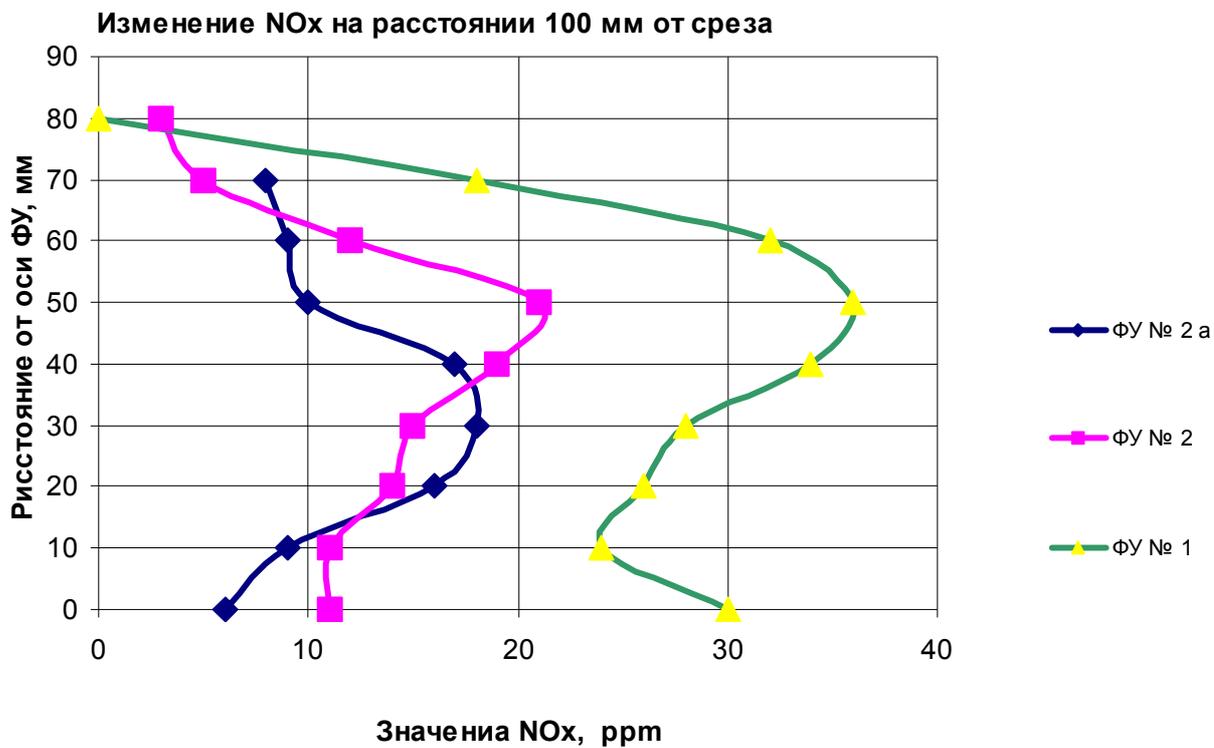


Рис. 8

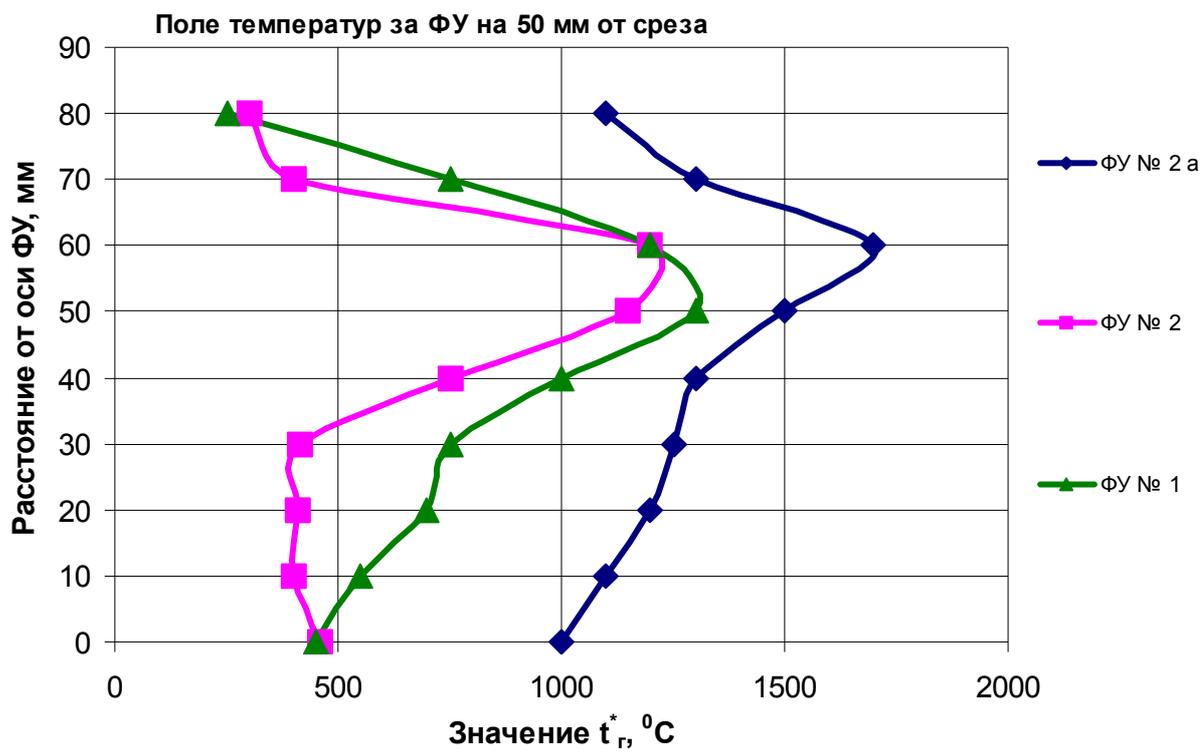
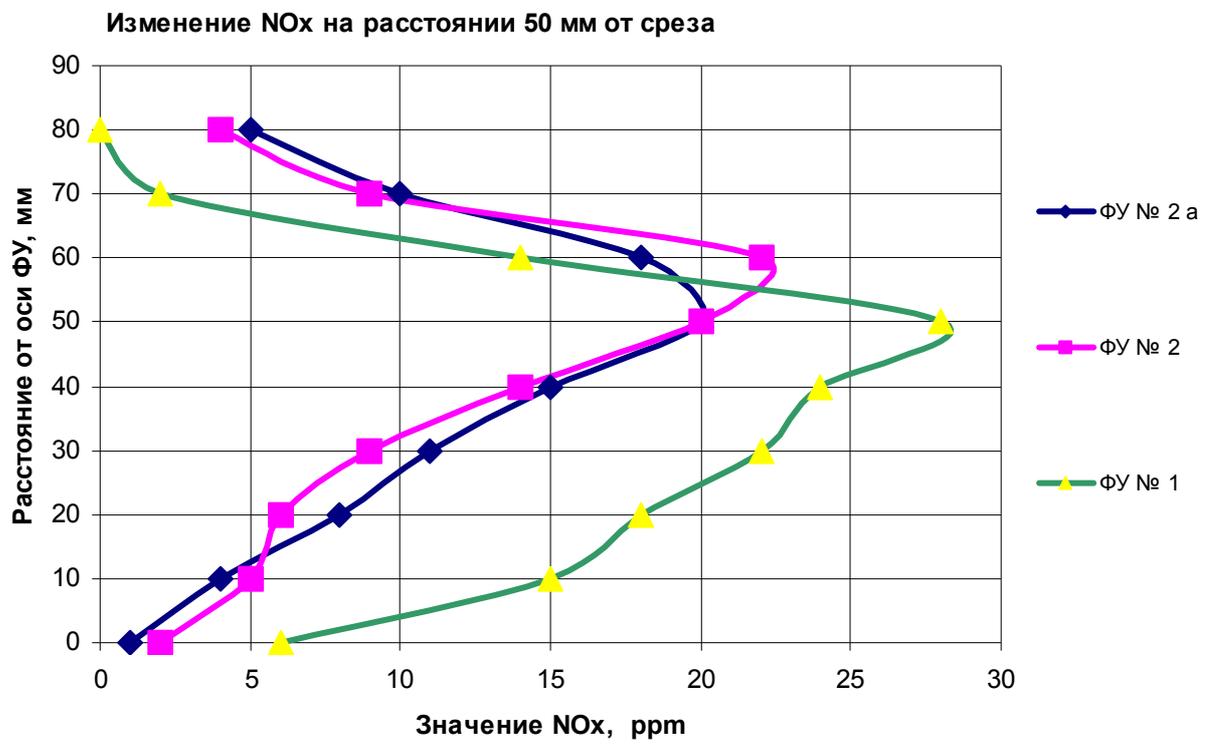


Рис. 9



- В работе предложена новая схема фронтального устройства для камер сгорания воздушно-реактивных двигателей, которое обеспечивает снижение выбросов NO_x .
- Выполнен анализ экспериментальных данных фронтальных устройств (ФУ), полученных при испытаниях двух типов фронтальных устройств: ФУ № 1 (с противоположным направлением вихревого вращения воздушных потоков первого и второго контуров), и разработанного ФУ № 2 (с кинетической (двухзонной) схемой сжигания топлива во втором контуре), которое испытывалось в двух конфигурациях (с модельной жаровой трубой и без неё).
- Проведены сравнения выделения NO_x в следе за рассмотренными фронтальными устройствами на одинаковых режимах работы. Анализ показал, что при работе ФУ № 1 происходит более интенсивное выделение NO_x (до 35 ppm), чем при работе ФУ № 2, за которым в центральной зоне есть область с выбросом NO_x до 25 ppm, а в наружной зоне при горении подготовленной гомогенной смеси выделение NO_x падает почти до 0 ppm, не смотря на то, что температура поддерживалась в пределах 1300 - 1600 °С.
- Результаты экспериментов дают возможность получить для разработанного типа ФУ выбросы вредных веществ меньше существующих норм ИКАО, т.е. при существующей норме по NO_x 50 ppm получено 25 - 35 ppm, что примерно на 30 – 50 % меньше нормы.

Литература

1. Кравченко И. В., Рутовский В. Б., Ткаченко Д. П. Экспериментальные исследования фронтальных устройств с двойными завихрителями для перспективных камер сгорания. //Тезисы докладов на XXVIII Академических чтениях по космонавтике. Москва, 2003, с. 346.
2. Ткаченко Д. П. Направление экспериментальных исследований по теории горения на кафедре 201, Булаева М. Н., Кравченко И. В., Рутовский В. Б., , Хохлов А. В. //Тематический сборник «Теория воздушно-реактивных двигателей и их элементов» МАИ. 2005, с. 168-173.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ТКАЧЕНКО Дмитрий Павлович, соискатель кафедры теории воздушно-реактивных двигателей Московского авиационного института (государственного технического университета).