



Всероссийский Теплотехнический Институт (ОАО «ВТИ»)



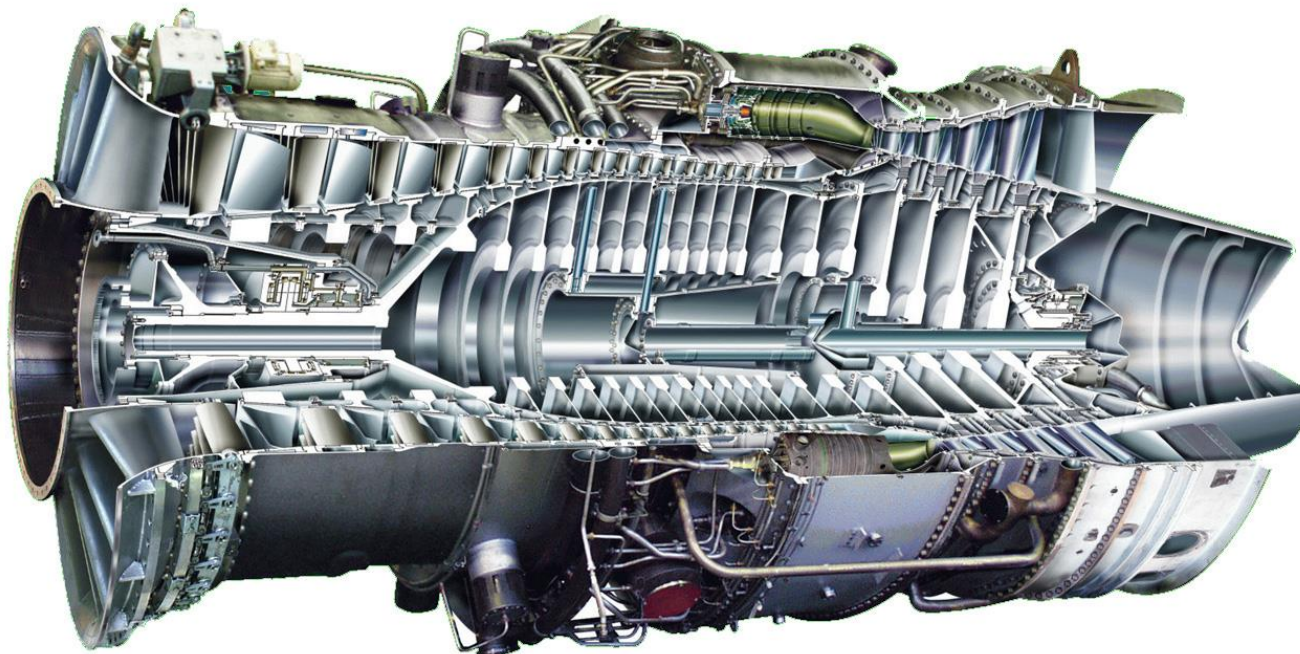
Создание малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС) ГТЭ-110М, результаты исследований по обеспечению работоспособности и проектных показателей по эмиссии NO_x

Группа исследований камер сгорания
Булысова Л.А., Васильев В.Д., Гутник М.Н.,
Гутник М.М., Берне А.Л., и др.

ОАО «ВТИ»
Москва 2015



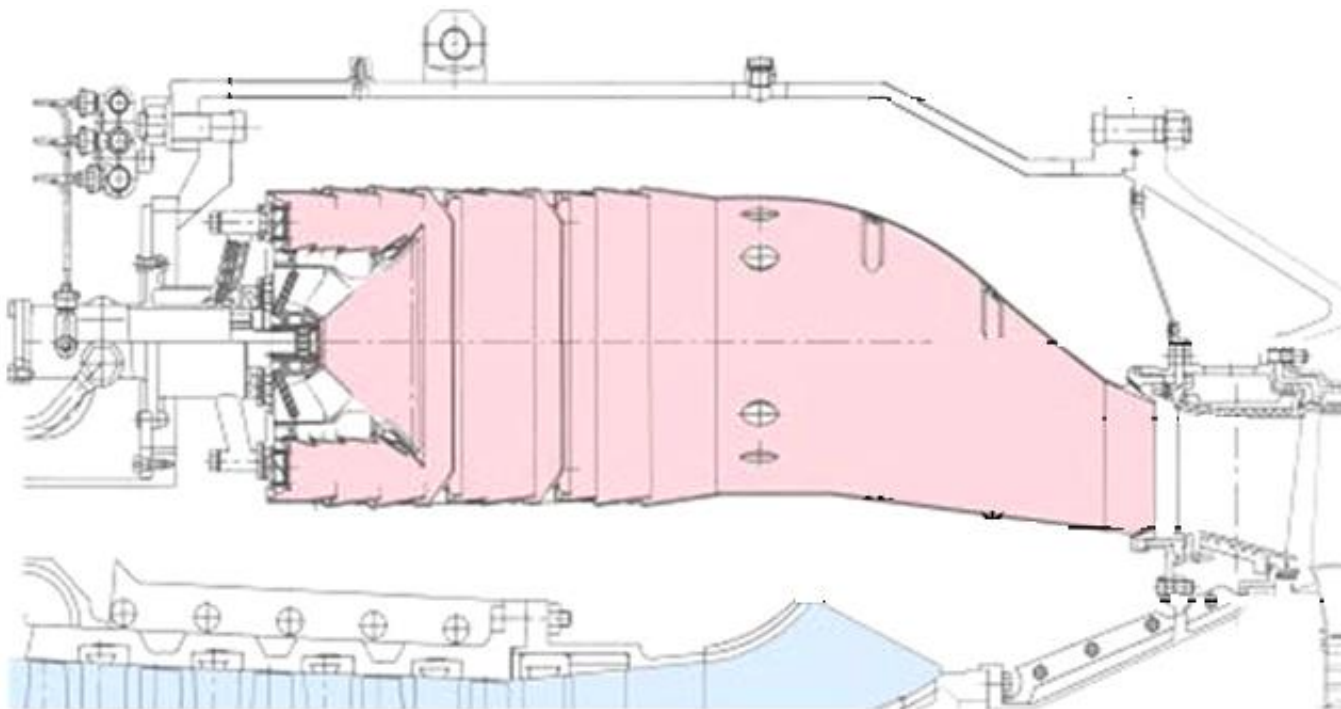
Энергетическая газотурбинная установка ГТЭ –110 (ОАО «НПО «Сатурн»)



N_e , МВт	$\eta_{\text{э}}$, %	P_k , кПа	T_k , К	$G_{\text{В ЖТ}}$, кг/с	$G_{\text{Т}}$, кг/ч	$\alpha_{\text{КС}}$	$T_{\text{Г}}$, К	T_4 , °С
110.0	35.5	1518.4	675.8	305.4	23189.0	2.738	1483.4	517.0



Штатная камера сгорания

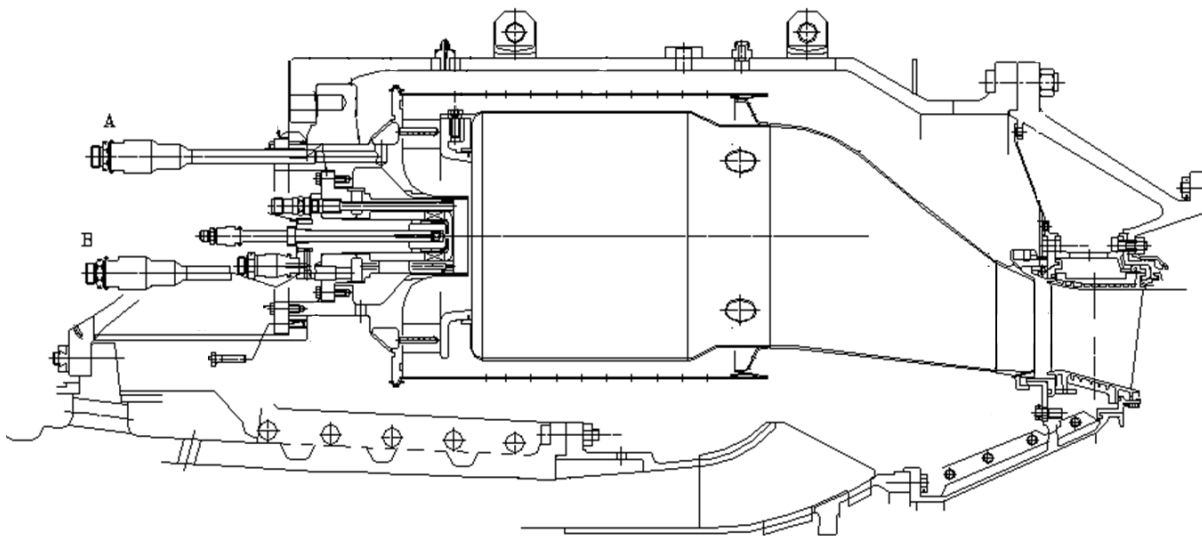
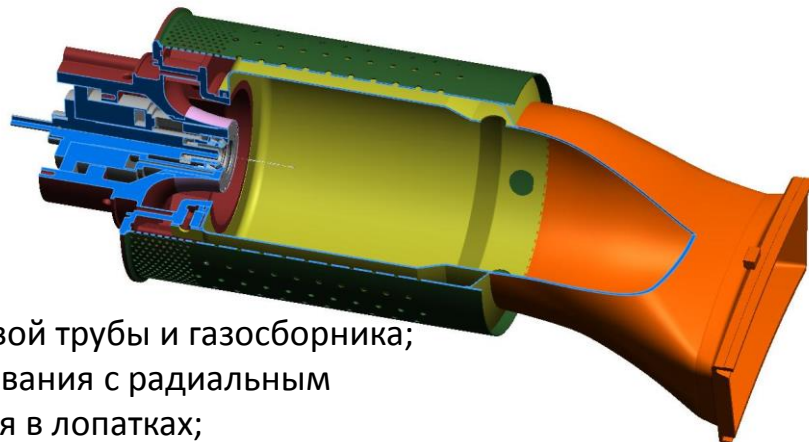


Работает в диффузионном режиме сжигания топлива



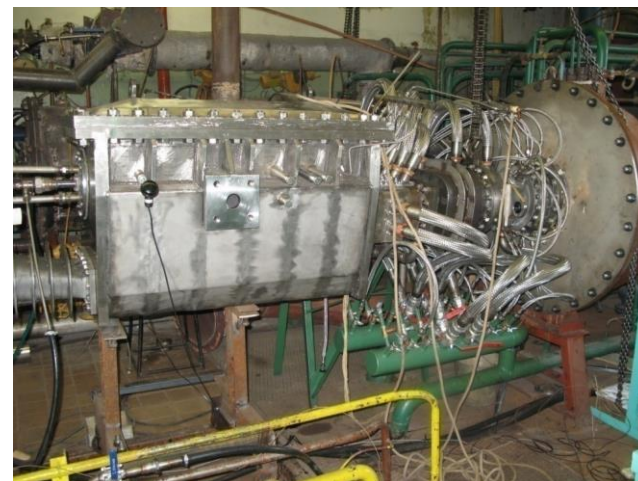
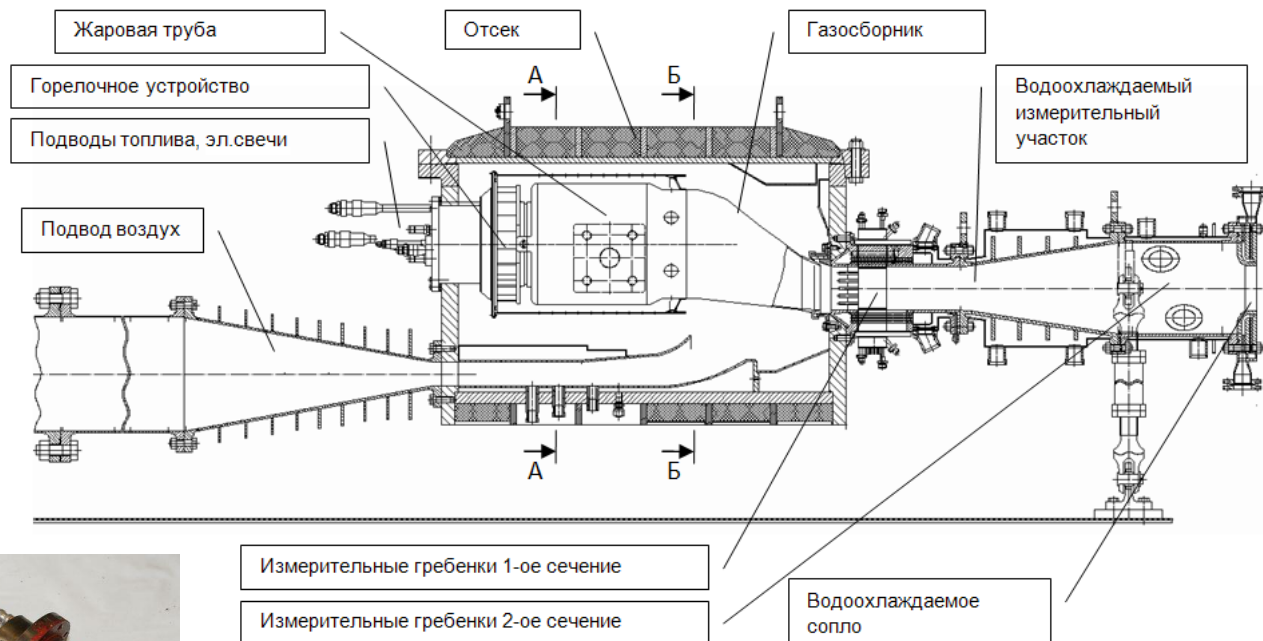
Концепция Unison создания МЭКС (DLN) ГТЭ-110

- Сохранение корпусов ГТД;
- Усовершенствованное охлаждение газосборника;
- Увеличенный диаметр камеры сгорания до 315 мм;
- Экран для импактного охлаждения жаровой трубы;
- Термобарьерное покрытие на внутренней стенке жаровой трубы и газосборника;
- Одна зона горения, канал предварительного перемешивания с радиальным завихрителем топлива и вводом топлива через отверстия в лопатках;
- Центральная диффузионная пилотная горелка;
- Объединение систем впрыска жидкого топлива и воды;
- Исключение пламяперебросных труб и системы розжига;
- Две эл. свечи в каждой жаровой трубе.





Общий вид экспериментальной установки





Испытания МЭКС и достигнутые результаты 2008-2009 гг.

Стенд/давление воздуха	Время проведения	Кол. испытаний	Результаты
ВТИ / 130 кПа	август - сентябрь 2008 г.	11	Отработаны режимы зажигания; Определены все характеристики МЭКС по ТЗ; Установлено полное их соответствие требованиям ТЗ.
ЦИАМ / 600-1500 кПа	ноябрь-февраль 2009 г.	5	Подтверждены условия устойчивого зажигания МЭКС; Выявлена неравномерность поля температуры газов на выходе из МЭКС при работе пилотной горелки с превышением максимальной локальной температуры (230 С на режиме XX) ; Подтверждено выравнивание поля температуры при подаче топлива в основную горелку.
ВТИ / 130 кПа	май - июнь 2009 г.	11	Проведена доводка МЭКС по улучшению показателя неравномерности температурного поля на выходе МЭКС; Определены все характеристики доработанной МЭКС по ТЗ.
ЦИАМ / 600-900 кПа	июль - август 2009 г.	3	Подтверждены результаты доводки МЭКС по выравниванию поля температуры при работе на пилотной горелке; Обнаружена граница устойчивого горения при совместной работе пилотной и основной горелок. Замеренные частоты пульсаций давления составили 3300-3600 Гц и 2300-2700 Гц; Установлено, что создание окружной неравномерности топливовоздушной смеси, созданной за счет разницы подачи топлива в каналы А и В, в пределах 10% - 40%, не позволяет расширить диапазон устойчивой работы МЭКС при переходе; Осуществлен вывод МЭКС на режим полной нагрузки $\alpha_{\text{КС}} \sim 2,74$ и давлении 600 кПа при подаче в пилотную горелку 33% топлива.



Стенд высокого давления ОАО «ВТИ»

Воздушный турбокомпрессор



Параметры:
Среда - воздух
 $P = 800 \text{ кПа}$
 $G = 8,05 \text{ кг/с}$

Дожимная компрессорная станция



Параметры:
Среда - природный газ
 $P = 1200 \text{ кПа}$
 $G = 600 \text{ кг/ч.}$

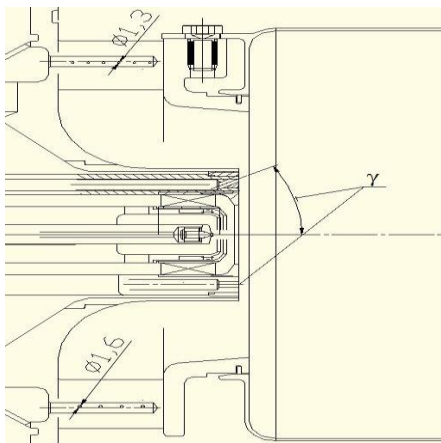


Диагностические испытания ВТИ/ 330-500 кПа март - июль 2014 г.

1. Подтверждена повторяемость результатов, полученных на давлениях 600-900 кПа (стенд ЦИАМ) и 330-500 кПа (стенд ВТИ)
2. Установлена возможность перехода с работы пилотной горелки на основную горелку при $Ne = 45\%$ на повышенном давлении
3. Установлена возможность работы на основной горелке на нагрузках от 45% до 100%
4. Проверено влияние на устойчивость горения :
 - граничных акустических условий;
 - направления топливных струй пилотной горелки;
 - изменение эпюры концентрации ТВС;
 - изменение закрутки потока.



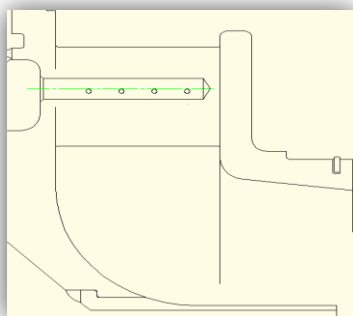
Изменение эпюры концентрации ТВС



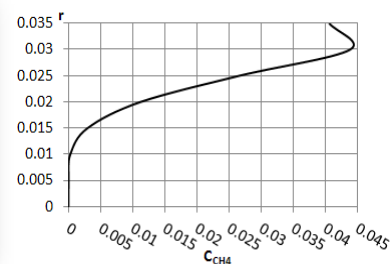
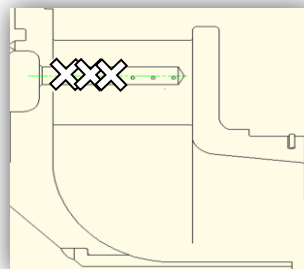
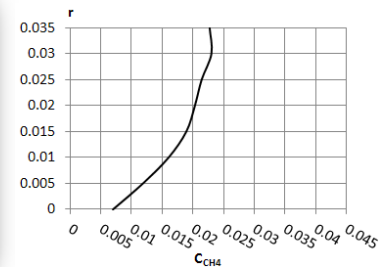
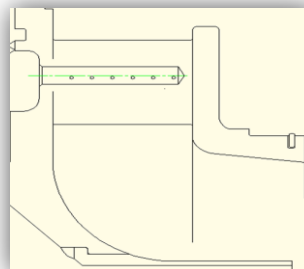
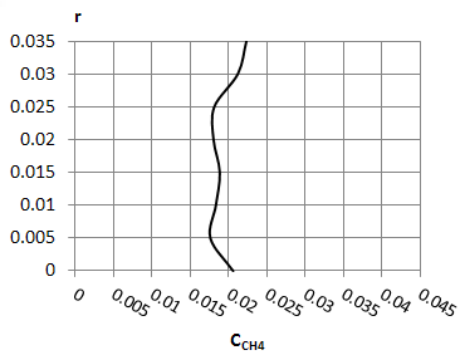
Вариант сборки

Эпюра концентрации ТВС,
полученная CFD-расчетом

Вариант сборки



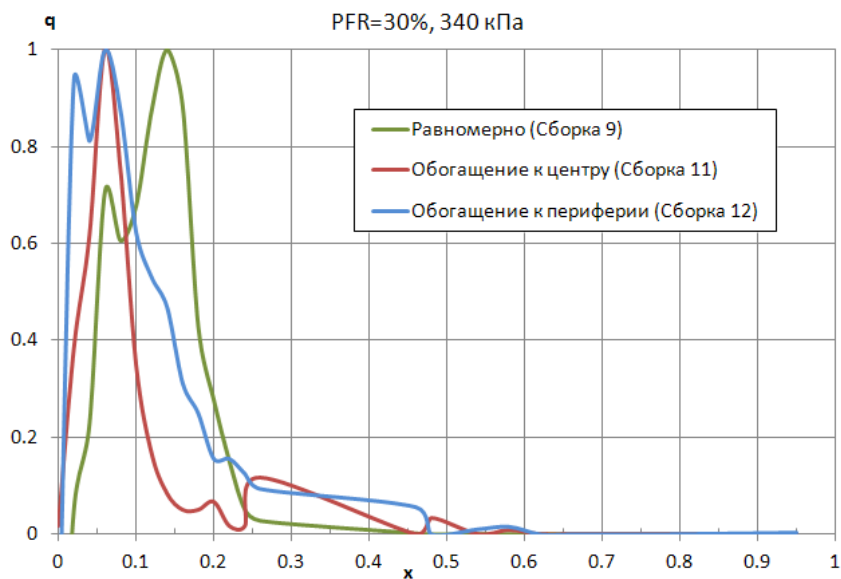
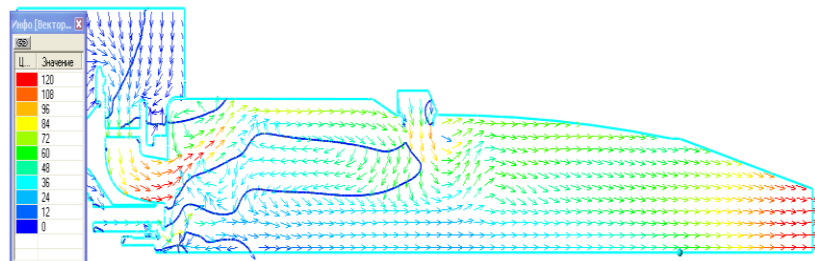
Эпюра концентрации ТВС,
полученная CFD-расчетом



Всего исследовано 8 вариантов раздачи топлива



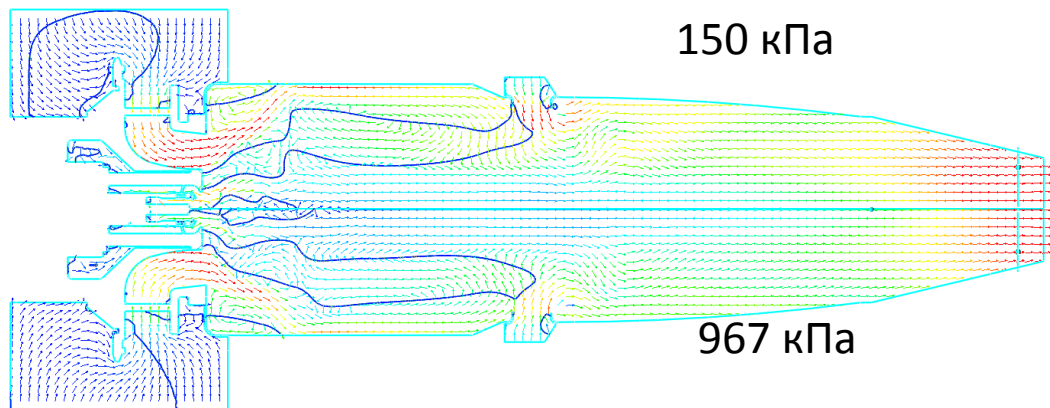
Воздействие на процесс горения



№ СБ	Изоповерхность концентрации горючего	РФР , %	Поле температуры в продольном сечении КС
9		30	
	Равномерно	0	
11		30	
	К центру	0	
12		30	
	К периферии	0	

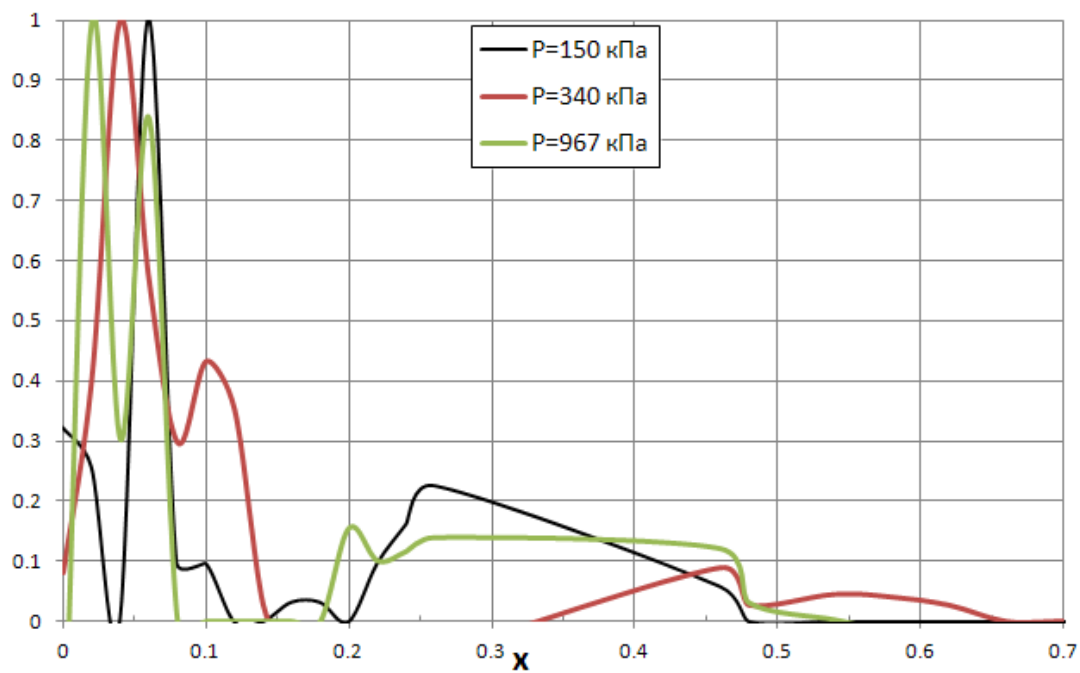


Влияние давления на процессы в КС



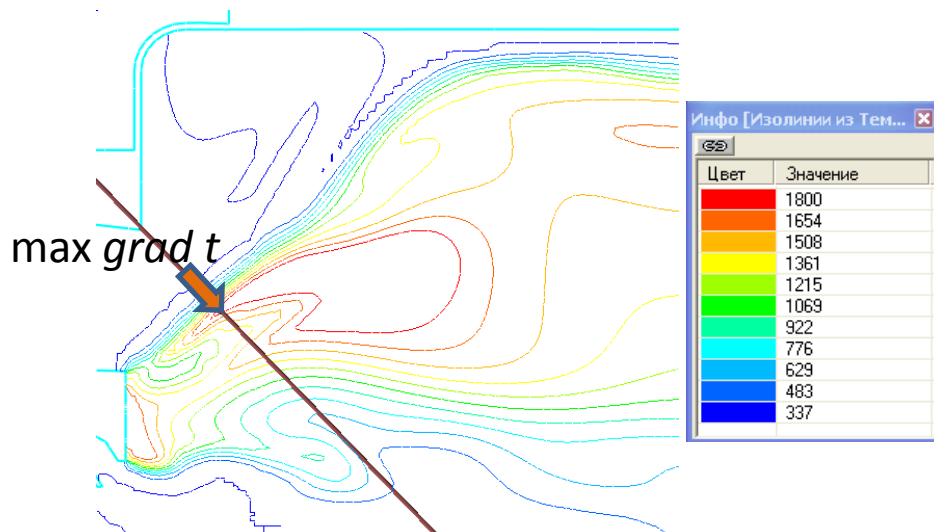
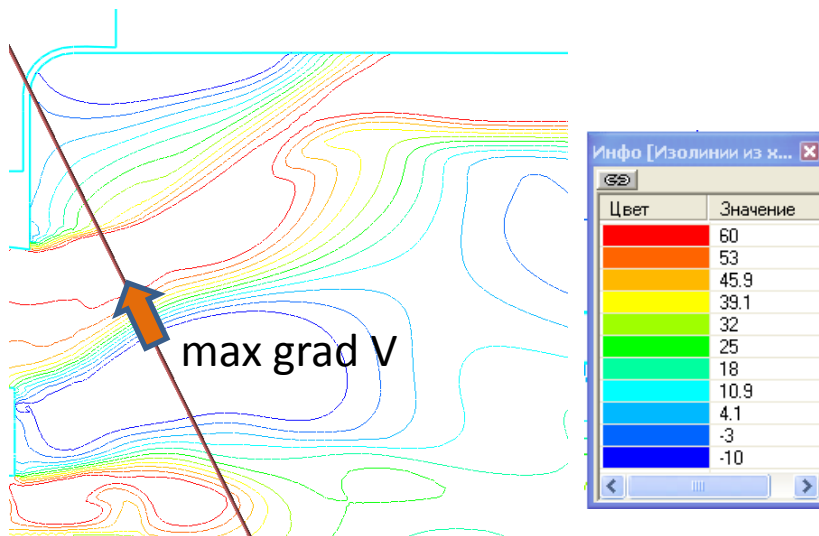
q

45% Ne PFR=30%

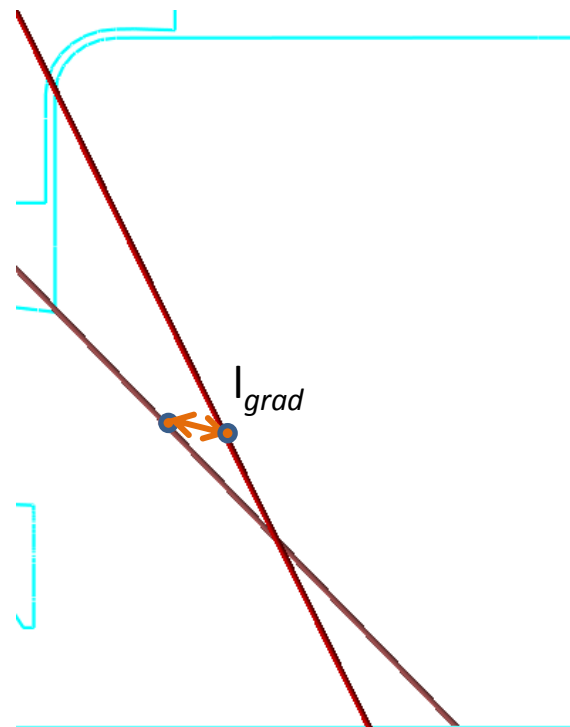




Расчетный критерий устойчивости горения.

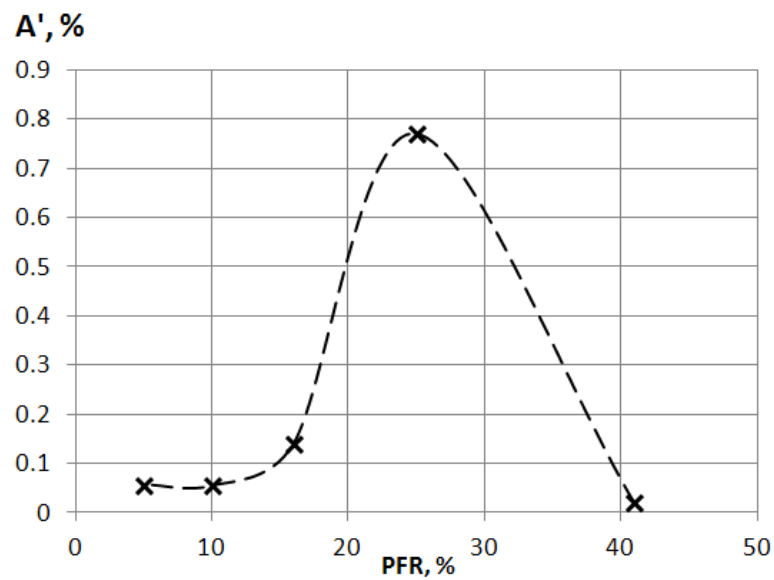
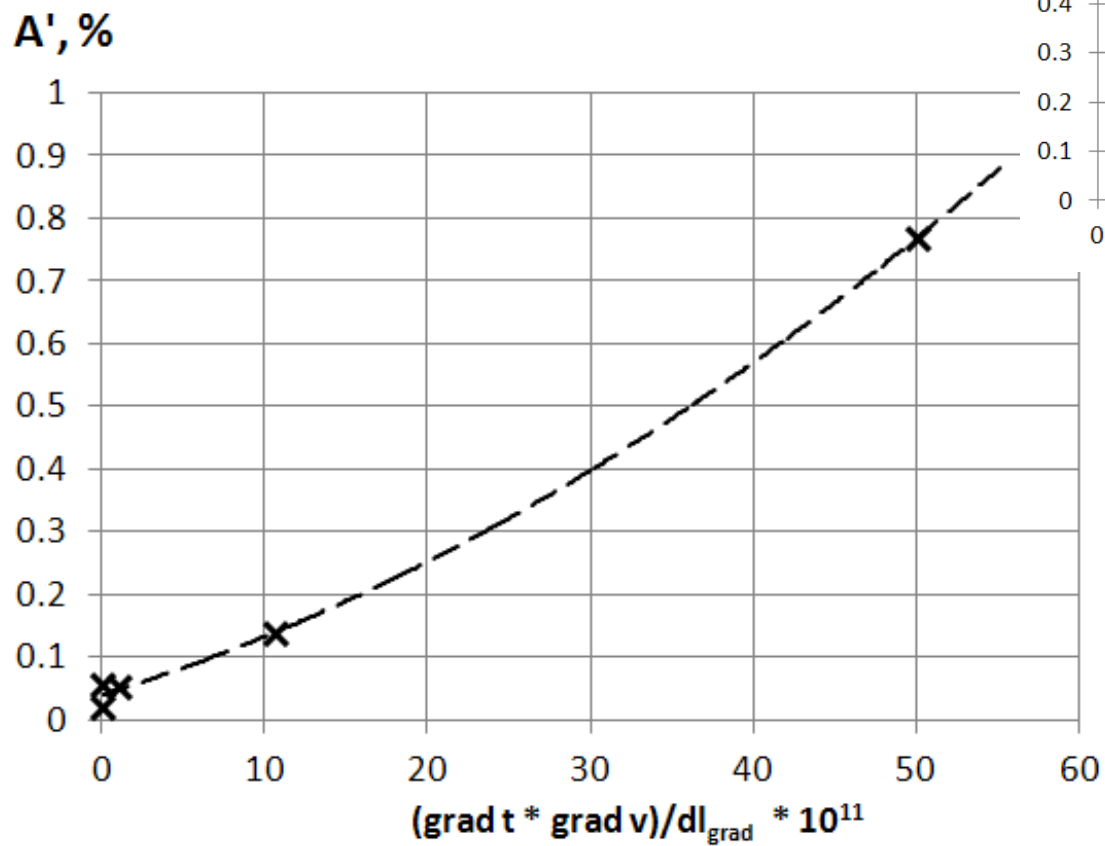


$$\frac{\max \text{grad } V * \max \text{grad } t}{l_{\text{grad}}}$$



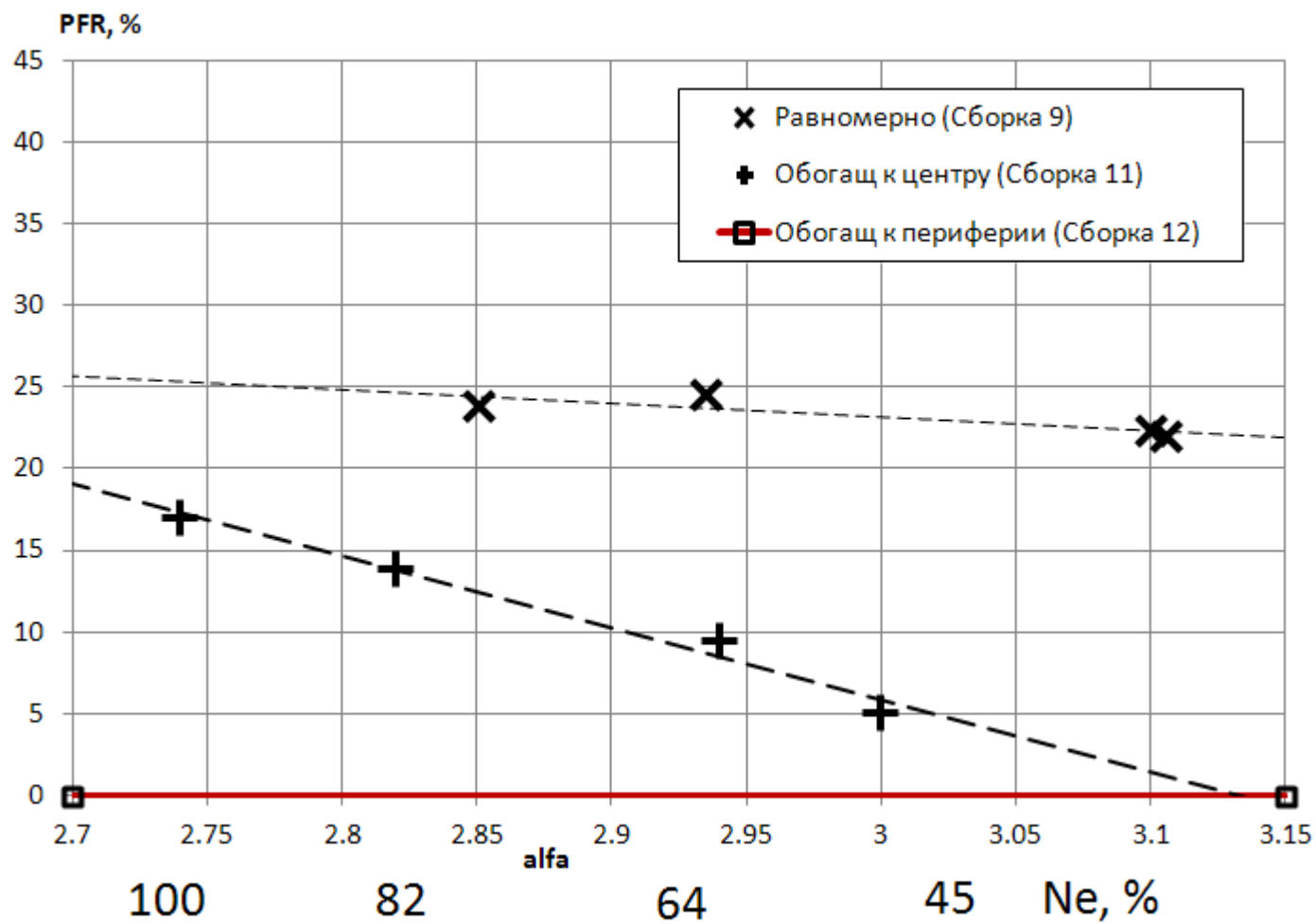


Анализ результатов





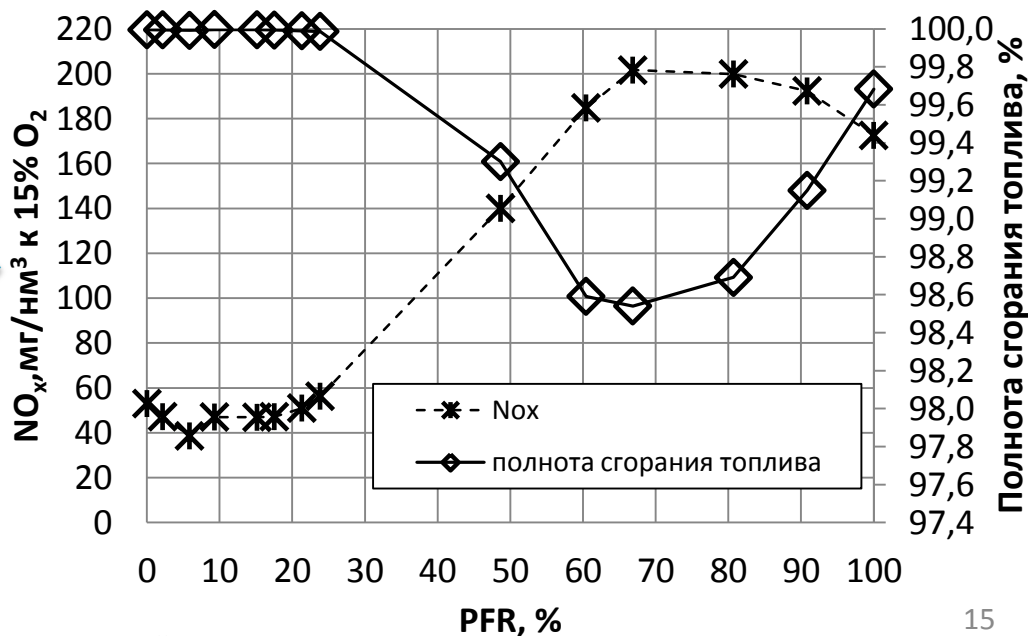
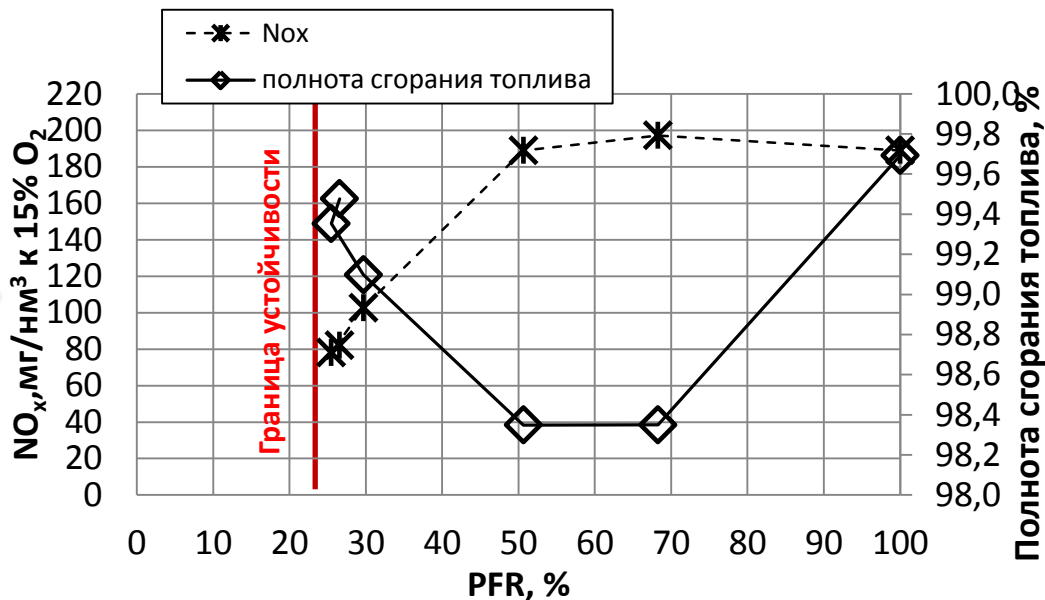
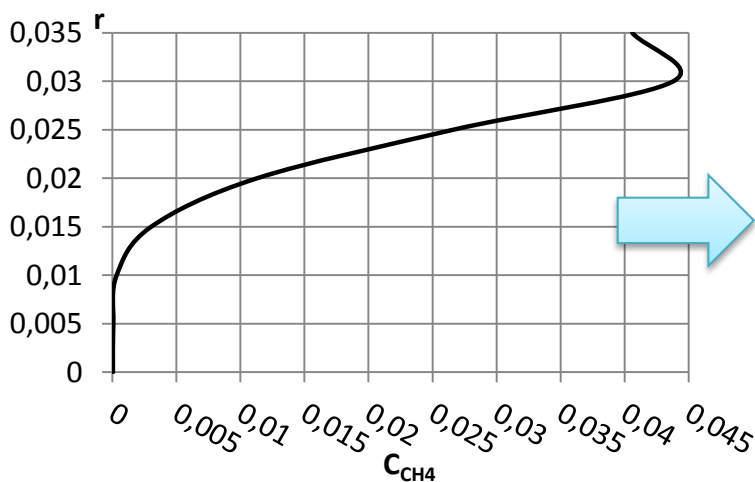
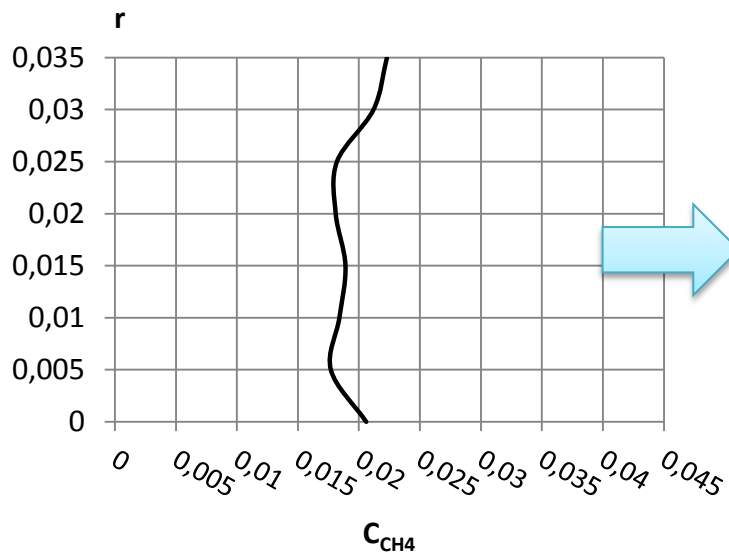
Граница устойчивости





Результаты испытаний

Переход с ПГ на ОГ на 45%Ne ($t_{\text{вх}} = 340$ С; $\alpha = 3,02$) при $P_{\text{вх}} = 330$ кПа





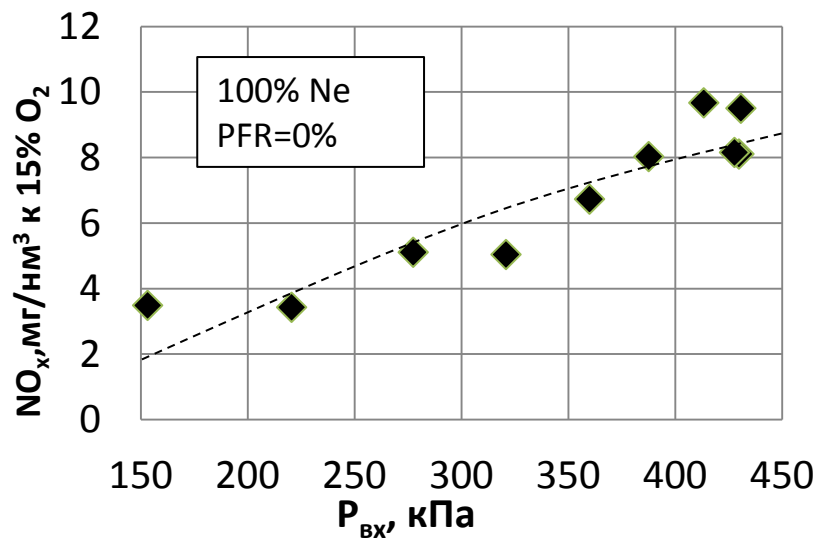
Результаты испытаний

$Ne=100\% (\alpha=2.74)$, $t_B=403C$, $P_{BX} = 300$ кПа, $PFR=0\%$

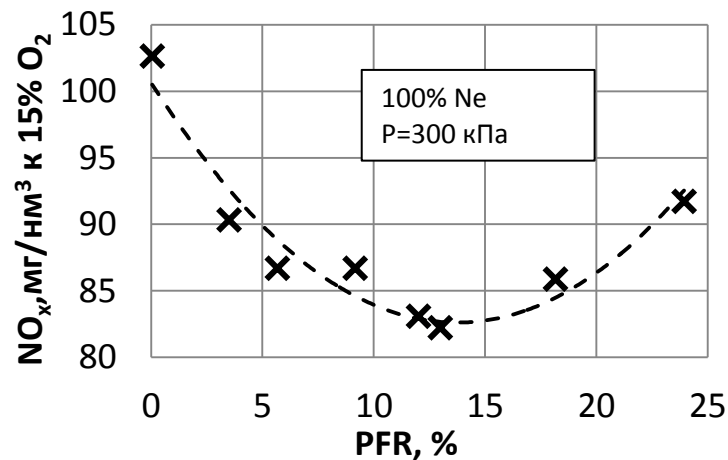
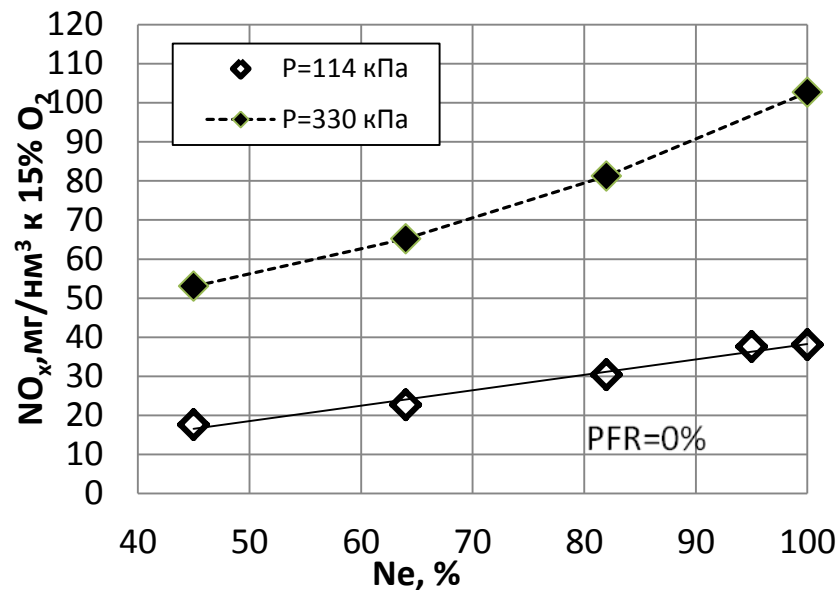
Обогащение к периферии:
 $NO_x = 102$ мг/м³ 15% O₂

Равномерная подача топлива:

$NO_x = 5$ мг/м³ 15% O₂



Низкие эмиссии NO_x и высокая полнота сгорания топлива (99,99%) при работе на основной горелки от 45% до 100% нагрузки для варианта с равномерной подачей топлива.





Результаты диагностических испытаний:

- Достигнуты заданные параметры определенные ТЗ при 450 кПа:
 - ✓ $\text{NO}_x \approx 10 \text{ мг/м}^3$ 15% O_2 ;
 - ✓ $\eta = 99.99\%$;
 - ✓ $\Theta < 1.04$;
- Получена устойчивая работа КС на основной горелке в диапазоне нагрузок 45 % - 100%;
- Отработана технология испытаний, выявлены влияющие факторы и их взаимосвязи;
- Проведена корреляция ранее разработанного расчетного критерия устойчивости горения и полученной в эксперименте границей устойчивого горения в КС;
- Определен механизм воздействия на возникновение виброгорения, получена эпюра концентрации топлива на выходе из ОГ, позволяющая осуществлять переход на 45% Ne без пульсаций;
- Разработаны технические решения, обеспечивающие беспульсационный переход при низких эмиссиях NO_x .



Расчетные исследования по разработанным техническим решениям

•Решение А:

создание локальной по окружности радиальной неравномерности поля концентрации топливовоздушной смеси, соответствующей эпюре с устойчивым (беспульсационным) переходом режима горения с пилотной горелки на основную.

•Решение Б:

Установка втулки на наружном выходе основной горелки с целью увеличения времени транспорта топлива до фронта пламени и рассогласования зон с тепловой и гидродинамической неустойчивостью.

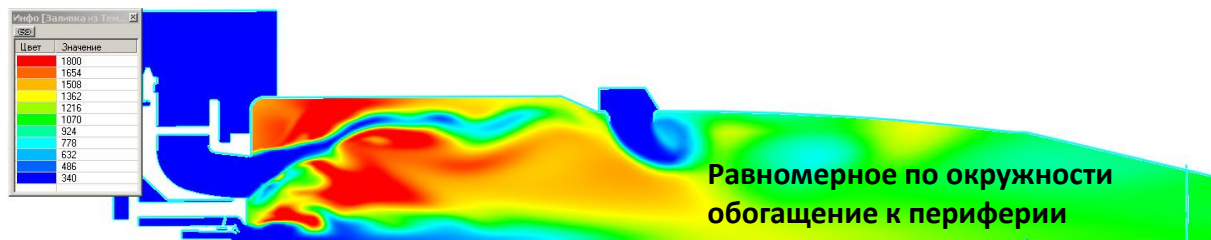
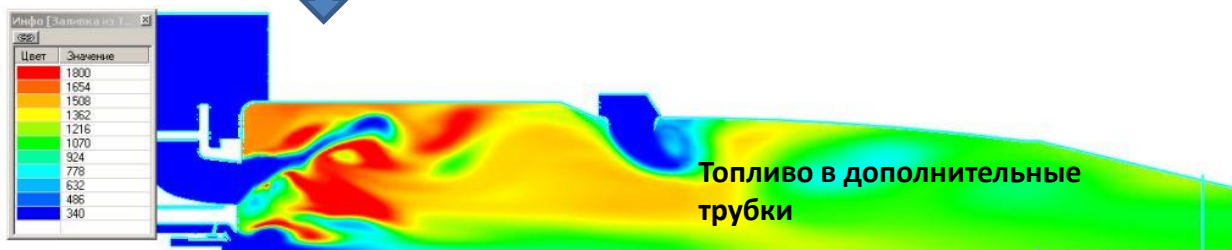
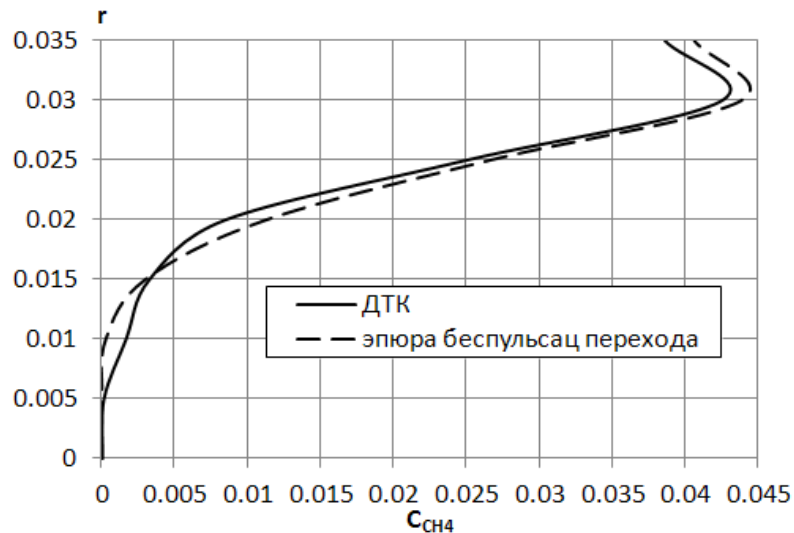
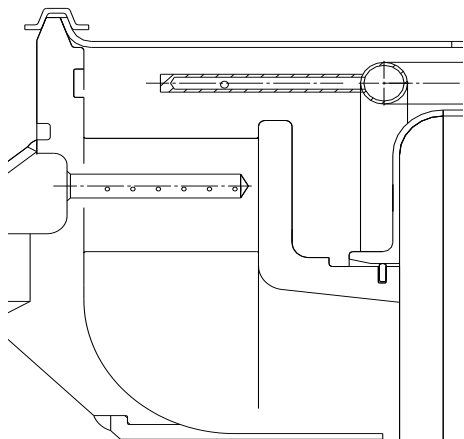
•Решение В:

дополнение горелочного устройства топливным коллектором для обеспечения регулирования эпюры концентрации топливовоздушной смеси на выходе основной горелки, обеспечивающий устойчивый переход режима горения.

Возможность использования коллектора для подачи пилотного топлива во фронтową стенку жаровой трубы (угловую зону).



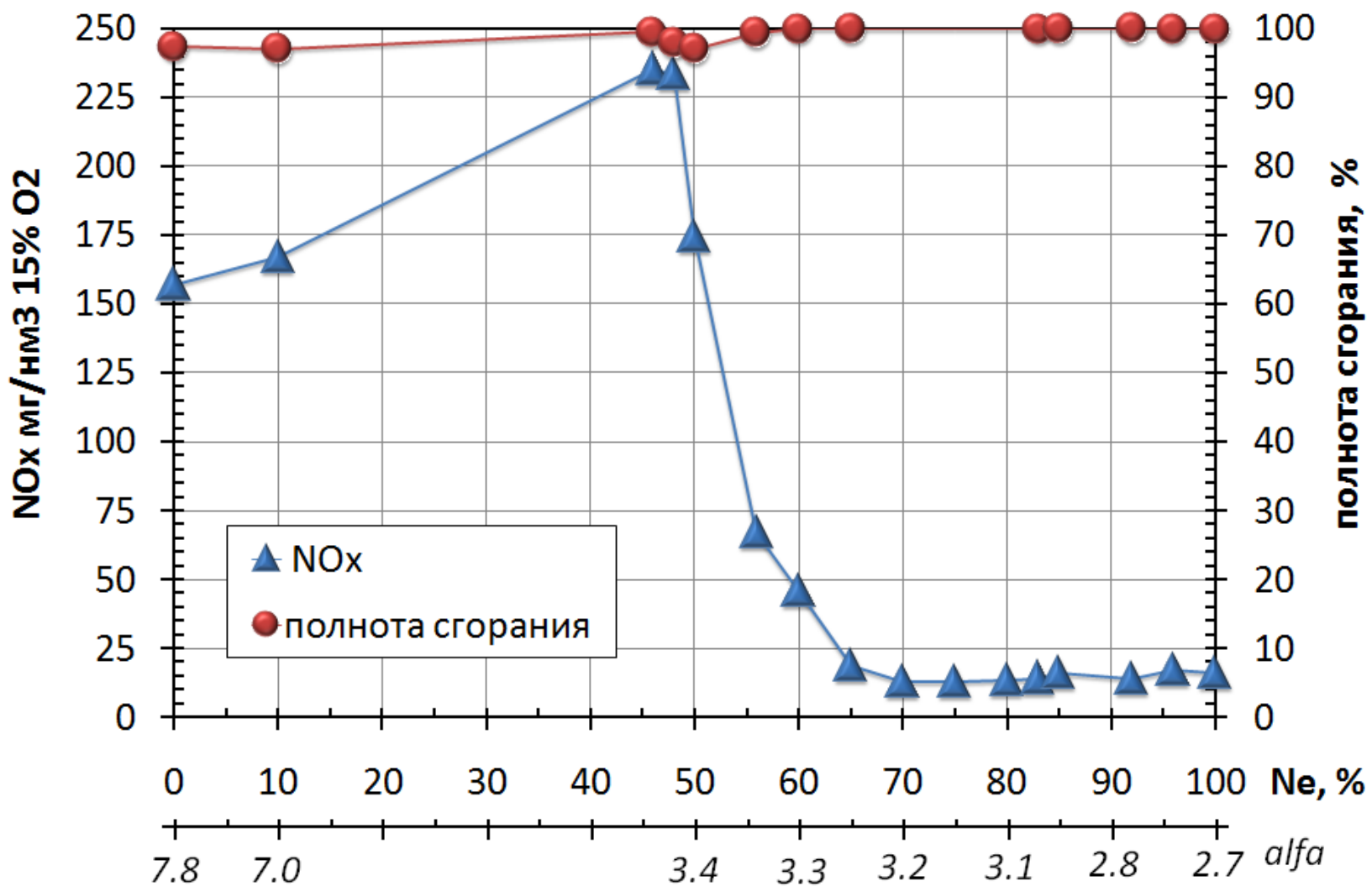
Организация дополнительного топливного подвода



Поля температуры в продольном сечении КС на режиме 45% Ne PFR=30% для двух вариантов

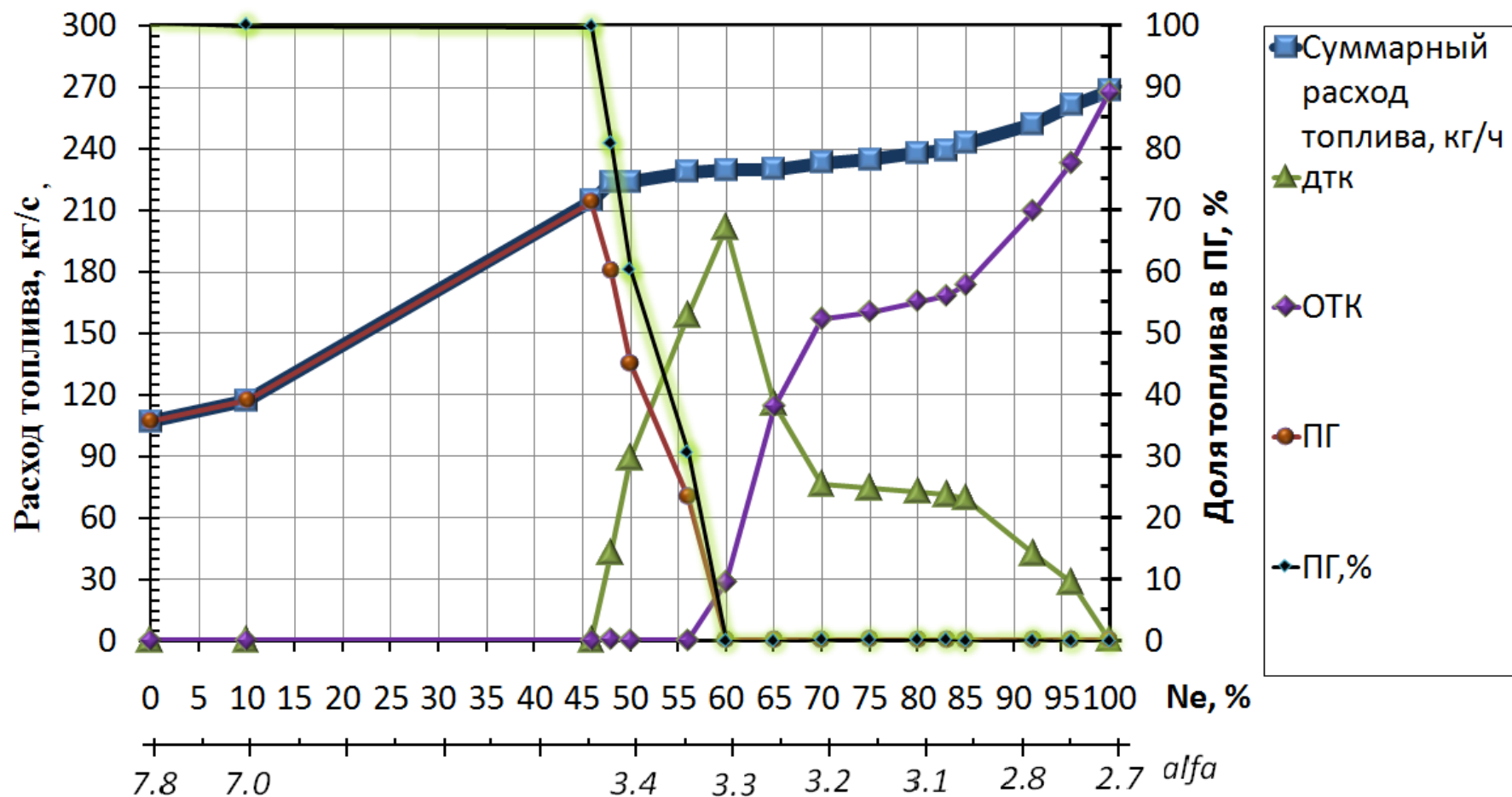


Результаты экспериментальных исследований доработанной МЭКС



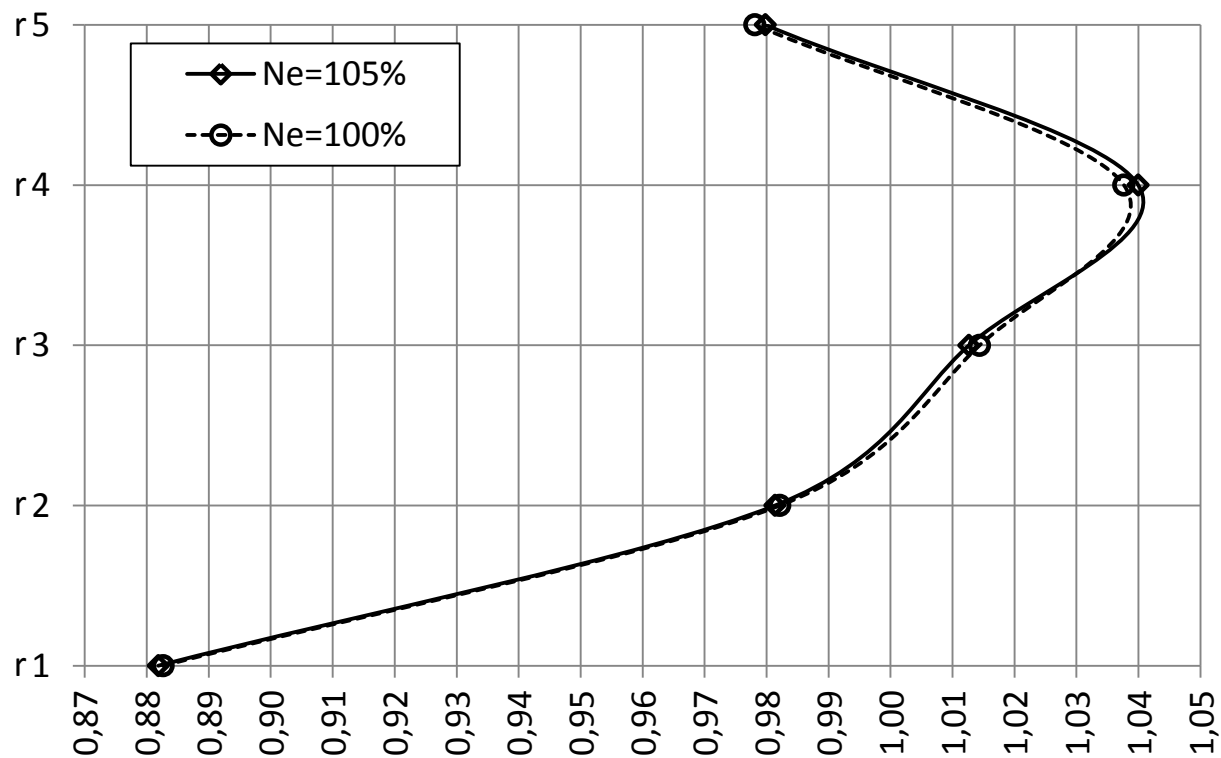


Управление доработанной МЭКС



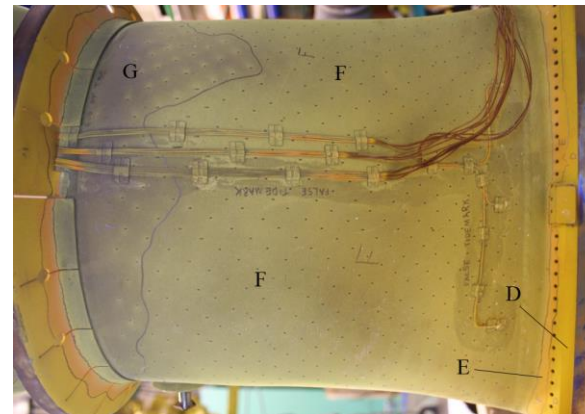
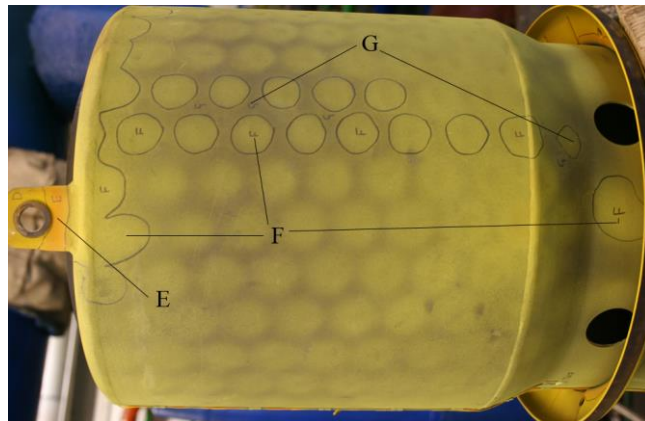


Результаты экспериментальных исследований доработанной МЭКС





Исследование температурного состояния с помощью термокрасок и термометрирования



Цвета	D	E	F	G
				
Температура, °C	535	577	720	805

Температура стенки ЖТ и газосборника не превышает 850 С



Технические требования 484/008-ГТЭ110-0729-2

	Технические требования	НД 1,3 бар	ВД 4,5 бар
Полнота сгорания топлива на расчетном режиме	99,95%	99,99%	99,99%
Коэффициент потерь полного давления	5,5 %	5,4 %	5,4 %
Радиальная эпюра температуры газа на выходе	1,04	1,035	1,035
Проектируемая камера сгорания должна быть взаимозаменяема с существующей	-	да	
Надежное воспламенение топлива при пусках. время розжига при запуске	< 10 сек	< 4 сек	
Устойчивость горения при разгоне ГТУ до режима холостого хода, устойчивая (без погасания) и «проскока» пламени	-	да	да
Температура металла стенки жаровой трубы	-	≤850 С	≤850 С
Содержание оксида углерода (СО) в выхлопных газах при работе на газообразном топливе: - от холостого хода до 0,5 номинальной - от 0,5 до 0,9 номинальной - от 0,9 до 1,0 номинальной	≤ 300 мг/нм ³ ≤ 50 мг/нм ³ ≤ 10 мг/нм ³	≤200мг/нм ³ ≤5мг/нм ³ ≤5мг/нм ³	≤300мг/нм ³ ≤7мг/нм ³ ≤5мг/нм ³
Содержание оксидов азота (NO _x) в выхлопных газах при работе на газообразном топливе: -от 0,5 до 1,0 номинальной	≤ 50 мг/нм ³	≤ 8 мг/нм ³	≤ 10 мг/нм ³
Гармонические пульсации давления со среднеквадратичным значением амплитуды на главной частоте	≤ 0,06 бар (0,4%)	≤ 0,0025 бар	≤ 0,005 бар



Изготовление мат.части МЭКС

Изготовление горелочного устройства



Горелочные устройства для комплекта ГТУ



Жаровые трубы и газосборники



Топливные инжекторы





Выводы

На стенде ОАО "ВТИ" испытана МЭКС ГТЭ-110 на параметрах воздуха до 500 кПа .

Получены характеристики камеры сгорания во всем диапазоне нагрузок от ХХ до 1.0 Ne при параметрах, соответствующих разным наружным температурам.

Полученные на доработанной МЭКС характеристики при стендовых условиях удовлетворяют требованиям ТЗ.

Для уменьшения рисков, возможных после установки МЭКС на ГТД желательно провести ее испытания на натурных параметрах на стенде ЦИАМ с целью подтверждения полученных характеристик.

Имеется комплект жаровых труб и горелочных устройств на двигатель с использованием передовых технологий. Имеется комплект оснастки для изготовления жаровых труб и горелочных устройств.



Спасибо за внимание!