

## Использование программного комплекса FlowVision при доводке конструкции малотоксичной камеры сгорания

Булысова Л.А., мнс

Всероссийский теплотехнический институт, Москва

При разработке перспективных ГТУ одной из главных проблем является создание малотоксичных камер сгорания, к конструкциям которых предъявляются всё более жёсткие требования по совершенствованию рабочего процесса. Особое внимание уделяется интенсификации выгорания топлива, снижению образования токсичных веществ в процессе сгорания на расчётных и переменных режимах, формированию оптимального температурного поля на выходе из камеры сгорания и охлаждению стенок пламенных труб и газосборников. В связи с этим в настоящее время существенно увеличился объём работ, направленных на создание новых конструкций камер сгорания и отработку их рабочих процессов.

Однако отсутствие фундаментальных знаний рабочего процесса часто осложняет применение полученных экспериментальных данных в промышленных условиях, приводит к увеличению объёмов и сроков наладочных работ ГТУ.

В настоящее время находит широкое применение математическое моделирование рабочего процесса камер сгорания ГТУ, с помощью которого можно глубоко и полно исследовать влияние конструктивных и режимных факторов на основные характеристики камер сгорания и наметить конкретные пути их улучшения, существенно снизив при этом объём экспериментальных исследований. Несмотря на сложность расчётов и принятые при математическом описании рабочего процесса допущения, которые по мере накопления экспериментальных данных могут быть уточнены, перспективность использования таких моделей для разработки камер сгорания ГТУ очевидна.

Для оценки влияния конструктивных и режимных параметров на процессы протекающие в камере сгорания ВТИ использовался программный комплекс Flow Vision (FV), позволяющий моделировать сложные движения жидкости и газа, включая течения с сильной закруткой, горением, течения со свободной поверхностью.

Данная статья посвящена практическому применению программного комплекса FlowVision при разработке и доводке малотоксичных камер сгорания (МКС). Особое внимание уделено сравнительному анализу полученных данных в результате численного и натурного эксперимента.

В большинстве малотоксичных камер сгорания, заложен принцип сжигания хорошо перемешанных топливовоздушных смесей (ТВС) на нагрузках работы двигателя от 50 % до 100%. Для этого фронтное устройство (ФУ) МКС делится на две зоны:

пилотную – в которой заложен принцип диффузионного сжигания топлива. Как правило, только при работе пилотной зоны осуществляется пуск и работа двигателя до 50% нагрузки;

гомогенную – в которой осуществляется подготовка ТВС, далее поступающей в объем МКС, воспламеняющейся от пилотной зоны (работающей уже как поддерживающая) и происходит процесс сжигания гомогенной смеси для работы двигателя от 50% до 100% нагрузки.

Такая схема сжигания топлива в камерах сгорания позволяет получать низкие выбросы окислов азота, поскольку температура сгорания смеси не превосходит 1300-1500 С.

На рисунке 1 изображен продольный разрез одной из исследуемых МКС.

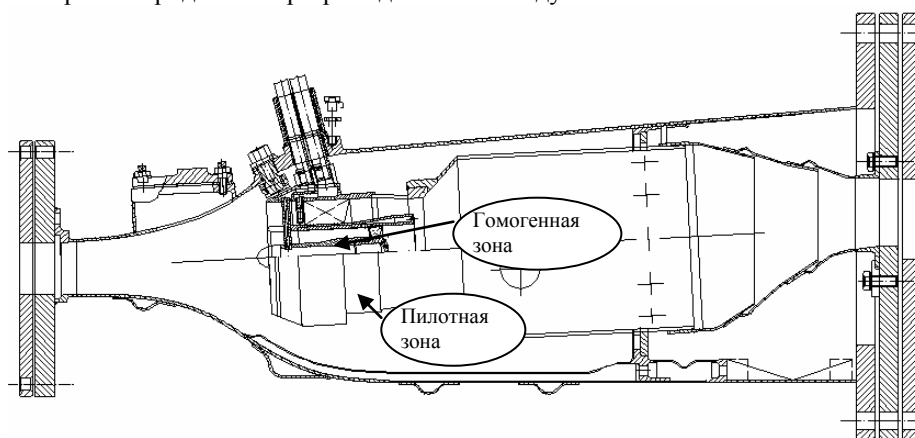


Рис. 1. Продольный разрез МКС.

Для решения задачи перемешивания топлива и воздуха с целью получения однородной смеси использовался программный комплекс FlowVision.

На рисунке 2 изображена модель зоны перемешивания МКС, состоящая из кольцевого канала, закручивающего устройства и топливораздающих трубок.

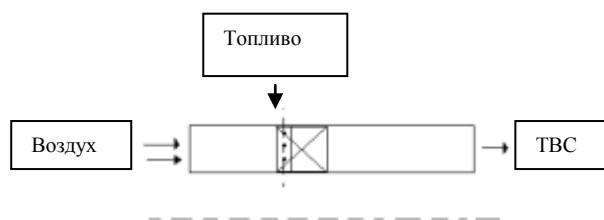


Рис.2. Продольное сечение кольцевой зоны перемешивания одного из исследуемых вариантов.

Воздух поступает в кольцевой канал, топливо подается через отверстия в топливораздающих трубках. Численно были проведены исследования по взаимному месторасположению закручивающего устройства (ЗУ) и трубок раздачи топлива. Оценка качества перемешивания велась в сечении на выходе из зоны смешения ФУ МКС. Качество перемешивания оценивалось по величине среднеквадратичного отклонения концентрации метана по потоку в исследуемом сечении, которая вычисляется и выводится в программном комплексе FV.

В таблице 1 представлены результаты расчетов трех исследуемых вариантов, приведены поля концентрации метана в исследуемом сечении и численные значения среднеквадратичного отклонения концентрации метана, рассчитанные по потоку и по площади.

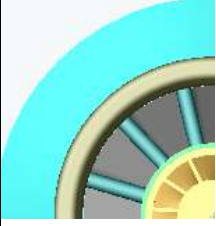
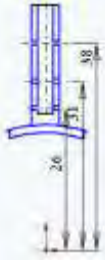
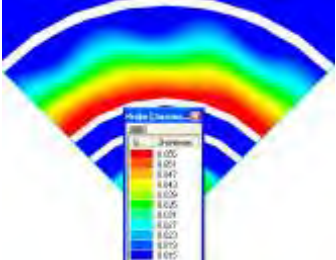
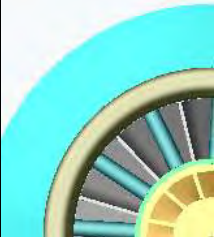
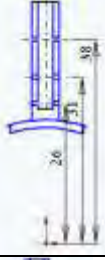
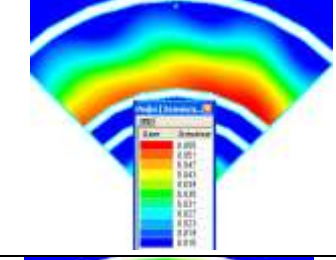
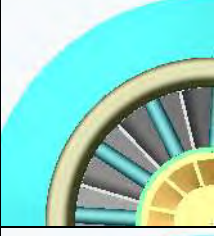
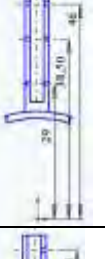
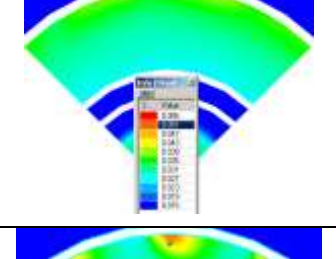
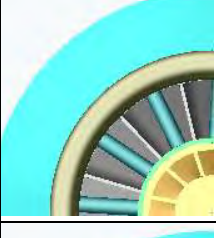
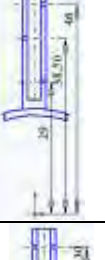
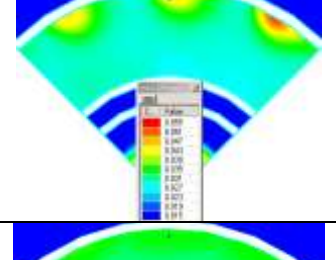
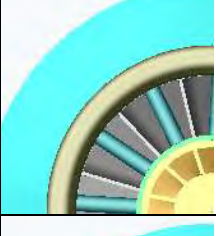

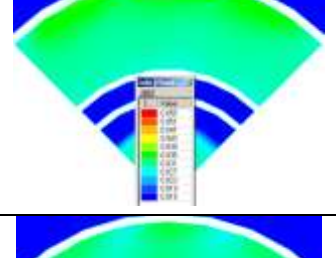
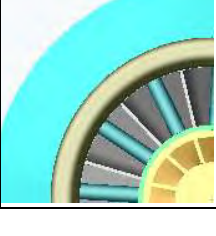
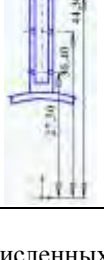
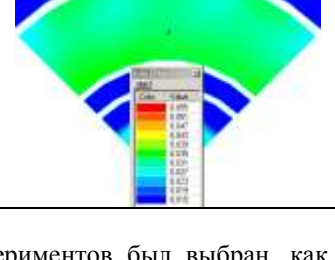
Таблица 1.

N	Схема расположения топливораздающих трубок в зоне перемешивания	Поле концентрации метана на выходе из зоны перемешивания	S по потоку	S <sub>по площади</sub>
1			0,07390	0,04105
2			0,113	0,197
3			0,0545771	0,04169

Варианты 1 и 3, с расположением трубок до ЗУ, оказались лучшими по качеству смешения ТВС. Значения среднеквадратичного отклонения концентрации метана в этих вариантах близки. Однако, анализируя поля концентраций метана, можно отметить, что в варианте 1 основная неравномерность - осевая, а в варианте 2 - радиальная. Расположение топливораздающих трубок относительно ЗУ варианта 1 будем использовать при дальнейшей доводке МКС.

Следующим этапом будет получение более равномерного поля концентрации по высоте канала зоны предварительного перемешивания. В таблице 2 представлены результаты численного исследования расположения отверстий раздачи топлива на топливораздающих трубках. Приведены поля концентрации метана в исследуемом сечении на выходе из зоны смешения ФУ и численные значения среднеквадратичного отклонения концентрации метана, рассчитанные по потоку.

Таблица 2

Номер Варианта ГУ	Расположение топливораздающих трубок	Расположение топливораздающих отверстий на трубках	Поле концентрации в поперечном сечении на выходе из пережима	Среднеквадратичное отклонение концентрации метана на выходе из пережима, $s$
1				0,3563
2				0,3395
3				0,0028
4				0,0043
5				0,0018
6				0,0014

В результате проведения численных экспериментов был выбран, как наилучший из разобранных – вариант 6 с соответствующим расположением отверстий на топливораздающих трубках.

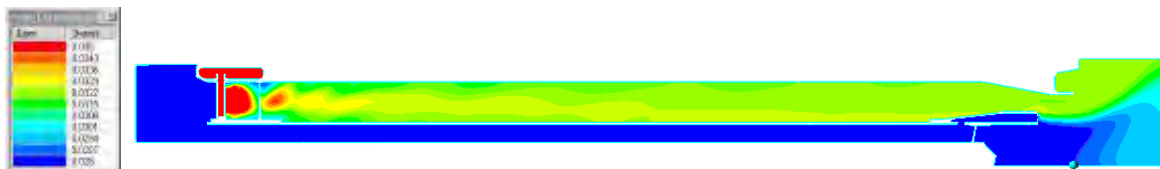


Рис.3. Поле концентрации в продольном сечении канала зоны перемешивания

На рисунке 4 изображен график зависимости среднеквадратичного отклонения метана от длины зоны смешения, полученный в результате численного эксперимента. Характер кривой таков, что на расстоянии до 2 калибров кольцевого канала смешения кривая уходит круто вниз, что говорит об резком улучшении перемешивания на этой длине, далее характер кривой меняется на более пологий и плавный, что говорит о снижении эффективности перемешивания от расстояния. А поскольку зона смешения ФУ ограничена по длине и нужно выбрать оптимум между качеством ТВС и размером ФУ, то целесообразно использовать длину зоны перемешивания от 1,5 до 2 калибров кольцевого канала зоны смешения.



Рис.4. График зависимости степени перемешивания ТВС по длине канала смешения

Таким образом, в результате численного эксперимента была доработана геометрия зоны предварительного смешения ФУ.

Интересным представляется подтвердить расчетные исследования экспериментальными данными. На рисунке 5 представлена кривая зависимости среднеквадратичного отклонения концентрации метана в исследуемом сечении расчетной модели и выбросами NOx, полученными в результате экспериментальных исследований этих же вариантов на стенде низкого давления ВТИ.

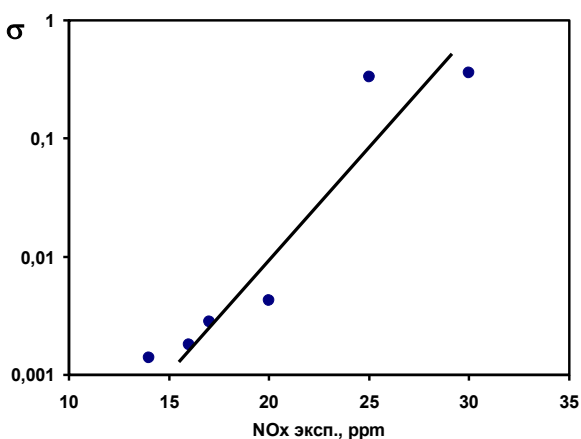


Рис.5. График зависимости величины среднеквадратичного отклонения метана в исследуемом сечении от величины выбросов оксидов азота на выходе из газосборника КС.

По данной кривой можно оценить ожидаемые выбросы окислов азота, зная расчетную  $\sigma$  в заданном сечении, при работе МКС на режимах близких к 100% нагрузки двигателя, когда основное топливо (более 90% от общего) подается в гомогенную зону. Результат представляется очень интересным и полезным для дальнейшей работы.

Еще один пример практического использования моделирования и расчета на FV – это организация отверстий смесителя на ЖТ МКС. Поскольку к МКС предъявляются достаточно жесткие требования по

неравномерности температурного поля перед лопатками турбины, то необходимой и важной исследовательской работой является получение требуемого температурного поля.

На рисунке 6 изображен разрез расчетной области для исследования организации отверстий смесителя в МКС.

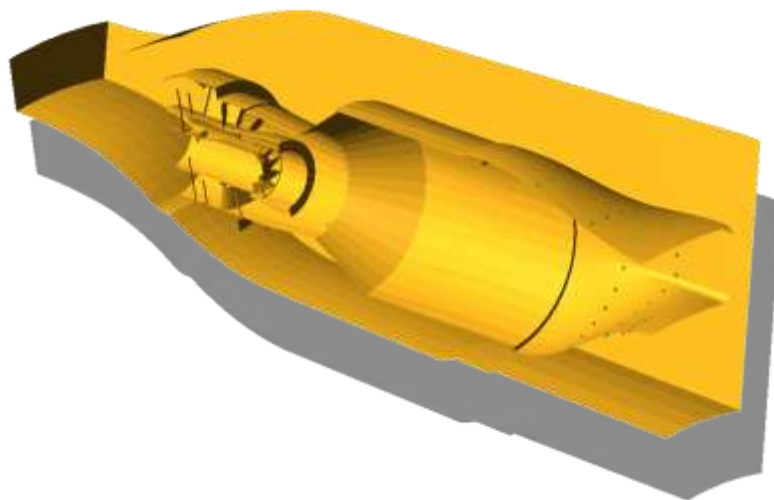


Рис.6. Разрез расчетной области для исследования МКС с помощью программного комплекса FV

На рисунке 7 изображена фотография экспериментального участка для исследования данной МКС на стенде ВТИ.



Отсек с размещенной в нем МКС

Рис. 7. Экспериментальный участок стенда ВТИ.

В эксперименте температура измерялась в выходном сечении, расположенном за газосборником при помощи 20 термопар расположенных в 5 рядов по 4 шт на каждом. На рисунке 8 показана фотография выходного сечения газосборника МКС с расположенными трубками для замеров.



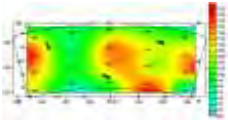
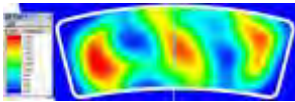
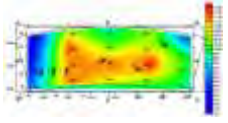
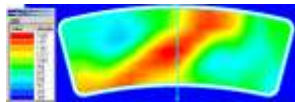
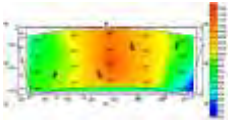
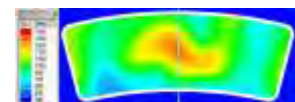
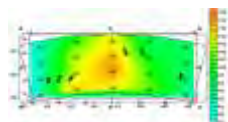
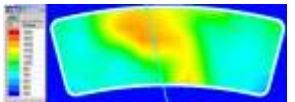
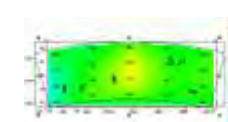
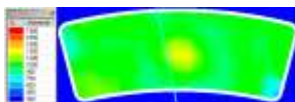
Рис.8. Выходное сечение газосборника МКС, расположенной в экспериментальном отсеке на стенде ВТИ.



В таблицу 3 сведены результаты численных и экспериментальных исследований полей температур в сечении на выходе из газосборника КС в зависимости от величины, количества и местоположения отверстий смесителя. Приведены значения температурной неравномерности, посчитанной по замеренным температурам и оцененным по формуле (1).

$$Q_{\text{вых}} = (T_{\text{max вых}} - T_{\text{вх}}) / (T_{\text{midl вых}} - T_{\text{вх}}) \quad (1)$$

Таблица 3

Эксперимент	Расчет во FlowVision
<p>Q<sub>вых</sub>=1.3</p> 	<p>Q<sub>вых</sub>=2.1</p> 
<p>Q<sub>вых</sub>=1.29</p> 	<p>Q<sub>вых</sub>=1.8</p> 
<p>Q<sub>вых</sub>=1.234</p> 	<p>Q<sub>вых</sub>=1.72</p> 
<p>Q<sub>вых</sub>=1.23</p> 	<p>Q<sub>вых</sub>=1.6</p> 
<p>Q<sub>вых</sub>=1.13</p> 	<p>Q<sub>вых</sub>=1.57</p> 

Из таблицы 3 видно, что численно полученная Q выше, чем рассчитанная по экспериментальным данным. Однако средняя температура на выходе из газосборника МКС в исследуемом сечении совпадает. Это можно объяснить тем, что термопар всего 20 шт и возможно точка максимума просто оказалась в стороне, а численно сечение исследуется более подробно. Характер полей схож. Таким образом расчет процесса горения на FV представляется реальным и очень облегчает исследования и доводку КС.

Актуальным является исследование влияния рабочего давления МКС на процессы протекающие в ней, поскольку камеры разрабатываемые и испытываемые на стенде атмосферного давления эксплуатироваться будут при высоком давлении. Таким образом, необходимо знать не изменится ли распределение воздуха по трактам МКС, как скажется изменение давления на зону обратных токов и массу рециркуляции в ней, полноту сгорания топлива и выбросы окислов азота.

В таблице 4 приведены результаты расчетных исследований модели МКС, работающей на параметрах соответствующих 100% нагрузки двигателя при разных рабочих давлениях для двух вариантов распределения топлива между центральной – пилотной зоной и гомогенной зоной:

- 5% топлива в центральную зону
- 30% топлива в центральную зону

Таблица 4

Втцен/ Втсум %	P, кПа	Lmax мм	Hmax мм	M рец %	T ср вых °C	η,%	NOx, ppm
30	111	175	80	3.1	846	75	26,2
5	111	172	84	7.78	754.5	53	1
30	849	155	70	2.87	1035	91.2	40,8
5	849	150	4	9.46	1084	97.1	7

На рисунке 9 представлены результаты расчета МКС при работе на натурном давлении, На рисунке 10 представлены результаты расчета МКС при работе на атмосферном давлении

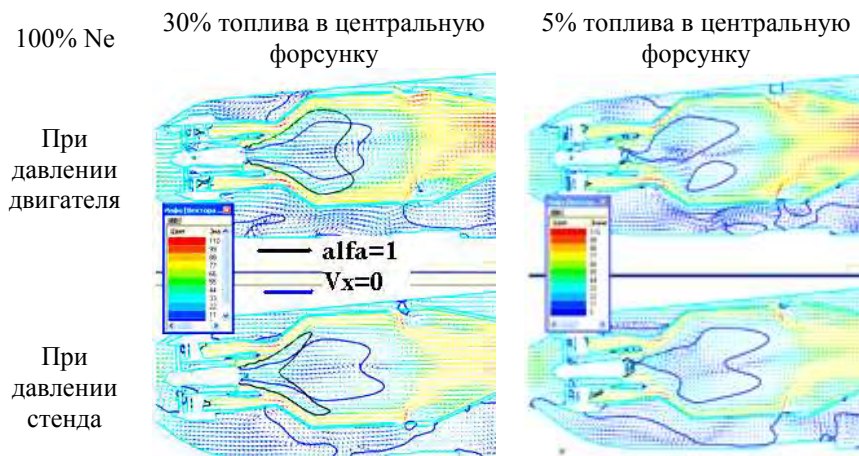


Рис.9. Поле скорости продольного сечения МКС

При давлении:

100% Ne 30% топлива в центральную форсунку

100% Ne 5% топлива в центральную форсунку

Рис 10 а. Поле температуры в продольном сечении КС ГТ-6

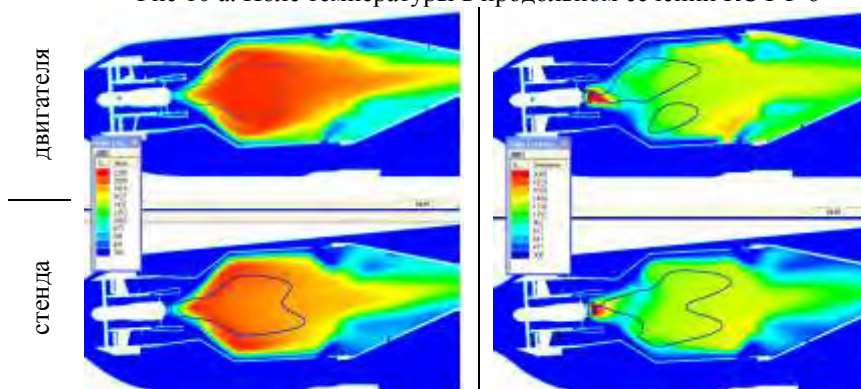
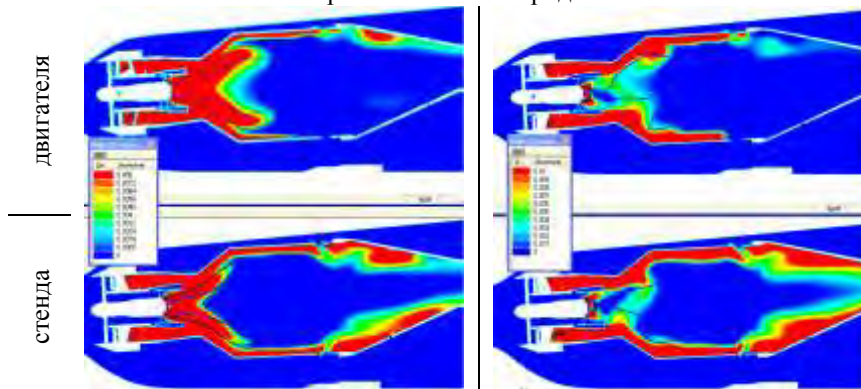


Рис 10 б. Поле выгорания топлива в продольном сечении КС ГТ-6



По результатам численных исследований можно сделать вывод, что зона обратных токов при натурном давлении поджата, а масса в зоне рециркуляции практически не меняется. Полнота сгорания топлива при высоком давлении выше и выбросы окислов азота так же выше.

На рисунке 10 представлены поля температур в продольном сечении МКС, и поля невыгоревшего топлива для двух распределений топлива между пилотной и гомогенной зонами. На рисунках наглядно видно, что при высоком давлении процесс сгорания ТВС более интенсивный и поле невыгоревшего горючего значительно короче, чем при атмосферном давлении. Причем это характерно для разных распределений топлива между зонами.

Доработанная КС, рассмотренная здесь была испытана на стенде высокого давления и результаты испытаний подтвердили характер изменений характеристик при переходе от стендового давления к натурному.

Таким образом, можно сделать вывод, что моделирование процессов газодинамики, смешения и горения при помощи программного комплекса FlowVision удобно и просто в использовании. Оно позволяет заранее выбрать оптимальные конструктивные параметры КС, что значительно сокращает объем испытаний, сроки и затраты на доводку.

Список используемых условных обозначений и сокращений:

$h, \%$  - полнота выгорания топлива на выходе из газосборника

$Q_{\text{вых}}, \%$  - коэффициент температурной неравномерности на выходе из газосборника

$NO_x, \text{ppm}$  – эмиссия оксидов азота

$T_{\text{ср вых}}, \text{C}$  – средняя температура на выходе из газосборника

$M_{\text{рец}}, \%$  - максимальная масса газа участвующая в рециркуляции

$H_{\text{max}}, \text{мм}$  – максимальная ширина зоны обратных токов

$L_{\text{max}}, \text{мм}$  – максимальная длина зоны обратных токов

$s^+$  - среднеквадратичная неравномерность посчитанная по потоку на выходе из зоны перемешивания

$sF$  - среднеквадратичная неравномерность посчитанная по площади на выходе из зоны перемешивания

$V_{\text{т центр}}$  – количество топлива подаваемое через диффузионный канал, относительно всего топлива на

КС

Список литературы:

Гутник М.Н., Васильев В.Д., Бульсова Л.А. Расчетные и экспериментальные исследования малотоксичных камер сгорания для энергетических ГТУ // Тезисы докладов научно-технического семинара «Опыт разработки, проблемы создания и перспективы развития низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ». – М.: ЦИАМ – ВТИ, 2004. – С. 36–37.

Гутник М.Н., Тумановский А.Г. Перспективы создания высокотемпературных малотоксичных камер сгорания стационарных ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 6 (21). – С. 3840.

Васильев В.Д. Разработка камер сгорания энергетических ГТУ с ультранизкими выбросами  $NO_x$  // Сборник докладов Всероссийской конференции по итогам конкурса молодых специалистов организаций НПК РАО «ЕЭС РОССИИ», 2005г, - С.55-68.

Христич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. – Киев: Техника, 1983.

Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984.