

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАЛОТОКСИЧНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД И ГТУ

© 2002 В. Н. Лавров, А. М. Постников, Н. В. Церерин, Ю. И. Цыбизов, В. В. Беляев

ОАО СНТК им. Кузнецова, г. Самара

На основании опыта СНТК им. Н. Д. Кузнецова по созданию малотоксичных камер сгорания представлены результаты анализа основных причин, сдерживающих дальнейшее улучшение экологических характеристик камер сгорания ГТД и ГТУ. Предлагается при выборе термодинамических параметров вновь проектируемого двигателя учитывать реальные возможности снижения выбросов вредных веществ.

Важнейшей задачей создания всех без исключения тепловых машин является обеспечение требований сегодняшнего дня, которые кратко можно выразить в виде триады 3Э: “экология, экономика, эксплуатационная эффективность”. Именно так и расставлены приоритеты, где вопросы экологии стоят на первом месте ввиду большой ответственности перед живой и неживой Природой.

Международной организацией ИКАО с 1980 года введено нормирование эмиссии несгоревших углеводородов (CH), оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x) и дыма от турбореактивных и турбовентиляторных двигателей гражданских самолетов в зоне аэропортов. Прогнозируя ежегодный рост авиаперевозок и связанное с этим увеличение объемов сжигаемого топлива, ИКАО осуществляет политику ужесточения норм на эмиссию оксидов азота – самого вредного загрязнителя окружающей среды.

Для авиационных ГТД выбросы вредных веществ (ВВ) нормируются в виде параметра эмиссии, равного общей массе ВВ в течение стандартного цикла “взлет – посадка”, отнесенного к взлетной тяге. Благодаря такому подходу к нормированию этот параметр пропорционален индексу эмиссии, т. е. отражает качество рабочего процесса камеры сгорания (КС) – с одной стороны, а также совершенство как двигателя, так и самолета – с другой.

Стремление отечественных и зарубежных фирм улучшить экологические характеристики двигателей, не меняя традиционной схемы КС, привело к снижению эмиссии NO_x не более чем на 10...15 %.

Отработка малотоксичных авиационных КС с двухзонной схемой сжигания топлива показала, что, несмотря на применение новой концепции горения, новых конструктивных решений по организации рабочего процесса со сложной и дорогостоящей автоматикой топливоподачи и регулирования, удалось снизить уровень эмиссии NO_x лишь на 30...35 %. В связи с этим наметился возврат к традиционным КС, а решение экологических вопросов осуществляется за счет выбора степени двухконтурности и эффективности двигателя.

Разрабатывая двигатель нового поколения НК-93, СНТК им. Н. Д. Кузнецова поставил и успешно решает задачу по обеспечению экологических параметров, превосходящих параметры лучших зарубежных образцов [1].

Результаты измерения эмиссионных характеристик двигателя НК-93 с традиционной многофорсуночной КС, включая испытание газогенератора в термобарокамере ЦИАМ, показали, что выполняются нормы ИКАО, вступающие в действие с 2004 года. Внедрение же модифицированной КС позволит выполнить перспективные (целевые) нормы ИКАО и вывести двигатель НК-93 на одно из первых мест среди существующих и вновь создаваемых двигателей (рис. 1).

Снижение выброса NO_x при сохранении традиционной конструктивной схемы достигнуто, в основном, за счет оптимального перераспределения расхода воздуха во фронтное устройство и жаровую трубу, а также уменьшением времени пребывания продуктов сгорания в КС.

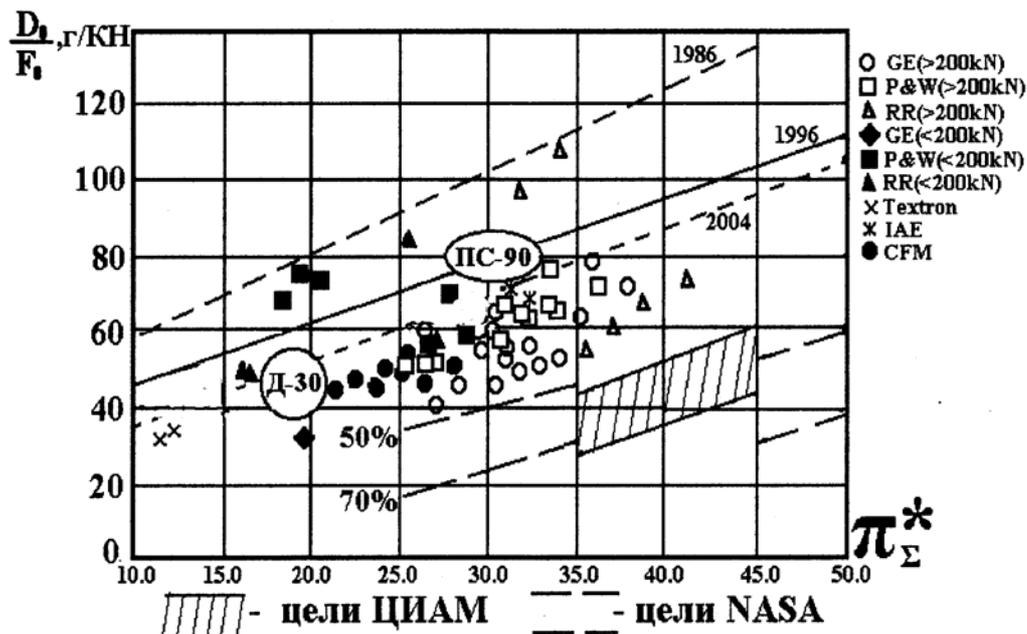


Рис. 1. Параметры эмиссии оксидов азота отечественных и зарубежных двигателей (© -НК-93)

Есть сведения, что ИКАО готовится к разработке нормирования выброса NO_x в высотных условиях. Прогнозируется, что в условиях крейсерского полета индекс эмиссии NO_x не должен превышать 5...10 г/кг топлива, что потребует специальной дополнительной отработки КС в высотных условиях.

При конвертировании авиадвигателей с высокими параметрами термодинамического цикла (степень повышения давления компрессора $A_k > 20$) решить задачу создания малоэмиссионной КС, обеспечивающей жесткие (NO_x и $CO \leq 50$ мг/нм³) требования по эмиссии ВВ, как было показано в [2], традиционными методами невозможно.

Проблема создания малоэмиссионных КС наземных ГТУ решается внедрением новых принципов организации рабочего процесса – многостадийного сжигания предварительно подготовленной топливоздушной смеси (ТВС), исходя из наличия действия трех механизмов образования оксидов азота: термического, быстрого (prompt NO) и N_2O – механизма, где главные факторы – тщательное смешение ТВС (гомогенизация) и эффективное сжигание при температуре $T_{пл}$ в узком диапазоне 1 600...1 750 К.

Новый принцип сжигания природного газа на нашем предприятии реализован в

двухзонных кольцевых КС и КС с выносными жаровыми трубами (ВЖТ) в составе эксплуатируемых двигателей семейства “НК” (НК-36СТ, НК-37, НК-38СТ). Среди отечественных двигателей особое внимание следует уделить интересному решению по реализации нового принципа в многомодульной кольцевой КС двигателя АЛ-31СТ [3].

На рис. 2 и 3 показано улучшение по годам экологических характеристик (выбросы NO_x и CO) двигателей НК-36СТ, НК-38СТ, используемых для газоперекачки, и НК-37 – для привода электрогенератора (эксплуатируется в настоящее время на БТЭЦ г. Самары).

Однако, несмотря на ощутимое снижение выброса NO_x в таких КС по сравнению с традиционными (включая многофорсуночную КС двигателя НК-16-18СТ), приблизиться вплотную к желаемым нормам пока не удалось [1, 2].

Анализ основных причин такого несоответствия на сегодняшний день показал следующее:

1. Серьезным фактором, сдерживающим успешную целенаправленную отработку снижения эмиссии NO_x и CO , является отсутствие приемлемой научно обоснованной и достаточно апробированной расчетно-экспериментальной модели рабочего процесса конкрет-

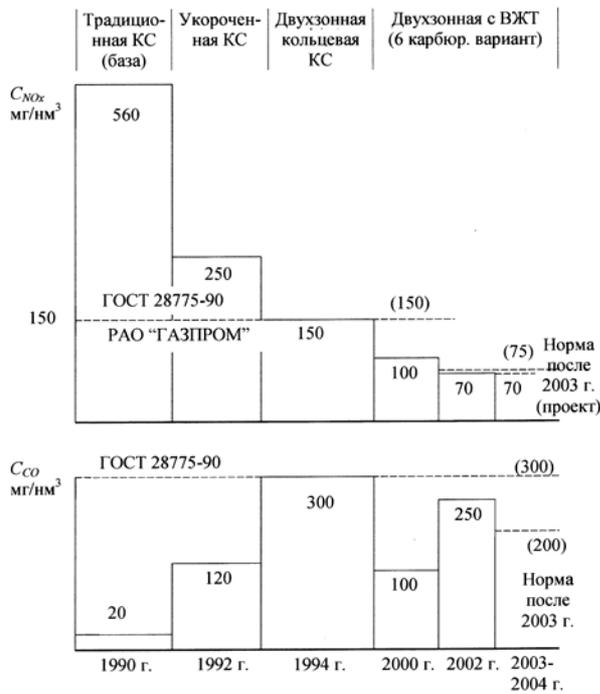


Рис. 2. Улучшение экологических характеристик двигателей НК-36СТ, НК-37 ($N = 25 \text{ MBm } [O_2] - 15 \%$)

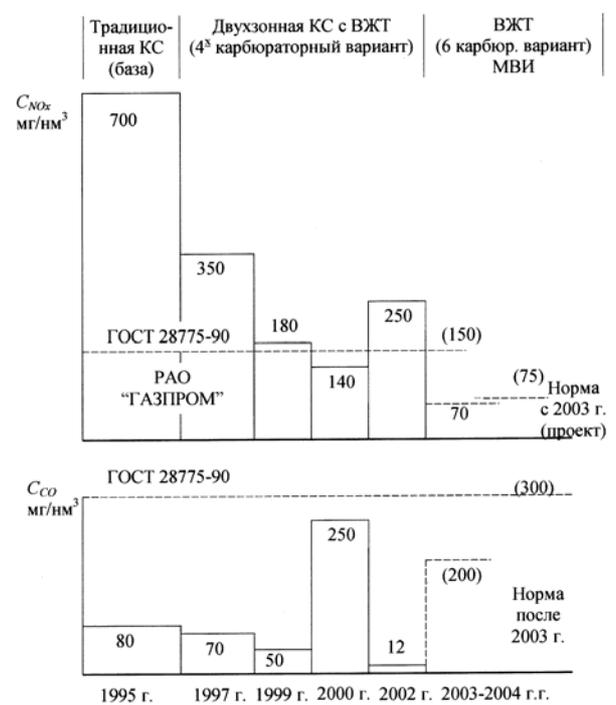


Рис. 3. Улучшение экологических характеристик двигателя НК-38СТ ($N = 16 \text{ MBm } [O_2] - 15 \%$)

ной конструкции двухзонной КС с реальными размерами зон горения, где реализуются различные механизмы образования NO_x .

2. Не менее важным фактором является установление связи параметров термодинамического цикла двигателя с обоснованным нормированием реально достижимого низкого уровня выброса NO_x и CO , т. е. решение вопроса оптимизации эффективности ГТД с учетом его экологических характеристик, стоимости изготовления и доводки, рассматриваемых уже на стадии проектирования [4].

Для иллюстрации сказанного и вытекающих отсюда задач на рис. 4 представлены предельные теоретические уровни эмиссии NO_x в зависимости от температуры газа перед турбиной T_2^* при реальном расходе воздуха на охлаждение стенок жаровой части КС. Здесь же приведены достигнутые уровни эмиссии. Виден резкий рост уровня эмиссии NO_x , начиная с $T_2^* > 1400 \text{ K}$, что соответствует работе ГТД при $A_k > 20$. Такая тенденция соответствует традиционным схемам охлаждения ($G_{охл.} \sim 30 \%$) и сохраняется для перспективных ($G_{охл.} < 20 \%$). Большинство известных ГТД с уровнем эмиссии $NO_x \leq 25 \text{ ppm}$ имеют умеренные параметры термодинами-

ческого цикла и некоторый запас по уровню эмиссии. Дальнейшее улучшение экологических характеристик возможно за счет освоения новых систем охлаждения, над чем и работают зарубежные фирмы. Так, для наземного двигателя RB-211 разрабатывается эффузионное охлаждение, фирма Аллисон работает над внедрением конвективного охлаждения и т. д.

Для двигателей НК-38СТ и НК-37 рассматривается внедрение толстых ($\sim 600 \text{ мкм}$) теплозащитных покрытий стенок жаровой части. Это позволит компенсировать дефицит воздуха в зоне горения, а также снизить выброс CO за счет повышения температуры в пристенной зоне горения.

При обработке эмиссионных характеристик двухзонных КС на автономных стендах и отсеках с различными уровнями давления, но с имитацией уровня температуры на входе обнаружено значительное влияние уровня абсолютного давления на эмиссию NO_x , что не согласуется с известными публикациями.

Известно [5], что уровень давления на входе в КС интенсифицирует рабочий процесс горения, влияя на полноту сгорания и

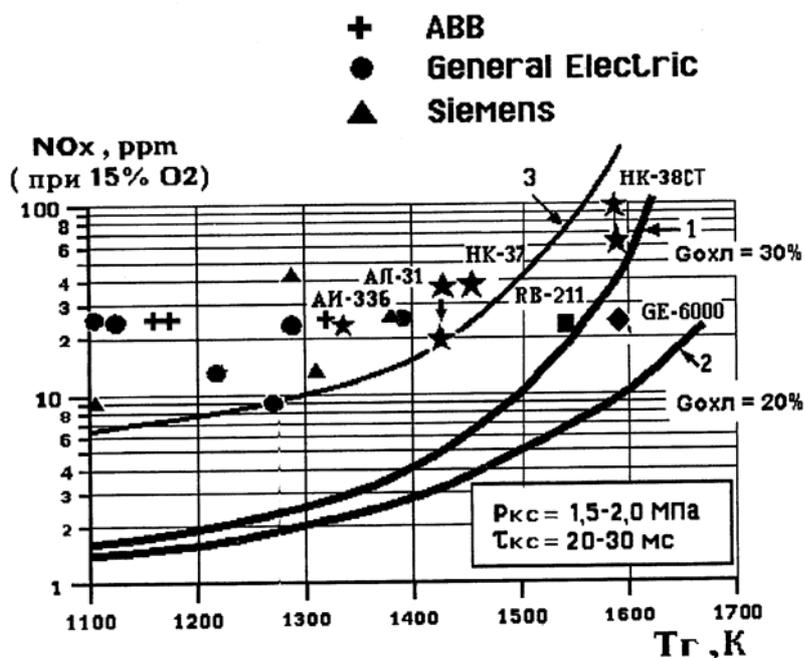


Рис. 4. Теоретически достижимые концентрации NO_x при сжигании гомогенных смесей

температуру горения через кинетику химических реакций. В [6] на основании экспериментальных исследований установлена, в частности, незначительная зависимость образования NO_x от величины давления в КС в диапазоне изменения P_{кc}^{*} от 0,1 МПа до 1 МПа:

$$NO_{P_{кc}^*} / NO_{P_o^*} = (16 \cdot P_{кc}^* - 0,23) / (6 \cdot P_{кc}^* + 0,77)$$

где NO_{P_{кc}^{*}} и NO_{P_o^{*}} - концентрации оксидов азота при заданном давлении P_{кc}^{*} и некотором давлении P_o^{*}, близком к атмосферному.

На рис. 5 представлено сравнение экспериментальных данных с расчетом по приведенной выше формуле. Результаты измерений выбросов NO_x получены при испытаниях модуля 2-х зонной КС двигателя НК-38СТ на отсеке высокого давления, описание которого представлено в [7]. Исследованы два различных по конструкции варианта модуля на режиме a_{кc} = 2,2 и T_{кc}^{*} = 700 К; в качестве топлива использовался природный газ.

Из анализа данных на рис. 5 следует сложная, непредсказуемая заранее зависимость NO_x от P_{кc}^{*}.

Экспериментальные данные можно сгруппировать в виде 2-х областей:

- одна из них в диапазоне P_{кc}^{*} от 0,5 МПа до 1,2 МПа достаточно достоверно описывается приведенной в [6] формулой;

- вторая, начиная с 1,3 МПа, обнаруживает существенное влияние величины P_{кc}^{*}.

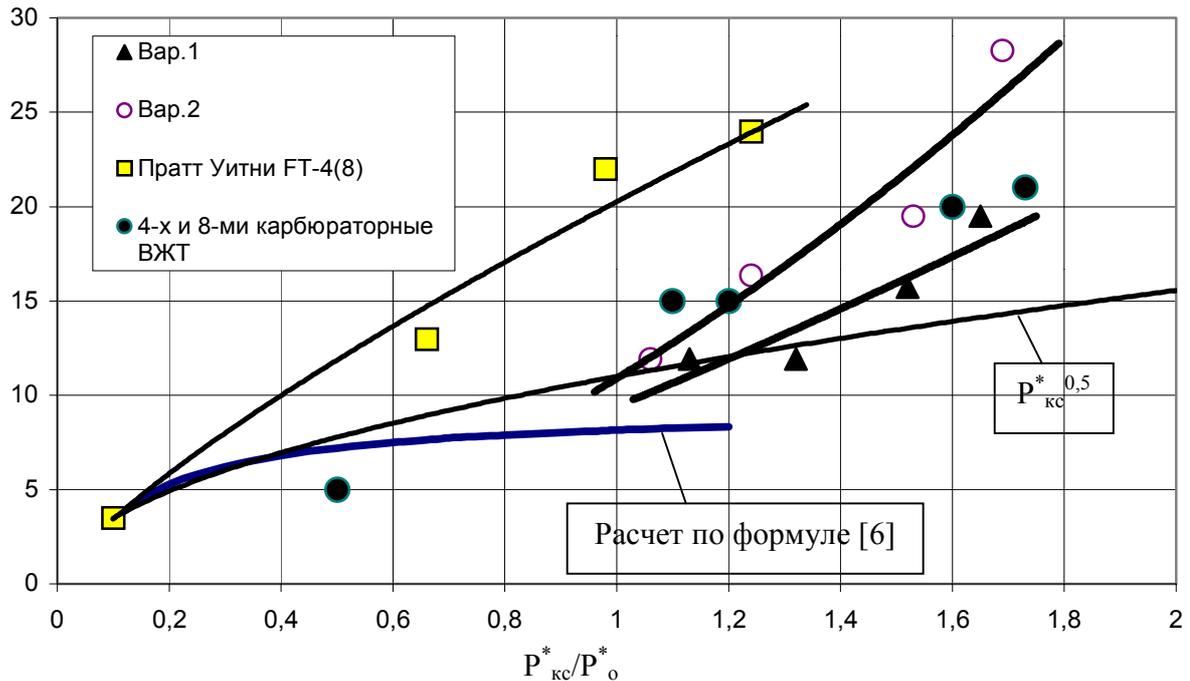
Наряду с влиянием P_{кc}^{*} следует обратить внимание на существование прямой зависимости выброса NO_x от пульсаций давления [8].

Очевидно, что обнаруженное влияние уровня и величины пульсаций давления на входе в КС значительно усложняют отработку экологических характеристик при автономных испытаниях, т. к. требуют полной имитации рабочих условий.

Таким образом, рост параметров термодинамического цикла ГТД и, в частности, уровня давления, с целью обеспечения высокого уровня эффективного КПД значительно обостряет проблему создания надежно работающей малоэмиссионной КС с большим ресурсом.

3. Важнейшим фактором является подготовка гомогенной ТВС и эффективное ее сжигание в системе двигателя. Под эффективностью горения в системе двигателя имеется в виду обеспечение розжига и устойчивого горения «бедной» ТВС с исключением как проскока и самовоспламенения ТВС в горелках, так и вибрационного горения, что также значительно усложняет проблему создания малоэмиссионной КС.

Качество подготовки ТВС обеспечивается требуемыми полями концентрации на выходе из горелки и реализуется за счет мно-

Концентрация NO_x , ppm пр. к 15% O_2 Рис. 5. Влияние уровня давления на эмиссию NO_x

гоочагового подвода топлива по сечению закрученного потока воздуха и необходимой длины пути смешения.

Несомненно, качество подготовки ТВС влияет на уровень эмиссии, но, как показывает опыт, это, по-видимому, проявляется в основном на этапе, когда предварительно достигнутый уровень эмиссии NO_x уже близок к теоретическому. На начальном этапе особое внимание должно быть уделено разработке мероприятий по ускорению смешения и диффузионного догорания топлива дежурной зоны в основной зоне горения, что является источником повышенных уровней образования термических NO_x . Наряду с этим, важным моментом является также определение минимального расхода топлива в дежурную зону.

Газодинамические исследования показали:

- струи ТВС основной зоны, вытекающие из карбюраторов, сливаются в общую приосевую струю на выходе из ВЖТ по закону смешения сталкивающихся струй;

- в приосевой струе происходит значительная турбулизация потока (зафиксированная температурная неравномерность на срезе ВЖТ КС двигателя НК-38СТ ~ 35 %);

- образование на периферии слабоперемешанных дискретных зон течения, где смешение осуществляется по законам, справедливым для начального участка струи, двухвальной поперек потока.

Такую сложную картину течения необходимо иметь в виду при решении важнейшей задачи о быстром и равномерном смешении ТВС основной и дежурной зон горения.

Одновременно с этим необходима разработка автоматизированной подачи и регулирования топливоподдачи с отработкой оптимальной дозировки топлива с учетом поддержания требуемой температуры в зоне горения независимо от температуры окружающей среды.

Список литературы

1. Гриценко Е. А., Цыбизов Ю. И. Методология создания малоэмиссионных камер сгорания авиационных и конвертируемых двигателей семейства "НК" // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. 1999. Вып. 2 (9). С. 16-26.
2. Гриценко Е. А., Орлов В. Н., Постников А. М., Цыбизов Ю. И. Снижение выбросов NO_x при конвертировании авиационных

двигателей // Теплоэнергетика. 1998. №3. С. 61-65.

3. Чепкин В. М., Марчуков Е. Ю., Куприн В. В., Федоров С. А. Организация горения в низкоэмиссионной камере сгорания ГТУ АЛ-31СТ // Газотурбинные технологии. 1999. Сентябрь – октябрь. С. 14-18.

4. Постников А. М., Лавров В. Н., Цыбизов Ю. М., Беляев В. В. Влияние режимных параметров и конструктивного исполнения камер сгорания ГТУ на эмиссию вредных веществ // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 3. Самара: Сам. гос. аэрокосм. ун-т. 2000. С. 196-202.

5. Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В., Ковылов Ю. Л., Резник В. Е., Цыбизов Ю. И. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. Самара: Самарский научный центр РАН. 2002. - 527 с.

6. Епейкин Л. Ф., Крыжановский А. И., Лавров В. Н., Николаев В. Е., Цыбизов Ю. И. Вопросы отработки экологических характеристик и надежности камер сгорания ГТУ наземного применения. Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1. Самара. 1998. С. 136-141.

7. Канило П. М., Подгорный А. Н., Христинич В. А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. Киев: Наукова думка. 1987. - 221 с.

8. Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В., Куликов С. В., Баштанников М. Н. Исследование влияния неустойчивости пламени заранее смешанных газов на эмиссию оксидов азота. Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 3. Самара: Сам. гос. аэрокосм. ун-т. 2000. С. 90-97.

EXPERIENCE OF DESIGN AND LINES OF FURTHER IMPROVEMENT OF GAS TURBINE ENGINE LOW-EMISSION COMBUSTION CHAMBERS

© 2002 V. N. Lavrov, A. M. Postnikov, N. V. Tsererin, Yu. I. Tsybizov, V. V. Belyaev

N. D. Kuznetsov Scientific and Technical Complex, Samara

On the basis of the experience gained by N. D. Kuznetsov Scientific and Technical Complex in Samara in the area of design and development of low toxic combustion chambers the paper presents the results of analyzing the main reasons that restrain further pollution reduction of combustion chambers for gas turbine engines and power plants. We suggest taking into consideration actual possibilities of reducing toxic exhaust when choosing thermodynamic parameters of a newly designed engine.