

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Б.Г. Мингазов, д-р техн. наук,

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева «КАИ», г. Казань, Россия

В настоящее время в исследованиях рабочего процесса камер сгорания наиболее актуальным является снижение выбросов токсичных веществ, таких как NO_x и CO . Это прежде всего связано с продолжающимся ужесточением норм выбросов тепловых двигателей. В то же время такие тенденции в современном двигателестроении, как повышение Π_K^x и T_2^* , снижение α_K способствуют увеличению выбросов NO_x .

Существуют общеизвестные методы снижения выбросов. К ним можно отнести:

1. Снижение уровня температур в зоне горения и уменьшения времени пребывания в ней.
2. Интенсификация смешения топлива и воздуха.
3. Использование каталитического эффекта.
4. Организация двухстадийного процесса горения.

Однако внедрение указанных методов в реальных камерах сгорания не всегда дает положительный эффект.

Необходимость снижения NO_x и CO требует противоположных действий, связанных с тем, что выделение NO_x резко возрастает при увеличении температуры горения смеси T_Γ^* , а выделение CO , наоборот, увеличивается с падением T_Γ^* ввиду уменьшения скорости химического реагирования.

Вследствие вышесказанного при доводке КС по снижению выбросов весьма важным является выявление компромиссных решений.

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования в этом направлении позволяют наметить пути доводочных работ по снижению NO_x и CO .

Известно, что термические NO_x формируются в результате химического реагирования кислорода и азота воздуха при пребывании газа в высокотемпературной

зоне горения. Согласно механизму Зельдовича формирования термических NO_x экспоненциально зависят от температуры и линейно от времени пребывания в зоне горения.

$$\frac{d\text{NO}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} e^{\frac{-86000}{RT_\Gamma}} \left\{ O_2 N_2 \frac{64}{3} e^{\frac{-43000}{RT_\Gamma}} - (\text{NO})^2 \right\},$$

где τ - время, С;

T_Γ^* - температура в реакционном объеме,

K ; NO , N_2 , O_2 - концентрация компонентов конечной газовой смеси, моль/л.

Данное уравнение позволяет рассчитывать так называемые “воздушные” NO_x , выброс которых для применяемых в ГТД топлив является основным, поэтому при оценке уровня выбросов можно опираться на данную зависимость.

С другой стороны, при использовании данного уравнения при расчетах выбросов в реальных камерах сгорания возникают трудности, связанные с необходимостью определения местных концентраций компонентов газовой смеси и температур в зоне горения. Моделирование внутрикамерных процессов на основе теории турбулентного горения с учетом процессов смешения позволяет определить распределения составов смеси, температуры и полноты сгорания по длине жаровой трубы [1].

Значения указанных закономерностей дают возможность оценить уровень выбросов NO_x , CO , а также определить закономерности их выделения по длине жаровой трубы.

Расчеты проводились по следующей схеме:

1. Весь объем жаровой трубы состоит из N зон.
2. В каждой зоне формируется состав не прореагировавшей смеси топлива, воздуха и продуктов сгорания, поступивших из предыдущей зоны.

3. Концентрация NO_x и CO в каждой зоне определяется выделившимися в ней веществами и поступившими из предыдущей зоны.

В качестве примера на рис. 1 приведены расчетные данные по распределению средних значений температуры газа T_g^* , полноты сгорания и эмиссии NO_x по длине жаровой трубы при различных α .

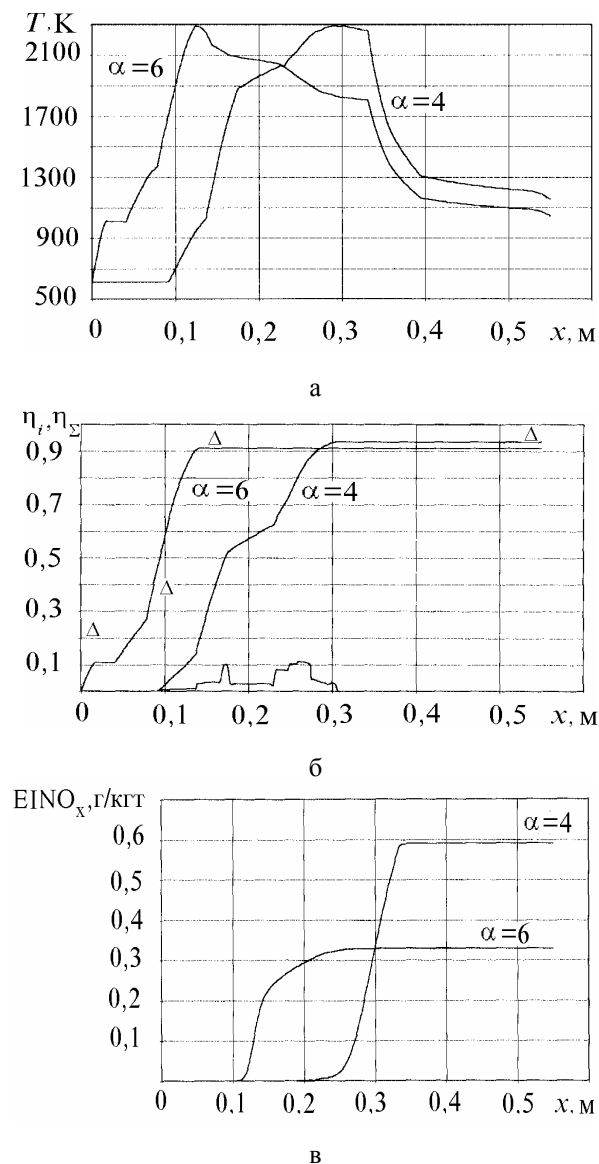


Рис. 1. Расчетное распределение температуры (а), полноты сгорания (б) и эмиссии NO_x (в) по длине жаровой трубы при различных α , $T_g^* = 600 \text{ К}$, $P_k^* = 0,1 \text{ МПа}$, топливо – природный газ, Δ – эксперимент; — – расчет

Как видно из графиков, наибольшее выделение тепла происходит в первичной зоне, где достигаются максимальные значения температур газа и полнот сгорания. Наибольшее выделение NO_x происходит в зо-

нах, где температура T_g^* имеет максимальное значение. По мере движения смеси по длине жаровой трубы происходит разбавление продуктов сгорания вторичным воздухом и температура газа падает и дополнительное выделение NO_x прекращается, при этом полнота сгорания сохраняет постоянное значение. Ввиду отсутствия реагирования параметров обогащение смеси в камере приводит к смещению максимальных значений к выходу жаровой трубы, а уровень выделения NO_x возрастает. Таким образом, совместное решение уравнений, описывающих процессы смешения и сгорания смеси с кинетическим уравнением выделения оксидов азота, позволяет выявить закономерности внутрикамерных процессов и наметить пути по их оптимизации за счет распределения воздуха по длине жаровой трубы.

Обобщение экспериментальных данных по исследованию эмиссии NO_x в различных камерах сгорания показывает общую закономерность, связанную с тем, что существует некоторое значение коэффициента избытка воздуха в камере α_k , при котором наблюдается наибольшее выделение NO_x (рис. 2).

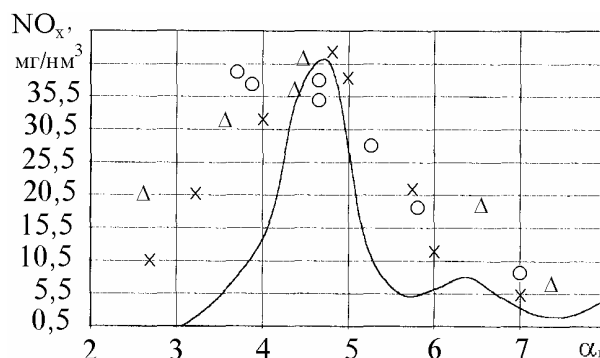


Рис. 2. Зависимость концентрации NO_x от коэффициента избытка воздуха в КС:

$P_k^* = 0,1 \text{ МПа}$, $T_g^* = 600 \text{ К}$, топливо – природный газ, — – расчет; ○ – эксперимент (стендовые испытания КС НК-18СТ); Δ – стендовые испытания КС НК-8, топливо – испаренный керосин (данные В.А. Щукина); × – результаты испытаний КС двигателя CF6-50, топливо – керосин

Здесь же приведены данные расчетов NO_x по вышесказанной методике. Видно, что теория достаточно адекватно отражает экспериментальные данные, что также подтверждает возможность применения рассмотренных подходов при анализе работы КС.

Расчеты, приведенные на основе рассмотренных моделей внутрикамерных процессов, позволили получить графики изменения полноты сгорания, выделения NO_x , CO и UHC от коэффициента избытка воздуха в зоне горения $\alpha_{зг}$ (рис. 3).

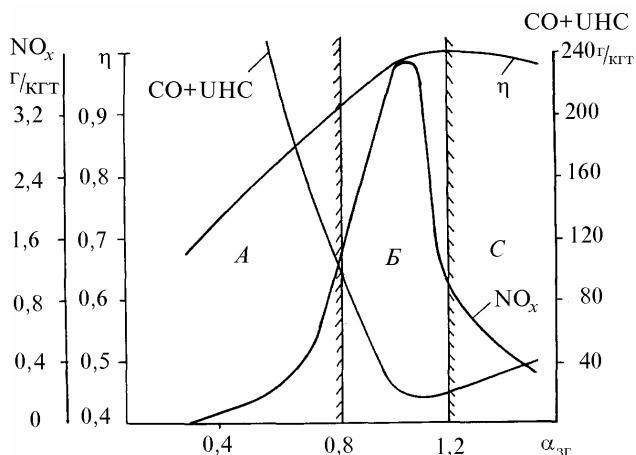


Рис. 3. Изменение параметров газа на выходе из КС по коэффициенту избытка воздуха в зоне горения

При рассмотрении приведенных графиков можно выделить три характерные области: А, В и С. Первая область А характерна тем, что полнота сгорания имеет низкий уровень и соответственно высокие значения выделения окиси углерода и углеводородов, в то же время выделение окислов азота незначительно. В области В достигаются максимальные значения полноты сгорания и соответственно максимальное выделение NO_x , в то же время выход CO и UHC имеет низкий уровень. В области С происходит уменьшение выброса NO_x при относительно низких значениях уровня выделения CO и UHC и высокой полноте сгорания топлива.

Как следует из графиков, с точки зрения обеспечения минимальных выбросов предпочтительнее работа камеры в областях А и С, соответствующих "богатой" или "бедной" зонам горения.

Наилучшие характеристики камеры обеспечиваются при работе камеры с обедненной первичной зоной (область С), так как в этом случае имеет место низкий уровень выбросов токсичных веществ при достаточно высокой полноте сгорания.

Очевидно, рассмотренные области А, В и С для КС различного назначения могут иметь различные диапазоны и смещаться в ту или иную сторону по составу

$\alpha_{зг}$ в зависимости от распределения воздуха по длине жаровой трубы, которое, в свою очередь, зависит от ее назначения.

Высокофорсированные КС, предназначенные для установки на высокотемпературные двигатели, имеют более раскрытую головную часть и большие расходы воздуха направляются на охлаждение стенок. Поэтому в таких КС для минимизации выбросов токсичных веществ следует обеспечить богатую первичную зону наряду с улучшением подготовки смеси перераспределением воздуха между фронтальным устройством и первым рядом отверстий.

В менее форсированных КС, предназначенных для наземных энергетических установок, распределение воздуха в жаровой трубе производится таким образом, что основной воздух подается в зоны догорания и смешения. Поэтому здесь наиболее оптимальным с точки зрения уменьшения выбросов является обеспечение "бедной" зоны горения.

Таким образом, для обеспечения приемлемых характеристик КС необходимо поддерживать температуру в зоне горения в узком интервале на всех эксплуатационных режимах двигателя, что является трудной задачей.

В связи с этим в настоящее время широко внедряется схема двухстадийного сжигания топлива путем применения «богатой» или же «бедной» зон горения в первичной зоне камеры сгорания.

Литература

1. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД.- Казань: Изд-во КГТУ им.А.Н.Туполева, 2000.- 167 с.

Поступила в редакцию 06.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор П.М. Канило, ИПМаш НАНУ, г. Харьков; канд. техн. наук, доцент В.Е. Костюк, Государственная академия городского хозяйства, г. Харьков.