

**КРИТИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ  
К СОВРЕМЕННЫМ ПРОБЛЕМАМ ГОРЕНИЯ  
В ЭНЕРГОМАШИНАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОКИСЛИТЕЛЬ –  
КИСЛОРОД ИЗ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА**

Орлов В. Н., Рудницкий А. М.

*АО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара*

Посвящается светлой памяти выдающегося конструктора, создателя авиационной и ракетной техники Николая Дмитриевича Кузнецова

*1. ВВЕДЕНИЕ*

С полной уверенностью можно констатировать, что за последние 50...60 лет, а фактически и более, начиная с трудов гениального естествоиспытателя М. Фарадея [1], много еще осталось невыясненных факторов в теории и практике горения в области сжигания компонентов в энергомашинах, работающих на атмосферном воздухе. К числу таких проблем относится сам процесс высокотемпературного окисления горючих довольно узкая отрасль в познании и исследовании окружающего мира, а тем более, незначительна для прогресса развития науки и техники существующая, расходящаяся на слуху экологическая тема – об истоках и принципах минимизации генерации оксидов азота ( $NO_x$ ), [2, 4, 6], но вместе с тем и в этой, уже в некоторой мере устаревшей теме, имеется еще много неоткрытого и интересного.

*2. КРИТИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧА  
“ОКИСЛЕНИЕ АЗОТА ПРИ ГОРЕНИИ” [3]*

2.1. И самими авторами этого труда, и всем научным миром до сих пор так и остается необъяснимым ряд зафиксированных экспериментальных фактов. Нераскрыта полностью основная причина генерации оксидов азота ( $NO_x$ ) – не на оси абсцисс, соответствующей точке –60 мм, а лишь в первой половине оси ординат, выше условной точки “0”, см. рис. 1. Этот, на первый взгляд, казалось бы, противоречивый, поразительный результат, объясняется так. Координате –60 мм по оси абсцисс соответствует срез горелочного устройства, внутрифакельное

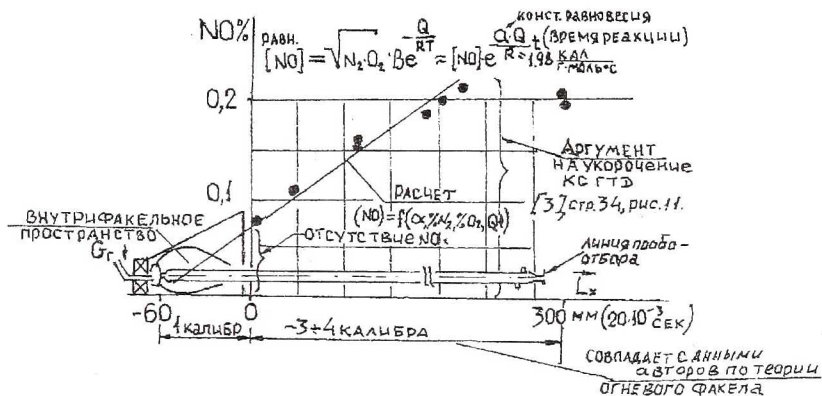


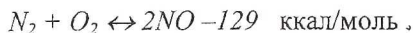
Рис. 1. Экспериментальные данные Я.Б.Зельдовича и их объяснение



Рис. 2. Реакции, протекающие в огневом факеле или во фронте пламени

пространство процесса горения, в котором и протекает лишь реакция окисления горючего ( $C_nH_m$ ) кислородом воздуха ( $\sim 21\% O_2$ ). Азот же воздуха при этом участия принимать не может, так как диссоциация молекул углеводорода и кислорода наступает при температурах  $\geq 200 \dots 500^\circ C$ , см. рис.2, а диссоциация на ионы молекулярного азота достигается при температурах не ниже  $1300 \dots 1500^\circ C$ , см. там же рис.2 [7]. И согласно рис.3, когда происходит нарастание температуры после факела, вторичный воздух "прожигается" высокотемпературными продук-

тами сгорания и вследствие этого начинает протекать при непрерывном подводе тепла эндотермическая реакция:



А так как эта реакция между близкими по своим свойствам химическими элементами V и VI<sup>ой</sup> групп таблицы Менделеева протекает с интенсивным поглощением тепла [3], то как трудно уменьшить генерацию  $NO_x$  при постоянном значении  $T_{пл} = \max$ , то так же трудно, невозможно бесконечно увеличивать процент выхода этих окислов. Можем лишь отметить, в этой связи, что при любом окислении азота кислородом воздуха поддерживается  $\lim [NO_x]$ :

$$\frac{dNO_x}{dt} \leq \lim[NO_x] \leq \frac{dNO_x}{dt} \max$$

Т. е. при всяком тепловом процессе, проходящим с привлечением атмосферного воздуха, нельзя полностью избавиться от генерации  $NO_x$ , но и нельзя при этом ее неограниченно увеличивать выше определенного предела, лимитируемого эндотермическим характером этого взаимодействия. Чем больше масса вторичного воздуха, тем больше тепла потребуется для увеличения процента выхода  $NO_x$ , и так бесконечно.

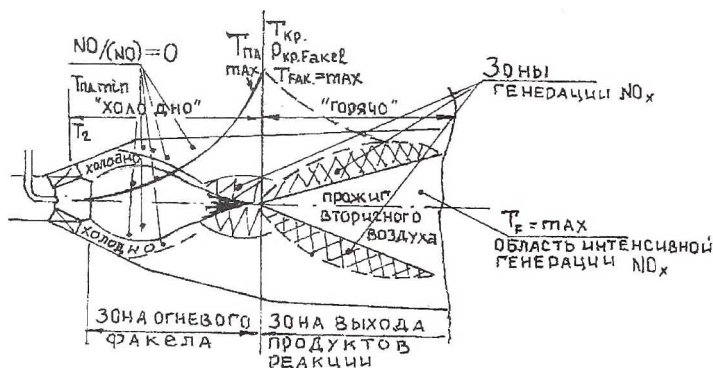


Рис. 3. Физическая условная схема процессов, инициируемых огненным факелом

2.2. До сих пор не объяснено толкование экспериментальных результатов по незначительному увеличению выхода  $NO_x$  в сосуде объе-

мом 65л по сравнению с меньшим сосудом ( $V = 35$  л). [3]. Этот как бы необъяснимый результат объясняется тем, что в большем сосуде мы имеем несколько больший огневой факел и, в соответствие с этим, большую контактную поверхность вторичного воздуха, см. рис. 4, при прочих равных условиях. Вот почему при различных объемах огневого факела, рис. 5, мы получим существенное различие и в проценте генерации  $NO_x$ . Если объем огневого факела для метана с кислородом составляет

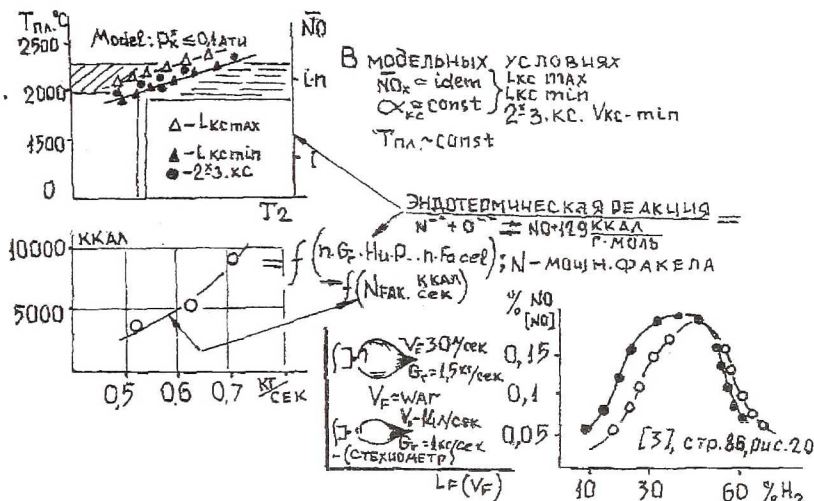


Рис. 4. Факторы, влияющие на генерацию оксидов азота

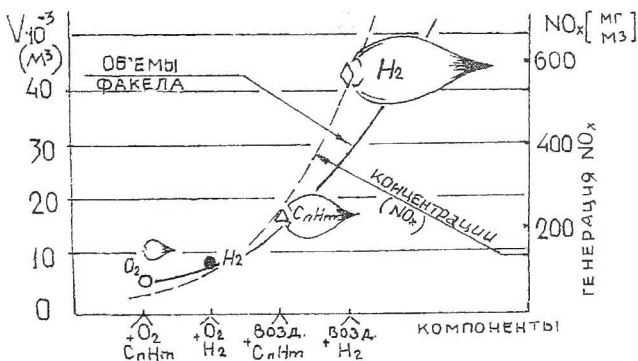


Рис. 5. Влияние объема огневого факела на генерацию оксидов азота

условно  $\sim 17$  л, то для смеси водорода с воздухом-  $\sim 45$  л, т. е. в явном виде получаем, что чем больше объем огневого факела в воздушном пространстве, то при прочих равных условиях:  $T_{пл, max} P_{K max} V_{КС} = const$ , выделение  $NO_x$  будет превышать их для меньшего объема огневого факела.

2.3. Для выяснения более полной и четкой картины опыта по достоверности эксперимента при окислении азота в атмосферном воздухе и при различных концентрациях его компонентов, при одновременном широком варьировании параметров:  $W_B, T_B, G_B, P_K, T_{пл}$ , конструкции (объема) КС, нагревание системы следует (предлагаю) проводить не источником многофакторного огневого факела, а лишь одной поверхностью нагретого тела (рис.6). Тогда в чистом виде можно будет более основательно, достоверно проанализировать истинные факторы (т. к. реакция, подчеркнем еще раз, эндотермическая), влияющие на степень и ход генерации  $[NO_x]$  в "горячем поле" Более конкретно будет вырисовываться картина, что не  $T_{пл}$  является определяющим параметром при этом, а тепловая мощность источника разогрева, т.е.  $\delta\%[NO_x] = f(P=U \cdot J)$ .

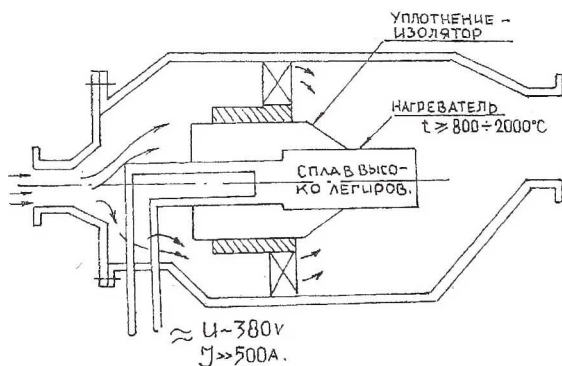


Рис. 6. Принципиальная схема тепловой установки для исследования окисления азота в атмосфере воздуха

### 3. ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОЧЕМУ ПРОЦЕССУ ДВУХЗОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ [4, 6]

Если тщательно проанализировать полное содержание конструкции таких КС, то все преимущество по минимизации оксидов азота основано

лишь на их многофорсуночности и, как следствие этого, мелкофакельном горении [5]. Учитывая это, следовало бы дежурную (пилотную) зону таких КС выполнять на обедненной смеси: выдерживать  $\alpha_{max}^I$  насколько позволяют ее рабочие параметры. Т. к. чем горячее I зона, тем больше она разогревает и свой, и основной зоны вторичный воздух. Высокотемпературный огненный факел из этой зоны “не дождет” незначительные проценты “пролетающего” со значительной скоростью остатка горючего во второй (основной) зоне КС. В этом смысле оказались пророческими высказывания академика Н. Д. Кузнецова [5], что “многогорелочные КС являются перспективным направлением современного двигателестроения”. Т.е. следуя принципу 2-х зонных КС, эти устройства можно выполнять и с n-зонами! Размер факела будет только меньше, что и снижает генерацию  $[NO_x]$ .

#### 4. РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПО МИНИМИЗАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА

Представляем принципиальную схему, концепцию гипотетической кольцевой камеры сгорания, см. рис. 7. Это устройство, работающее с любым углеводородным горючим (жидкое, газообразное) на атмосферном закомпрессорном воздухе, состоит из трех основных оболочек: на-

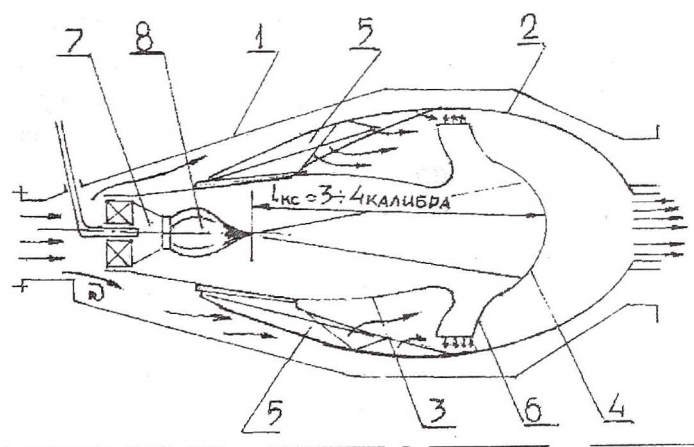


Рис. 7. Принципиальная схема кольцевой, трехкорпусной камеры сгорания, обеспечивающей минимизацию генерации  $[NO_x]$  в энергомашинах, работающих на атмосферном воздухе

ружного корпуса 1, внутреннего кольцевого кожуха 2 с отверстиями 5 (завихрителями) для подвода вторичного воздуха, горелок - форсунок 7. Внутренний кольцевой кожух 3 с насадком 4 сконструирован таким образом, что продукты сгорания выходят из него из отверстий 6 на расстоянии не менее 3...4 калибров от среза форсуночных горелок. За "калибр" принимается условная протяженность огневых факелов. Такая конструкция КС определяет весьма низкую температуру отходящих высокотемпературных газов, не более 1600...1800°C, что предварительно отрабатывается в модельных стендовых условиях. Такие газы будут сдерживать интенсивную генерацию  $[NO_x]$ . Такая конструкция порождает идеальное поле температур  $T_4$ , и вместе с тем, впервые в мировой практике создания камер сгорания ГТД исключает фактически определяющее влияние давления  $P_{КС}$  на рост  $[NO_x]$ , т. к., регулируя отдаленность патрубка 4, можем добиваться любых пониженных температур отходящих продуктов сгорания и тем самым уменьшаем разогрев и взаимодействие азота и кислорода во вторичном рабочем теле.

#### *5. ПРИЧИНЫ И УСЛОВИЯ, ПОСЛУЖИВШИЕ ОСНОВОЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДАННОЙ КОНСТРУКЦИИ КС*

На рис. 3 схематично изображено строение огневого факела, независимо, что это горелка КС ГТД или же бытовая свеча [1].

Многолетние исследования этого термического процесса показали, что конус (тело) огневого факела характеризуется следующими особенностями. Область А факела "холодная", она на 1,5...2 порядка ниже  $T_{нл. max}$ . Объем  $X_F$  представляет собой фактически ядро струи горючего, а точка "С"  $\approx T_{нл. max}$  (по температуре) есть граничная точка этого ядра, где, поразительно, сосредоточены все продукты горения и вся энергия, выделенная при окислении ядра горючего. В этой точке "С" - удельный вес вещества минимальный, а давление не превышает давления омывающего его вторичного воздуха. На расстоянии же 3...4 калибров - температура существенно снижается, а сами характеристики этой системы очень близки к параметрам газа, генерируемого соплом Лавала.

Обнаруженная такая структура огневого факела и послужила основой, толчком для выработки представленной конструкции. Здесь уже роль многофорсуночности сводится к минимуму, в смысле влияния на

выделение  $[\text{NO}_x]$ , а ее устройство существенно проще и технологичнее современных двухзонных КС.

### 6. ВЫВОДЫ.

- 6.1. Критически проанализирована работа [3] и дан ряд практических рекомендаций.
- 6.2. Проанализирована сущность так называемых двухзонных камер сгорания.
- 6.3. Предложена новая концепция кольцевых камер сгорания, способствующая действительной минимизации генерации оксидов азота.
- 6.4. Рассмотрены особенности строения термической системы огневого, двухкомпонентного факела как химического экзотермического реактора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарадей М. История свечи, М. 1980г., Библ. "Квант", вып. 2.
2. Кузнецов Н.Д., Рудницкий А.М. Трехкомпонентные камеры сгорания как эффективный метод организации низкотемпературного процесса горения в тепловых двигателях. Вестник СГАУ, вып. 2, СГАУ, г. Самара, 1999
3. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.. Окисление азота при горении. АН СССР, г. Москва, 1947
4. Гриценко Е.А., Лавров В.Н., Постников А.М., Цыбизов Ю.И. Основные направления совершенствования камер сгорания ГТД. Вестник СГАУ, вып. 2, г. Самара, 1999
5. Кузнецов Н.Д. и др. Многогорелочные камеры сгорания - одно из перспективных направлений развития двигателей. "Проблемы машиностроения и надежности машин", №2, г. Москва, 1995
6. Лавров В.Н. и др. Организация сжигания газообразного топлива в двухзонных камерах сгорания ГТУ. Вестник СГАУ, вып. 2, г. Самара, 1999
7. Рудницкий А.М. Способ высокотемпературного запуска Спец. тема. Авт. св. №61711, г. Куйбышев, 1972