

УДК 621.43.056+519.6

Д.А. ДОЛМАТОВ, В.Г. БУШАНОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

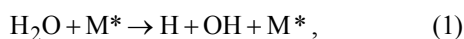
ЭМИССИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЕ ИНЪЕКЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПАРА

Статья посвящена исследованию зависимости эмиссионных характеристик камер сгорания с инъекцией водяного пара от распределения расхода пара между зонами горения. Рассмотрены обобщенные зависимости концентраций NO_x , CO и C_xH_y , а также конечной температуры от условий работы КС. Получены данные о механизме генерации вредных веществ при повышенной концентрации гидроксильных радикалов для различной начальной температуры пара. Разработана методика оценки общей эффективности процесса для широкого диапазона рабочих условий, обнаружены опасные с точки зрения возможности срыва пламени режимы.

Ключевые слова: *водяной пар, эмиссионные характеристики, гидроксильный радикал, зона горения, расход компонент, кинетическая схема.*

Введение и постановка задачи

Применение инъекции водяного пара для улучшения экологических характеристик ГТУ, несмотря на сравнительно низкую эффективность экстракции водяного пара из выхлопных газов, остается одной из наиболее эффективных методик понижения эмиссионных характеристик высокотемпературных камер сгорания [1]. Помимо снижения локальной и конечной концентраций NO_x , впрыск H_2O в основную зону горения при специфических значениях удельного расхода пара может стимулировать горение топлива. Оба полезных эффекта основаны на физико-химическом явлении повышения содержания гидроксильных радикалов за счет расщепления молекул перегретого пара по механизму:



где M^* – обобщенная частица среды, концентрация которой рассчитывается в зависимости от вида топлива.

При этом, согласно новейшим исследованиям [2], термический эффект от впрыска сравнительно холодного пара в высокотемпературный реактор, заключающийся в снижении генерации NO за счет уменьшения эффективной температуры среды, менее значителен по сравнению с кинетическим, поскольку порядок изменения химической активности азота вследствие косвенного ингибирования гидроксильными механизмов Зельдовича и Фенимора превосходит порядок изменения за счет смещения равновесия соответствующих реакций при понижении температуры среды, по крайней мере, при мощности охлаждения ΔT до 100 К.

Вместе с тем, проблематика конкурирующих эмиссионных показателей, а именно – выхлопов CO и C_xH_y , весьма актуальна и далека от разрешения, в особенности – при значительном объеме инжектируемого пара. Значительный интерес также представляет влияние разницы температур зон горения и инжектируемых потоков на показатели камеры сгорания. Нетрудно видеть [3], что в целом понижение температуры впрыскиваемого заряда приводит к монотонному понижению уровня производства NO , однако воздействие на другие характеристики потока в настоящее время изучено недостаточно. В частности, не установлена однозначная взаимосвязь между степенью охлаждения реакционной зоны и полнотой сгорания топлива; также представляет значительный интерес вопрос возникновения анизотропных высокоградиентных зон при глубоком охлаждении и их взаимосвязи со срывами пламени.

Задачей исследования является получение интегральных характеристик модельной кольцевой камеры сгорания при различных объемах двухзонной инъекции водяного пара. При этом предполагается, что обе ступени инъекции являются экологическими, т.е. вдув пара для повышения мощности турбины не предусмотрен. Проблемы очистки затурбинного выхлопа и эффективности утилизационных агрегатов цикла в настоящей работе не рассматриваются.

Модель ступенчатого впрыска пара

В рамках одномерной математической модели горения с улучшенной кинетикой [2, 4] для камеры сгорания с газообразным метановым топливом учет

влияния впрыска водяного пара различной температуры возможен при произвольном расположении и мощности инжекторов. На рис. 1 представлена схема жаровой трубы кольцевой камеры сгорания с двухступенчатым впрыском пара в сечениях с координатами x_{v1} и x_{v2} ; расход пара при этом составляет соответственно G_{v1} и G_{v2} при температурах T_{v1} и T_{v2} .

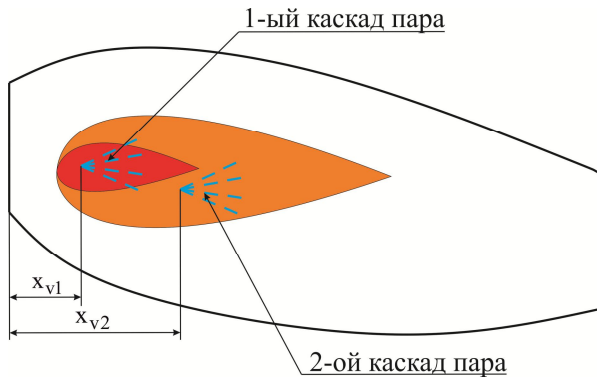


Рис. 1. Схема двухступенчатой инжекции пара

Для удобства адаптации расчетной схемы к различным условиям работы в математической модели используются безразмерные относительные величины:

$$\bar{x}_v = x_v / L_{KC}, \quad \bar{G}_v = G_v / G_K, \quad (2)$$

где L_{KC} – длина камеры сгорания;

G_K – расход воздуха на входе в КС.

Во всех численных экспериментах по исследованию процессов в камере сгорания расход воздуха и расход топлива предполагается постоянным. Уравнения общего баланса энергии, таким образом, выглядят как

$$\begin{aligned} & (1 + \bar{G}_{v1} + \bar{G}_{v2} + \bar{G}_f) \tilde{C}_{pKC} T_{KC}^* = \\ & = \bar{G}_{v1} C_{p1H_2O} T_{v1} + \bar{G}_{v2} C_{p2H_2O} T_{v2} + \\ & + C_{pa} T_K^* + (C_{pf0} T_{f0}^* + H_{UCH_4}) \bar{G}_f, \end{aligned} \quad (3)$$

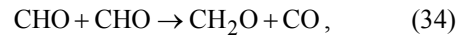
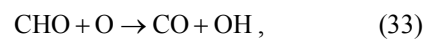
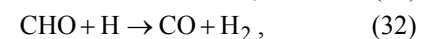
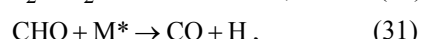
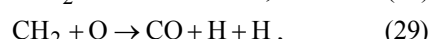
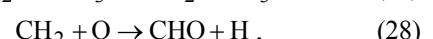
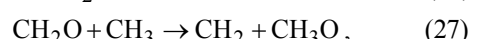
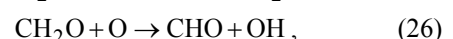
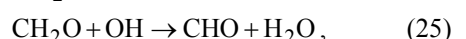
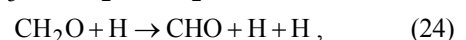
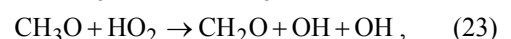
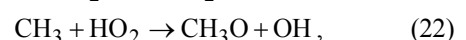
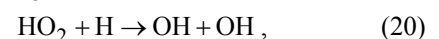
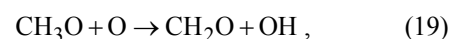
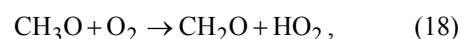
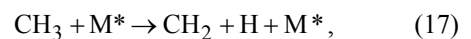
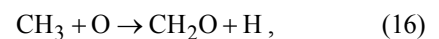
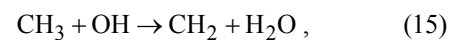
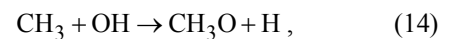
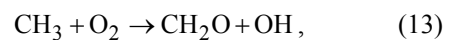
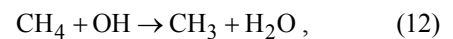
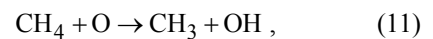
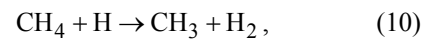
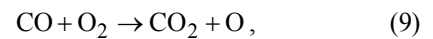
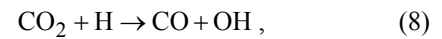
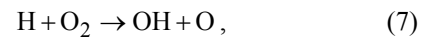
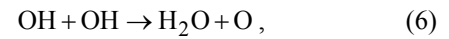
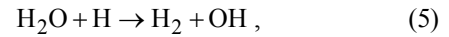
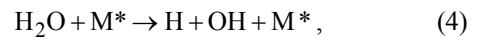
где \tilde{C}_{pKC} , C_{p1H_2O} , C_{p2H_2O} , C_{pa} , C_{pf0} – изобарные теплоемкости смеси, пара при температурах T_{v1} и T_{v2} , воздуха на входе в КС и топлива соответственно;

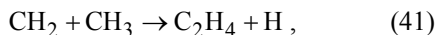
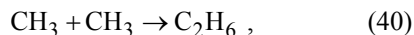
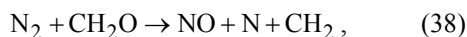
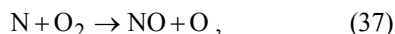
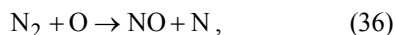
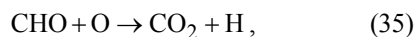
H_{UCH_4} – высшая теплотворная способность метана;

T_K^* , T_{f0}^* , T_{KC}^* – полные температуры воздуха на входе в КС, топлива и газовой смеси на выходе из КС соответственно.

Одномерная постановка задачи существенно снижает ресурсоемкость вычислительного процесса

и теоретически позволяет использовать полный генеральный баланс реакций, для метановых пламен не превышающий 300, включая механизмы генерации NO_x и других вредных веществ. Вместе с тем применяемые упрощения делают бессмысленным применение полного баланса, поскольку точность решения в данном случае определяется, в первую очередь, погрешностями аппроксимации распределения параметров конечными разностями линейной схемы, а не накапливаемой ошибкой исключения быстрых промежуточных реакций. В связи с этим в работе используется традиционная кинетическая схема с постоянным скоростьюопределяющим базисом, полученная методом анализа путей развития реакции [5]. Ниже приведены уравнения учитываемых реакций.





Все реакции (4) – (42) считаются квазиравновесными обратимыми, константы скорости определяются по Аррениусу [5]. Граничные условия задаются на входе и выходе из КС; на входе $\bar{G} = 1$, мольные доли всех веществ, кроме O_2 , N_2 , CO_2 , принимаются равными нулю; мольные доли компонент задаются согласно данным о среднестатистическом составе атмосферного воздуха [6]; на выходе $\bar{G} = 1 + \bar{G}_{V1} + \bar{G}_{V2} + \bar{G}_f$; мольные доли промежуточных компонент равны нулю; мольные доли продуктов реакции – не определены. К продуктам реакции в данном случае относятся: CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 , NO , O_2 .

Проточная часть камеры сгорания разбивается на линейные участки достаточно большим количеством сечений, при этом одно из сечений выбирается таким образом, чтобы ему принадлежал срез форсунки. В зоне зажигания, основной зоне горения и вблизи инжекторов густота сечений повышена для улучшения соответствия математической модели физическому процессу. В данной работе, при $L_{\text{КС}} = 388$ мм, проточная часть разбита на 1200 сечений; минимальный шаг 0,05 мм; максимальный 2,5 мм. Для определения калорического эффекта химических реакций при переходе между сечениями используется известное уравнение реагирующей среды:

$$\Delta Q = \int_{x_i}^{x_j} \frac{1}{C} \sum v_n Q_n dx, \quad (43)$$

где x_i , x_j – координаты сечений;

v_n , Q_n – скорость и калорический эффект n -ой реакции (4) – (42);

C – скорость движения сплошной среды.

Для используемой схемы скорость движения и температура в интервалах между сечениями представляются в виде полиномов 4-го порядка с переменными коэффициентами.

Гидравлические потери полного давления учитываются согласно полуэмпирической методике на основании данных холодных продувок и численных

экспериментов высокого уровня [6]. Тепловые потери задаются в виде функциональной зависимости

$$\sigma_T = f(\Phi_N), \quad (44)$$

где Φ_N – интенсивность реакционной нагрузки, определяемая по суммарному числу реакций на рассматриваемом интервале в единицу времени.

На рис. 2 представлены сравнительные данные высокоточного численного эксперимента по 3D-моделированию базового режима исследуемой КС без впрыска пара (полный генеральный баланс, критерий сходимости $\text{MAX} < 1 \cdot 10^{-5}$, 85М ячеек) и модельного расчета с помощью рассматриваемой одномерной методики.

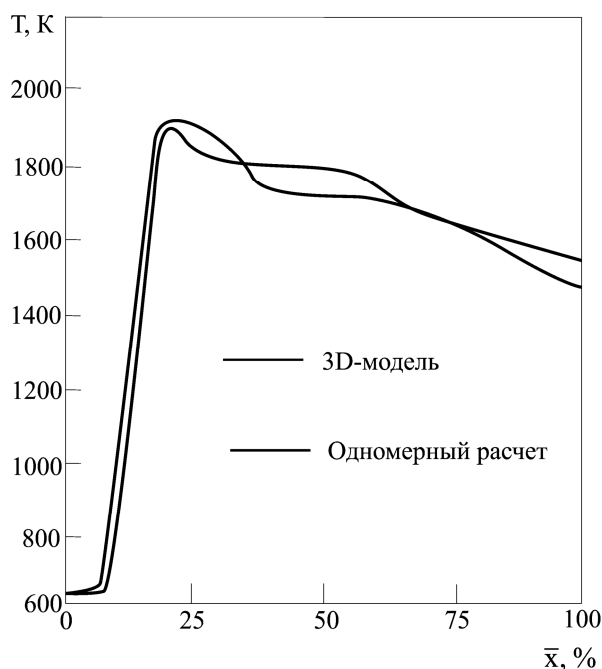


Рис. 2. Распределение температуры вдоль проточной части камеры сгорания

Как видно из рис. 2, погрешность при использовании одномерного метода расчета достаточно мала (максимально 5,16% по температуре в сечении с координатой $\bar{x} = 0,4766$), что позволяет утверждать о качественно и количественно достоверной картине, получаемой при использовании одномерной модели.

В работе рассматривается следующая конфигурация КС: координата форсунок $\bar{x} = 0,072$; координаты инжекторов $\bar{x} = 0,015$ и $\bar{x} = 0,03$. Физический расход воздуха, топлива и пара постоянен. Разница между скоростью впрыска и скоростью сплошной среды достаточно низкая (менее 30 м/с) для пренебрежения дополнительными гидравлическими потерями.

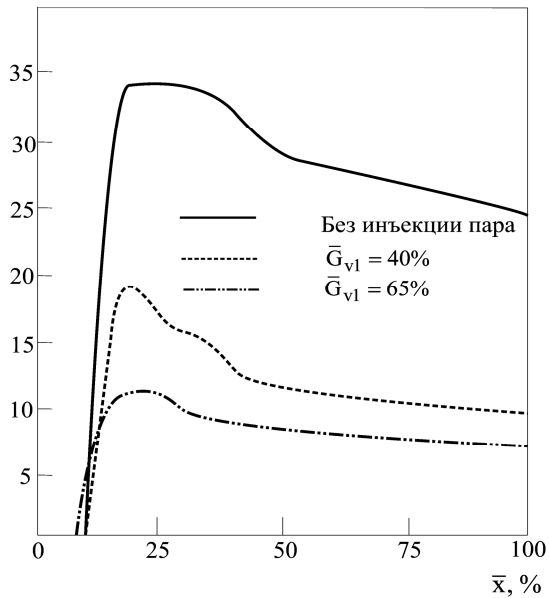
Результаты исследований

Контрольными параметрами при моделировании являются температура среды, концентрации $[NO]$, $[CO]$ и остаточная концентрация $[C_xH_y]$, определяемая в выходном сечении как

$$[C_xH_y] = [CH_4] + [C_2H_4] + [C_2H_6]. \quad (45)$$

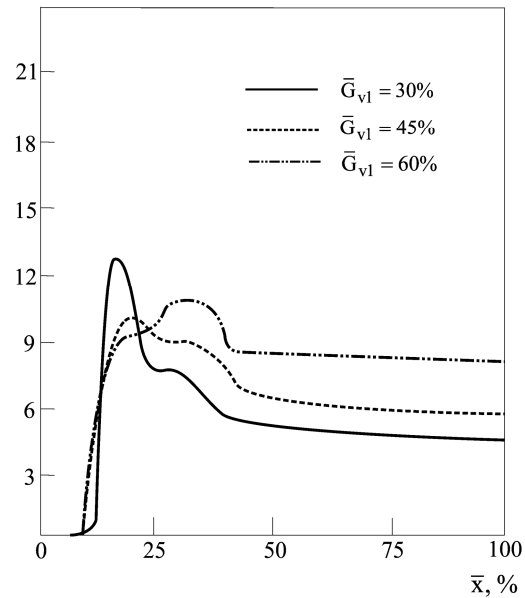
Результаты численного моделирования представлены на рис. 3, 4, 5. Помимо представленных на рисунках результатов, проводилось моделирование процессов в КС при распределении пара между инжекторами вплоть до $\bar{G}_{v1} = 100\%$ (проценты в данном случае указаны от общего расхода пара через камеру сгорания).

NO, ppm



а – $T_{v1} = 850K, T_{v2} = 700K$

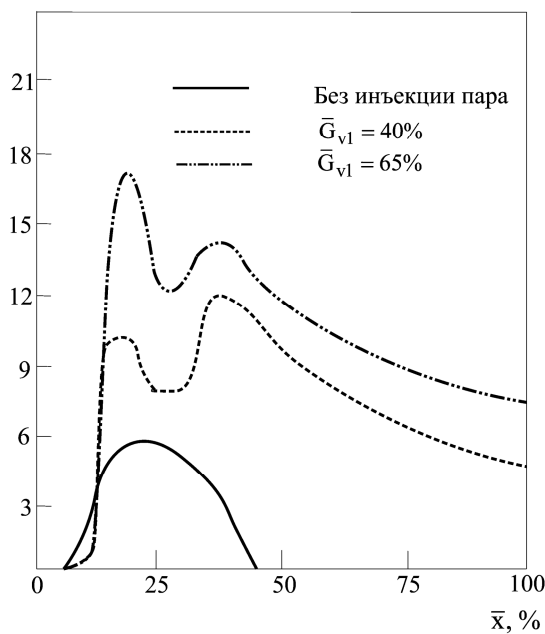
NO, ppm



б – $T_{v1} = 700K, T_{v2} = 700K$

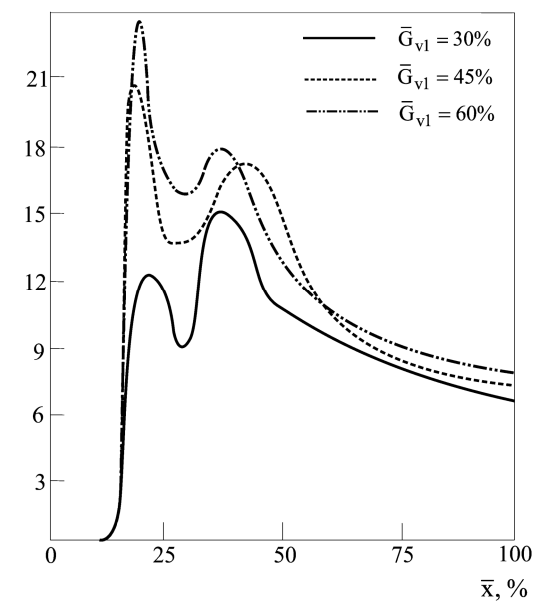
Рис. 3. Генерация NO

CO, ppm



а – $T_{v1} = 850K, T_{v2} = 700K$

CO, ppm



б – $T_{v1} = 700K, T_{v2} = 700K$

Рис. 4. Генерация CO

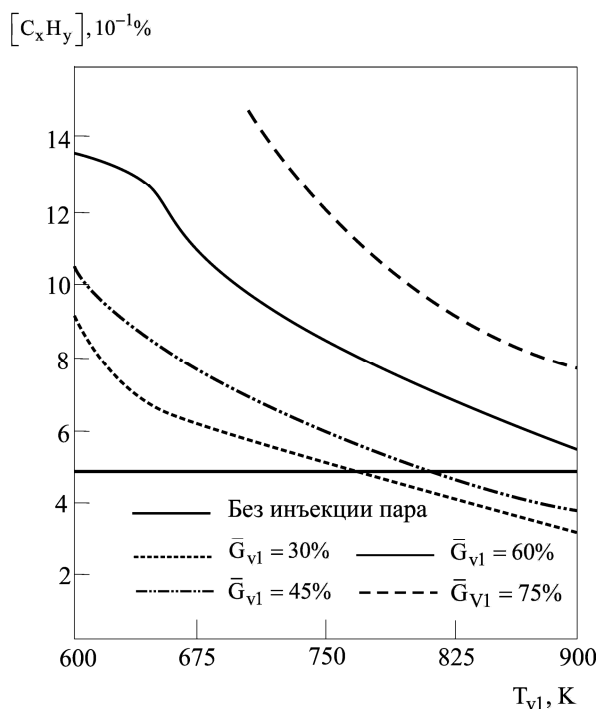


Рис. 5. Остаточная концентрация углеводородов

Особо следует отметить установленную в ходе численных исследований опасность развития срыва пламени при значениях $\bar{G}_{V2} > 85\%$ и $T_{v1} < 650\text{K}$. При значениях параметров, близким к указанным, процесс установления решения становится резко нелинейным и теряет устойчивость, что связано с возможным видоизменением кинетической схемы. В связи с этим на рис. 5 для ветки $\bar{G}_{V1} = 75\%$ не приведены данные для температур $T_{v1} < 700\text{K}$.

Выводы

Полученные данные численного моделирования позволяют установить взаимосвязь между эмиссионными показателями камеры сгорания и схемой подачи пара при двухзонной инъекции.

Установлен нелинейный характер зависимости скорости производства NO в высокотемпературной зоне от расхода пара – в частности, представленные на рис. 3, б, данные демонстрируют наличие локального увеличения производства оксида азота в окрестности второго инжектора при малых значениях расхода. Наиболее вероятным объяснением данного эффекта на данном этапе, очевидно, следует

признать большее сродство сравнительно холодного пара при рассматриваемом значении \bar{G}_{V2} к участию в реакциях производства монооксида азота по механизму (38), чем к гидроксильным атакам на остаточные углеводороды; в соответствующей зоне при впрыске малых доз пара наблюдается локальный максимум производства CH_2O .

Ингибирование реакций окисления углеводородов при значительном увеличении концентраций сравнительно холодной H_2O приводит к инициированию цепей образования этана и этилена, конкурентно запрещенных в обычном метановом пламени рассматриваемой КС, что приводит к увеличению эмиссии C_xH_y и снижению полноты сгорания.

На основании полученных данных возможно решение оптимизационной задачи проектирования КС со ступенчатым впрыском, что представляет собой задачу дальнейшего исследования.

Литература

1. Арсеньев, Л.В. Комбинированные установки с парогазовыми турбинами [Текст] / Л.В. Арсеньев, В.Г. Тырышкин. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
2. *Experimental investigation and modeling of prompt NO formation in hydrocarbon flames* [Text] / H. Bockhorn, C. Chevalier, J. Warnatz, V. Weyrauch // HTD. – 1991. – Vol. 166.
3. Волков, В.А. Численное моделирование процесса нейтрализации окиси углерода и оксидов азота дозированным впрыском воды в высокотемпературную смесь продуктов сгорания [Текст] / В.А. Волков, В.Р. Мусин, У.Г. Пирумов // Изв. РАН МЖГ, 1993. – № 6. – С. 96.
4. Eggels, R.L. *Mathematically reduced reaction mechanism applied to adiabatic flat hydrogen/air flames* [Text] / R.L. Eggels, L.P.H. Goey // *Combustion and Flame*, 1995. – P. 559-570.
5. Варнати, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнати, У. Маас, Р. Диббл. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 352 с.
6. Ландау, Л.Д. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

Поступила в редакцию 3.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры 201 В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

**ЕМІСІЙНІ ПОКАЗНИКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ
ПРИ СТУПЕНЕВІЙ СХЕМІ ІН'ЄКЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО ПАРУ***Д.А. Долматов, В.Г. Бушанова*

Стаття присвячена дослідженню залежності емісійних характеристик камери згоряння з ін'єкцією водяного пару від залежності розподілу пару поміж зонами горіння. Розглянуто узагальнені залежності концентрацій, а також кінцевої температури від умов роботи КЗ. Отримано дані щодо механізмів утворення шкідливих речовин при підвищеній концентрації гідроксильних радикалів для різноманітної початкової температури пару. Розроблена методика оцінки загальної ефективності процесу для широкого діапазону робочих умов, знайдені небезпечні щодо можливості зриву полум'я режими.

Ключові слова: водяний пар, емісійні характеристики, гідроксильний радикал, зона горіння, витрати компонент, кінетична схема.

**EMISSION CHARACTERISTICS OF THE COMBUSTION CHAMBER
WITH CASCADE SCHEME OF VAPOR INJECTION***D.A. Dolmatov, V.G. Bushanova*

The article is belong to researches of the vapor cascade and zonal distribution influence on the combustion chamber emission characteristics. There were considered general links between NO_x , CO и C_xH_y concentrations and combustion chamber work regimes. The mechanism of dangerous material generation in the presence of hydroxyl radicals' increased concentration and in depend of initial vapor temperature had been discovered. There was developed the method of injection process efficiency initial evaluation (for various initial conditions), the unsafe regimes with increased probability of flame break have been founded.

Key words: steam vapor, emission characteristics, hydroxyl radical, the burning zone, component consumption, kinetic scheme.

Долматов Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ditrihantelson@yandex.ru.

Бушанова Виолетта Галиевна – студентка 6-го курса кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.