

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ ДОЖИГАНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ДВИГАТЕЛЕМ НК-37

© 2007 Д. Ю. Бантиков, В. Н. Лавров, А. М. Постников

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, Самара

В данной статье представлены результаты численного моделирования процессов смешения и горения смеси газов в камере дожигания блока дожигающего устройства, разработанного для парогазовой установки. Описаны особенности конечно-элементной модели элемента системы стабилизации. Приведены и проанализированы уровни температур, полноты сгорания и эмиссии оксидов азота для различных режимов работы.

Для сокращения времени конструкторских разработок и уменьшения материальных затрат на испытания и доводку камер сгорания находят все большее применение пакеты программ, предназначенные для определения параметров и характера процессов горения, протекающих в двигателе.

Таким образом, конструктор получает возможность перед изготовлением и испытанием деталей и узлов провести исследование математических моделей этих узлов, получая результаты с большой вероятностью достоверности. Это позволяет увеличить число рассматриваемых вариантов конструкции для выбора наиболее оптимального, уменьшить число натурных испытаний, а значит сократить время и уменьшить стоимость изготовления и доводки узлов.

В данной работе представлены результаты численного моделирования процессов смешения и горения смеси газов в камере дожигания (КД) блока дожигающего устройства (БДУ), разрабатываемого для парогазовой установки. При проведении расчетов ставились задачи оптимизации конструкции системы стабилизации горения, системы подвода топлива и оценки величины эмиссии оксидов азота и полноты сгорания на выходе из КД.

Для выполнения данных задач разработан набор моделей системы стабилизации, различающихся размерами и конструкцией стабилизаторов, числом ячеек сетки и заложеными моделями образования оксида азота. На основании анализа результатов расчета созданных моделей определена оптималь-

ная система стабилизации процесса горения и подводов топлива.

На базе выбранной оптимальной конструкции системы стабилизации горения и подвода топлива создана окончательная конечно-элементная модель камеры дожигания, состоящая из двух частей и обеспечивающая достаточную точность вычислений при приемлемом времени расчета.

Первая часть представляет собой симметричный сектор проточной части камеры дожигания, включающий в себя половину горизонтального стабилизатора с восемью форсунками, центральный цельный радиальный стабилизатор и трубку подачи топлива на радиальный стабилизатор с восемью форсунками (рис. 1). Длина зоны горения за стабилизатором ограничена одним метром. Вторая часть модели представляет собой прямоугольник длиной девять метров, имитирующий область за стабилизаторами первой части, в которой происходит процесс догорания и перемешивания потоков газа.

Сетка моделей комбинированная (рис. 2). На входе в первую модель и в отверстиях подвода топлива (метана) задается граничное условие массового расхода рабочего тела с равномерным профилем скорости. На выходе из модели задается постоянное по сечению статическое давление. По бокам модели указывается условие симметрии сектора в составе системы стабилизации. К поверхностям, определяющим объемы твердых тел модели, применяется условие “прилипания” потока.

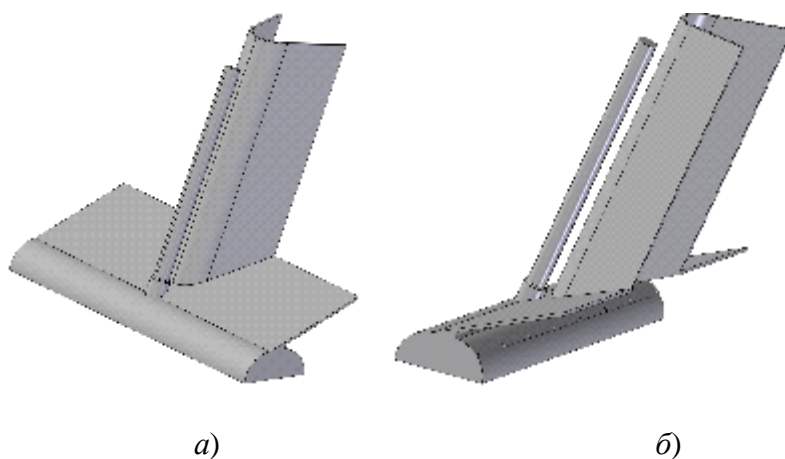


Рис. 1. Стабилизатор пламени камеры дожигания: а – вид по потоку; б – вид против потока

На входе во вторую модель задается граничное условие скоростного входа. При этом задаются поля скоростей, температур и составляющих смеси, полученные в выходном сечении первой части модели и перенесенные во вторую часть модели через промежуточный файл.

Модель системы стабилизации пламени рассчитывалась в статической постановке задачи с применением двухпараметрической стандартной модели турбулентности $k-\epsilon$.

При моделировании процесса горения считалось, что наблюдается горение чистого метана в затурбинных газах ГТУ в пределах

модели конечных объемов/распада вихря *Finite-Rate/Eddy-Dissipation*, представляющей собой моделирование уравнений переноса, описывающих конвекцию, диффузию и источниковые члены каждого компонента смеси.

При расчете величины образования оксидов азота NO_x использовались модели образования “термических” NO (образуются вблизи поверхности стехиометрии в зоне высоких температур) и “быстрых” NO (образуются в первичной зоне сгорания через реакции N_2 с углеводородными радикалами), образование NO из топлива и через реакции

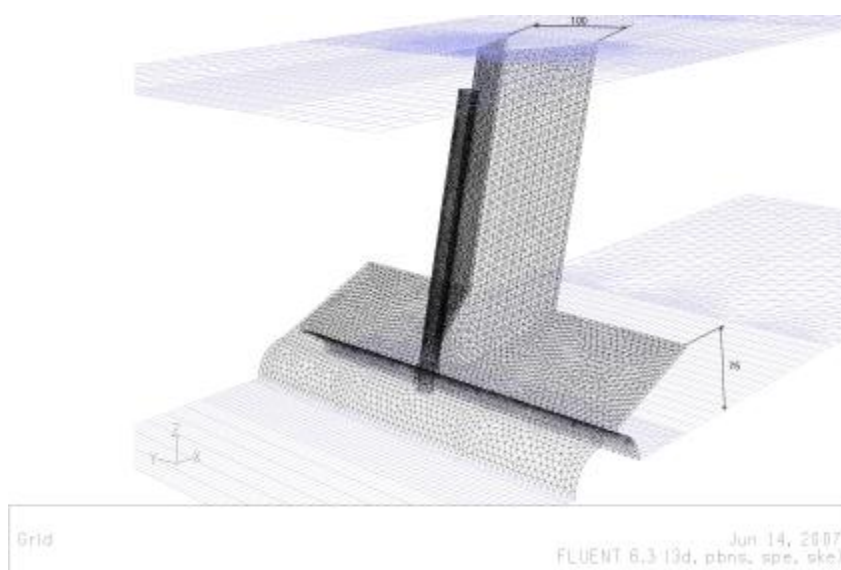


Рис. 2. Сетка ячеек расчетной модели стабилизатора

с N_2O . При расчете также применялся механизм уменьшения концентрации NO (“дожигания NO ”).

Результаты расчетов первой модели на максимальном режиме работы ($t_H = -30$ °С, $N = 100$ %) представлены на рисунках 3...5.

На рисунке 3 даны линии тока, демонстрирующие обтекание вертикального уголка. Рисунки 4 и 5 демонстрируют распределение температуры газа и массовой концентрации оксидов азота за вертикальным уголком. Как показывают расчеты, картина течений и процессов смешения и горения топлива на других режимах работы камеры дожи-

гания качественно не отличается от картины, рассчитанной для максимального режима и приведенной на рисунках 3...5.

На рис. 6 представлен процесс смешивания горячего и холодного газа во второй части модели.

В результате проведенных расчетов были определены параметры рабочего процесса в КД. Расчет значений проводился методом осреднения величин по массе в выходном сечении модели. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Проведенные расчеты созданной математической модели позволили не проводя

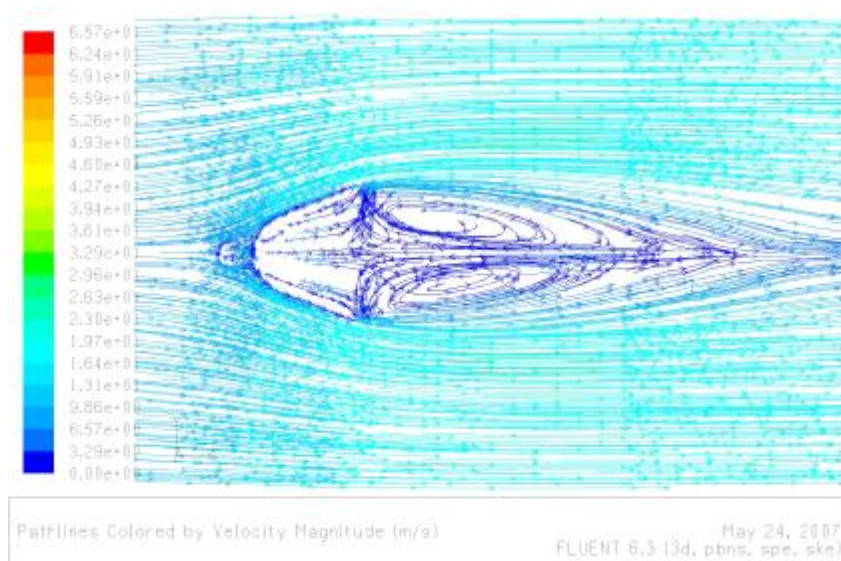


Рис. 3. Течение в плоскости вертикального уголка

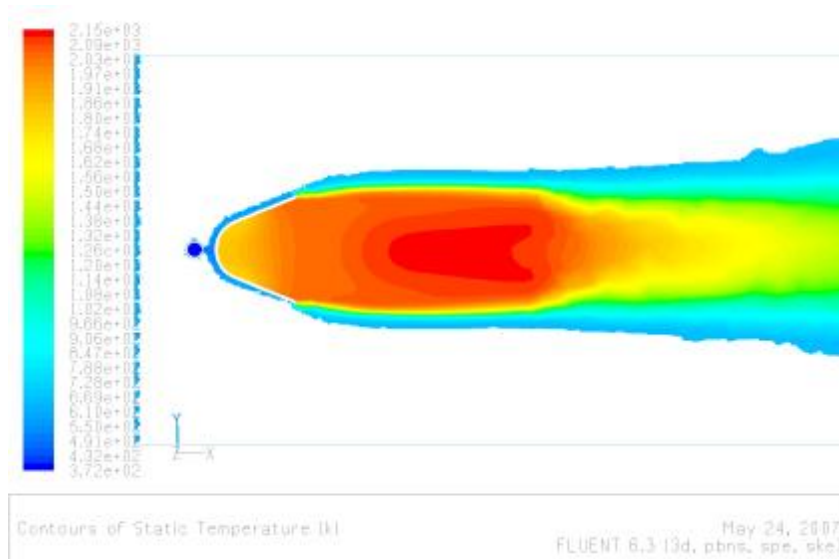


Рис. 4. Линии постоянной температуры за вертикальным уголком

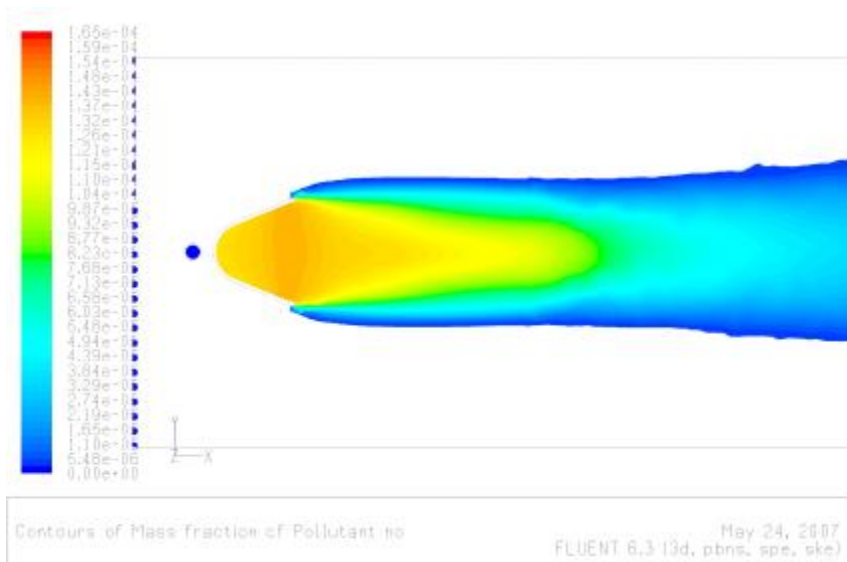


Рис. 5. Линии постоянной массовой концентрации оксидов азота за вертикальным углом (кг/кг)

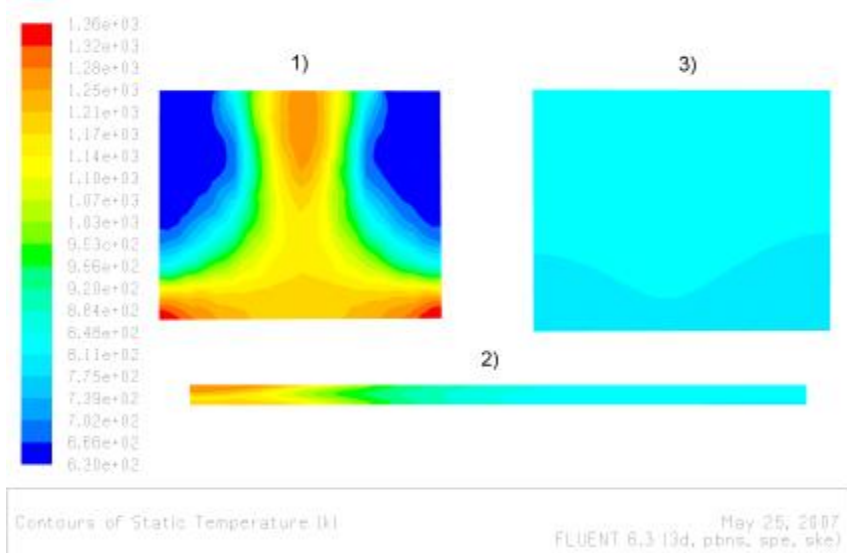


Рис. 6. Линии постоянной температуры в продольной плоскости X-Z (2) и в плоскостях Y-Z на входе (1) и на выходе (3) из КД

экспериментальных исследований выбрать близкую к оптимальной компоновку камеры дожигания и оценить ее основные характеристики. На основании проведенных расчетов для выбранной конструкции можно ожидать, что:

1. Фронтное устройство с выбранными размерами стабилизаторов обеспечивает температурное поле с неравномерностью 20°C .

2. Величина полноты сгорания топлива составляет $99,9\%$ и сохраняется постоянной по режимам работы установки.

3. Величина прироста эмиссии оксидов азота NO_x при изменении режима работы БДУ мало меняется и составляет около 12 ppm .

4. При увеличении коэффициента избытка топлива a наблюдается уменьшение области горения, снижение температуры на выходе из камеры дожигания, снижение полноты сгорания топлива и уменьшение величины выбросов оксидов азота. Увеличение температуры затурбинных газов приводит к увеличению температуры на выходе из камеры дожигания и росту величины выбросов

Таблица 1. Рассчитанные параметры на выходе из БДУ

t_H	°С	-30		+30	
N	%	50	100	50	100
$T_{\text{вых сред.}}$	К	797,44	813,97	839,90	817,73
$d_{T_{\text{теор}}}$	%	-0,57	-2,65	-2,07	0,64
$C_{\text{CH}_4, 10\text{м}}$	%	0,0415	0,0374	0,0275	0,0638
$C_{\text{O}_2, 10\text{м}}$	%	14,946	15,238	15,711	16,274
$h_{\text{БДУ}}$	%	99,959	99,963	99,973	99,936
$W_{\text{вых сред.}}$	м/с	9,1352	11,795	10,195	9,6194
C_{NO_x}	мг/кг	8,3572	8,8114	11,567	9,7341
C_{NO_x}	мг/нм ³	17,322	18,231	23,846	19,989
C_{NO_x}	ppm	8,4340	8,8755	11,610	9,7320

оксидов азота. Совместное влияние этих факторов приводит к тому, что при изменении режима работы величина выбросов оксидов азота остается примерно на одном уровне.

5. Основной вклад в образование оксидов азота вносят “термический” и “быстрый” механизмы образования NO . Величина образования NO из топлива и через реакции с N_2O и уменьшения концентрации NO вследствие реакции с продуктами сгорания (“дожигания” NO) незначительна.

6. Было определено, что основной механизм образования оксидов азота - “термический”. Поэтому величина массовой концентрации NO растет по мере удаления от стабилизатора, что объясняется ростом температур. Так как наблюдается распространение огневого факела за пределы первой модели, то на режимах работы установки с высокими расходами топлива величина концентрации NO будет заниженной.

7. Величина температуры на выходе из камеры дожигания возрастает по высоте модели. Это связано с высокими температурами за радиальным стабилизатором и его наклоном по потоку газа.

8. Аэродинамика течения во фронтальном устройстве показывает, что имеется развитие обратных токов в следе за стабилизаторами, соответствующих теоретическим данным и в плоскости симметрии поперечного стабилизатора существует вихрь, направленный вдоль стабилизатора. Оба фактора способствуют хорошей стабилизации пламени и надежному пламяперебросу от дежурной

зоны фронтального устройства к основным стабилизаторам.

На основании анализа разработанной модели системы стабилизации можно сделать следующие заключения:

9. Результаты расчетов, полученные в случае применения плоских моделей, могут носить только ориентировочный характер, так как плоская модель не позволяет достоверно смоделировать процесс подачи топлива из форсунки.

10. Характер получаемой картины обтекания стабилизаторов (форма и число обратных токов) зависит от размеров, числа и распределения элементов. Слишком большой размер элемента в данной модели может привести к сильному осреднению параметров потока и разрушению вихря. Поэтому размер элемента следует выбирать в 10...20 раз меньше характерного размера вихря. Число элементов по длине модели определяет характер представлений о смешении потоков. Большой размер элементов в данной модели приводит к “затягиванию” процесса смешивания и горения.

11. Форма и число зон обратных токов в модели, а также их расположение в пространстве зависят от формы и размеров трехмерной модели. Наиболее общую картину течения дает совместная модель радиального и горизонтального стабилизаторов.

В заключение следует отметить, что точность получаемых результатов напрямую зависит от сложности применяемой модели и числа конечных ячеек. Точность результа-

тов может быть повышена при использовании единой модели, состоящей из нескольких цельных стабилизаторов и разбитой на мелкоэлементную сетку. В условиях ограниченности машинных ресурсов хорошие результаты обеспечивает разбиение модели на отдельные части, связанные данными в промежуточных файлах.

Список литературы

1. Ю. Г. Куценко. Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей. - Екатеринбург-Пермь: УрО РАН, 2006. – 142 с.
2. Ф. Г. Тухбатуллин, Р. С. Кашапов. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок. – М.: ОАО Издательство “Недра”, 1997. – 155с.: ил.