

*И.Н. Зеленев, В.Ю. Польшиков, А.А. Добросоцкий, А.А. Алекторов**

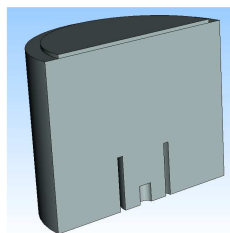
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ В ДИФфуЗИОННОЙ ГОРЕЛКЕ ДЛЯ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработка безопасной и энергоэффективной технологии синтеза углеродных наноструктурных материалов при горении топлива в диффузионном режиме в присутствии катализаторов является весьма актуальной задачей.

Для идентификации процессов, протекающих при сжигании топлива в горелочных устройствах, необходимо спрогнозировать ход и параметры гидродинамических и тепло-массообменных процессов. Моделирование течения с горением является наиболее сложной задачей движения газа. Данная проблема может эффективно решаться в системе вычислительной гидродинамики FlowVision (компания «ТЕСИС», г. Москва). Виртуальный эксперимент в системе вычислительной аэрогидродинамики, в отличие от натуральных испытаний, значительно снижает трудоемкость подготовительных мероприятий, упрощает экспериментальную часть работы, более наглядно и детально раскрывает суть происходящих процессов при горении топливных компонент в диффузионной горелке с «реальными» размерами и расходами газов.

Для моделирования процесса в диффузионной горелке с кольцевым соплом для подачи воздуха построена 3D-модель газовой области в системе T-Flex CAD 3D (рис. 1).

Геометрия из T-Flex CAD экспортировалась через обменный формат Stereo Lithography (stl) и подгружалась в систему FlowVision. В препроцессоре выбиралась осесимметричная задача, устанавливались начальные параметры соответствующие нормальным условиям, из стандартной библиотеки загружались свойства компонентов, подаваемых на горение (воздух и пропан-бутан), и свойства продуктов сгорания для заданной смеси, создавался фильтр одноразового зажигания в параллелепипеде и задавались граничные условия (названия границ указаны стрелками на рис. 2).



**Рис. 1. Разрез
3D-модели
диффузионной
горелки**

* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, доцента ФГБОУ ВПО «ТГТУ» А.А. Баранова.

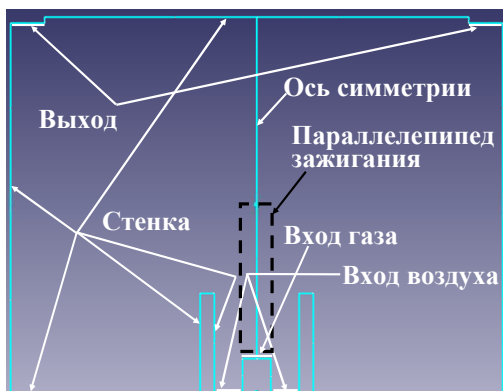


Рис. 2. Граничные условия при моделировании процесса в диффузионной горелке

В качестве начальных значений и физических параметров модели задавались начальная температура $T = 293$ К; давление 101 325 Па; пульсация 0,03; масштаб турбулентности 0,01 м, стехиометрический коэффициент $k_m = 15,67$ (для топливной смеси пропан-бутан + воздух); температура воспламенения 750 К; диапазон коэффициента избытка окислителя, в котором горение поддерживается самопроизвольно $\alpha = 0,02...3$, выбиралась пульсационная модель химической кинетики процесса.

Для расчетной подобласти генерировалась начальная прямоугольная сетка с разбиением на 50 участков по координатным осям.

Рассматривался процесс горения обогащенной топливной смеси, обеспечивающий высокий выход углеродного депозита ($\alpha = 0,4$; $k_m = 6,9$), при этом задавались следующие параметры:

- «Стенка» – тип границы «Стенка», логарифмический закон изменения скорости;
- «Вход газа» – тип границы «Вход/Выход», температура 20 °С, концентрация 1, нормальная массовая скорость $0,1139 \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·с);
- «Вход воздуха» – тип границы «Вход/Выход»; температура 20 °С, концентрация 0, нормальная массовая скорость $0,10834$ кг/(м²·с);
- «Выход» – тип границы «Свободный выход»;
- «Параллелепипед зажигания» – для расчета «холодного» течения – «Неактивный», для расчета горения – «Одноразовый».

Процесс моделирования включал два этапа. На первом рассчитывалось «холодное» течение газовых компонент без горения. При этом обеспечивалось некоторое распределение коэффициента избытка

окислителя α внутри горелки, при котором горючее достигает границы «Выход». После того как было получено распределение коэффициента избытка окислителя, проводилась инициация процесса горения в «параллелепипеде зажигания» с использованием подготовленного фильтра зажигания (переключение режима «Неактивный» в режим «Одноразовый»).

Расчет проводился до стационарного состояния, которое контролировалось по погрешности основных расчетных переменных (точность расчета 10^{-4}).

Для диффузионной горелки с заданным расходом горючего и окислителя получены распределения коэффициента избытка окислителя (рис. 3, а), скоростей (рис. 3, б) и температуры (рис. 3, в).

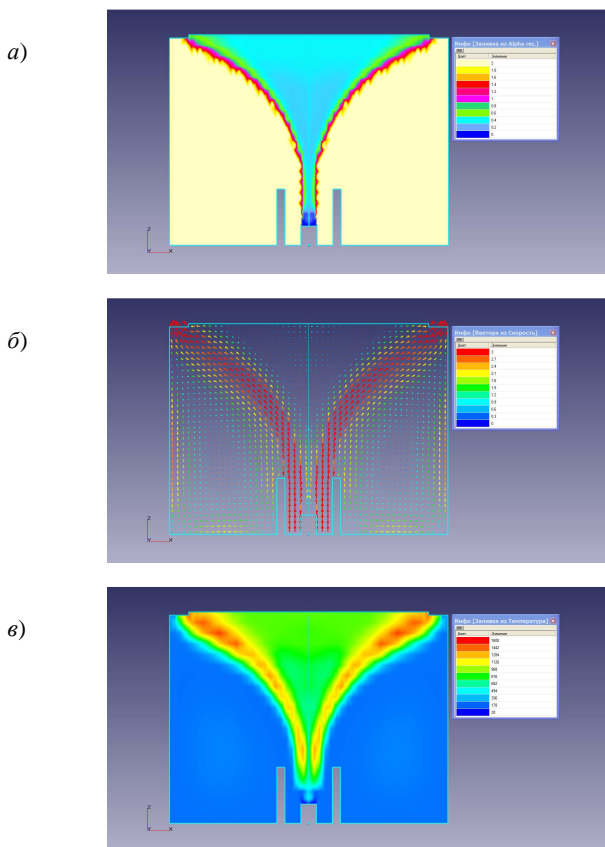


Рис. 3. Результаты моделирования

Анализ результатов моделирования показывает, что в горелке при раздельной подаче горючего и окислителя с заданными параметрами наблюдается неоднородное смесеобразование с коэффициентом избытка окислителя близким к стехиометрическому вблизи границы расширяющегося «конуса», образованного истекающим из центрального сопла горючим. Область богатой топливной смеси, в которой может образовываться углерод в конденсированной фазе, сосредоточена в конусе под центральной частью подложки-саженакопителя.

На векторном поле скоростей видно, что по периферии наблюдается циркуляция потока продуктов сгорания (не происходит проскок компонентов топливной смеси без реагирования). То есть в установленном режиме можно эффективно регулировать соотношение окислитель/горючее, варьируя их расход на входе в горелку.

На подложку-саженакопитель при заданных расходах поступают продукты сгорания с разной температурой.

Следует отметить, что при более мягких режимах горения с меньшим расходом компонентов пламя имеет фактически цилиндрическую форму от среза сопла и расширяется на конус малой высоты только вблизи подложки-саженакопителя. При этом диаметр конуса в области сечения подложки-саженакопителя зависит от расходов газовых компонент.

Все сделанные заключения в полной мере подтвердились при физическом моделировании процесса диффузионного горения на лабораторной установке. При этом наряду с качественными показателями, подтверждены и количественные результаты, в частности с погрешностью 5% определена температура в ядре потока под подложкой-саженакопителем.

Таким образом, система вычислительной гидродинамики FlowVision является эффективным средством моделирования и получения достоверных сведений о процессах при диффузионном горении топливных смесей.

Однако следует отметить, что расчет даже с использованием современных средств компьютерной техники требует значительных затрат времени. Результаты моделирования, представленные на рис. 3, были получены за 8 часов непрерывного расчета на компьютере с четырехядерным процессором Intel® Core™ i5-750 с тактовой частотой ядра 2,66 ГГц.

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопроductов»
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*