

Результаты 3D расчетов представлены пространственными полями и осредненными графиками изменения для шести поперечных сечений по длине жаровой трубы полных давлений  $p^*$ , температур  $T^*$ , скоростей  $c$ , статических давлений газа  $p$  и концентраций всех семи химических компонентов. Данные о химическом составе продуктов сгорания использовались для определения восстановленных концентраций воздуха и топлива. В результате для каждого участка ЖТ определены или восстановлены: 1) количество фактически сгорающего топлива, интегральные и дифференциальные кривые его выгорания; 2) количества воздуха, уча-

ствующего в горении и смешении, график изменения расходов воздуха по длине ЖТ.

Графики изменения некоторых параметров по длине ЖТ по данным 1D и 3D расчетов качественно и количественно согласуются достаточно удовлетворительно и объяснимы, особенно по  $T_{ж}^*$ . По образованию  $NO$  результаты пока не удовлетворительные.

Результаты аналогичных 1D расчетов по КС CF6-80 одного из авторов данной работы сравниваются с результатами 1D расчетов и с осредненными результатами 3D расчетов других исследователей.

УДК 535.36: 621.43.056

## ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛИВАНИЯ И ГОРЕНИЯ

Диденко А.А., Мишенков С.Ю., Рычков Н.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет

### OPTIMIZATION OF PRODUCTION ENGINEERING OF APPLICATION LAZERNO-OPTICAL METERS IN PROBES OF PROCESSES OF THE ATOMIZATION AND COMBUSTION

*Didenko A.A., Mishenkov S.J., Rychkov N.A. Problems of creation and application of lazerno-optical metres for probe of processes of an atomisation of wet fuel and its combustion are taken up. The integrated method is applied to measurement of sizes of drops малоуглового a diffraction scattering of monochromatic light. Are mastered a laser Doppler sensor of speed (LDA) a gas stream and fazo-doplerovsky a metre of sizes and speeds of drops (PDA). Physical and mathematical models of energy state of molecules and obtaining of spectrums of dispersion of laser radiation for molecular spectrum analysis methods (CARS, LIF) develop. The CARS-oscillating-rotational spectrum calculated for hydrogen is compared with measured, the calculated overlapping integrals of wave functions of electronic transitions are compared to literary data.*

В ведущих аэрокосмических НИЦ и университетских лабораториях для изучения процессов в тепловых двигателях широкое применение находят лазерно-оптические измерительные методы.

В НИЛ-49 СГАУ в конце 1980-х годов была создана экспериментальная установка УПФ-372 для проливок форсунок, оснащенная измерительными системами для определения расходных характеристик форсунок,

расходно-геометрических и дисперсных характеристик факелов распыла жидкого топлива. Для определения средних диаметров капель (СДК) и функции распределения капель по диаметрам  $f(D)$  применяется лазерно-оптический измеритель, который был изготовлен на основе методических рекомендаций и опыта разработок ЦИАМ. Принцип действия прибора основан на реализации ме-

тогда малоуглового дифракционного рассеяния коллимированного лазерного излучения на оптически крупных частицах - каплях (рассеяние Ми).

СДК по-Заутеру определяется по обновленному методу обобщенной индикатрисы Доббинса, Глассмена, Крокко. Его величина может быть также проконтролирована по расчетному варианту метода интегрирующей диафрагмы (ЦИАМ, В.И. Ягодкин, А.Г. Голубев). Функция распределения  $f(D)$  находится путем решения обратной задачи светорассеяния. Она состоит в том, что по измеренному распределению интенсивности в потоке рассеянного каплями света (индикатриса рассеяния) математическими методами отыскивается  $f(D)$ . Как известно, эта задача относится к классу плохообусловленных, и для её надежного решения были реализованы и используются несколько взаимодополняющих методов. Это: метод матричного псевдообращения Гревилля, метод аналитически точного интегрального обращения К.С. Шифрина, вариационный метод минимизации обобщенной невязки методом условного градиента, а также один из вариантов метода регуляризации А.Н. Тихонова. Для отладки методик оптических измерений и тестирования программ обработки данных решались прямые (расчет индикатрисы рассеяния света) и обратные (определение  $f(D)$  из обращения индикатрисы) задачи светорассеяния. Также использовались специально приготовленные математические модели и физические макеты полидисперсных сферических и круглых частиц, заменяющие капли распыленного топлива.

Для измерения локальных значений средней и пульсационной составляющей скорости газового потока в факеле форсунки или в камере сгорания планируется применять 3D-LDA ЛАД-056С (г. Новосибирск, ИТ СО РАН). Для измерения размеров и скоростей капель распыленного топлива, а также для измерения скоростей несущего газового потока планируется применять 3D-LDA-PDA (Dantec Dynamics, Дания). Оба измерителя закуплены в 2009-2010 гг. для НОЦ газодинамических исследований СГАУ на средства от участия университета в инновационных научно-образовательных про-

граммах. В настоящее время ЛАД-056С осваивается на задачах по измерению скоростей воздуха в закрученных потоках и при обтекании шара. 3D-LDA-PDA измеритель установлен на экспериментальной установке УПФ-372 для исследования работы форсунок и подготавливается к измерению параметров мелкости и скоростей капель в факелах распыла форсунок ГТД.

Важной задачей исследования процессов горения является измерение температуры газа и концентрации химических компонентов в турбулентных высокотемпературных потоках и пламени, а также наблюдение мгновенной пространственной структуры пламени. Для этих целей возможно применение лазерно-оптических измерительных методов CARS или LIF молекулярной спектроскопии (CARS – когерентное антистоксово рассеяние света, LIF – лазерно-индуцированная флуоресценция).

В настоящее время изучаются возможности и физико-методологические основы лазерно-оптических измерительных комплексов, реализующих методы CARS или LIF молекулярной спектроскопии. Для этой цели разработана на основе известных из литературы сведений квантово-механическая математическая модель энергетического состояния двухатомных молекул и их взаимодействия с лазерным излучением (на основе Трудов ИОФРАН (г.Москва), DLR (Германия) и материалов справочников под редакцией академика В.П. Глушко). Для проверки модели энергетического состояния молекул для нескольких температур газа рассчитаны необходимые теплофизические характеристики  $H_2$ , находящегося в основном электронном состоянии, и  $N_2$ , для которого учитываются вклады семи электронных состояний. Отмечается хорошее согласие рассчитанных значений изобарной теплоемкости и изобарно-изотермического потенциала со справочными данными. Рассчитанный для метода CARS -диагностики колебательно-вращательный спектр  $H_2$  хорошо согласуется со спектром, полученным экспериментальным путем в DLR.

В математической модели LIF-спектроскопии используются коэффициенты Эйнштейна, которые определяют вероятно-

сти оптических переходов между электронно-колебательно-вращательными энергетическими уровнями молекулы. Для их расчета требуется вычисление интегралов перекрытия волновых функций верхнего и нижнего состояния электронных уровней – факторов Франка-Кондона. В разрабатываемой методике расчёта используются волновые функции для нескольких электронных состояний атома водорода. Каждая из них представляется произведением радиальной и угловой составляющей. В работе построены графики для радиальных составляющих волновых функций. Они достаточно хорошо совпадают с имеющимися литературными данными.

Для разрешённых переходов построены графики перекрытия волновых функций и вычислены факторы Франка-Кондона. Проведено исследование влияния параметров и коэффициентов модели на получаемые значения факторов Франка-Кондона и форму орбиталей электрона. Следующим шагом планируется произвести расчет спектра интенсивности флуоресценции.

Разрабатываемые математические модели будут использоваться в НОЦ газодинамических исследований СГАУ для расшифровки измеренных CARS - и LIF-спектров при диагностике пламени в камерах сгорания тепловых двигателей.

УДК 621.45.00.11.018.3

## **МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОГО СИНТЕЗА САР ГТД, РАБОТАЮЩИХ НА КРИОГЕННОМ ТОПЛИВЕ**

Букин В.А.

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

### **ON SELECTION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR CRVOGENIC FUEL GAS TURBINE ENGINE**

*Bukin V.A. The report deals with selection of ACS configuration on the base of time lag value during cryogenic fuel gasification.*

В газотурбинных двигателях (ГТД), работающих на криогенном топливе - сжиженном водороде (СВ) или сжиженном природном газе (СПГ), его газификация производится в установленном за турбиной теплообменнике (ТО). Особенность систем автоматического регулирования (САР) таких ГТД - отрицательное влияние запаздывания в ТО на их устойчивость и быстродействие.

Инженерный синтез заключается в таком построении САР, при котором обеспечивается выполнение технических требований к ней. Основная задача синтеза САР ГТД на криогенном топливе - компенсация влияния запаздывания в ТО. Анализ вариантов системы, обоснование структуры, методов коррекции, разработка корректирующих устройств, динамические исследования являются составляющими инженерного син-

теза. При этом синтез должен базироваться на возможности технического воплощения.

В докладе обобщается опыт разработки САР авиационных и наземных ГТД, работающих на СВ (НК-88 на ТУ-155) или СПГ (НК-89 на ТУ-155 и НК-361 на магистральном газотурбовозе ГТ1-001).

В 80-х годах 20 века был создан ГТД НК-88 для работы на сжиженном водороде с гидромеханической двухконтурной каскадной системой регулирования и центробежным насосом (ЦН), приводимым от воздушной турбины (рис.1).

Внутренний контур состоит из турбо-насосного агрегата (ТНА), воздушного дросселя (ВД) и агрегата регулирования частоты вращения ротора ТНА (АР). Настройка статического регулятора частоты вращения ротора ТНА осуществлялась изодромным регулятором внешнего, основного контура ре-