

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждена работоспособность опытной камеры сгорания микро ГТД в стендовых условиях. При работе камеры в составе двигателя ожидается повышение эффективности процесса горения вследствие роста давления воздуха и топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Teledyne Inc. / Основные данные. – Los Angeles, 1995. – 69с.
2. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы, некоторые пути повышения его эффективности. / В.П. Лукачев, А.М. Ланский, В.Ю. Абрашкин и др. (В этом выпуске Вестника).
3. Веппе А.Б., Зубков П.Г., Ланский А.М. К вопросу моделирования процесса камер сгорания ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1990. – Деп. в ЦНТИ ГА 22.11.90. – № 822. – ГА90. – 12 с.
4. Проект камеры сгорания малоразмерного ГТД с расходом рабочего тела 0,3 кг/с. / А.М. Ланский, В.Ю. Абрашкин, А.В. Семенов, В.И. Фетисов, А.М. Цыганов, М.А. Шамбан // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе. – Самара: СГАУ, 1997. – С.191...197.
5. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / Под ред. С.М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
6. Сентсберц, Сампат. Атмосферные испытания камеры сгорания с регулирующей заслонкой, используемой для уменьшения выбросов из газотурбинных двигателей. // Труды ASME, Сер.Теоретические основы инженерных расчетов, 1975. – № 3. – С. 145...152.
7. Сотерап, Пиерс, Овертон. Некоторые практические вопросы, связанные с применением малотоксичной двухзонной камеры сгорания. // Труды ASME, Сер. Энергетические машины и установки, 1985. – № 1. – С. 1...9.

УДК 621.43 – 421/44 + 621.375.826 : 621.391.08 + 621.43.056

ДОСТИЖЕНИЯ НИЛ-49 (СГАУ) В ТЕХНИКЕ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА

Лукачев С.В., Ланский А.М., Диденко А.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Хорошо известно, что характеристики камер сгорания (КС) и двигателей в значительной степени могут определяться качеством работы форсунок и смесеобразования. Более того, известны случаи, когда неудовлетворительная работа форсунок или недостаточно тщательное согласование параметров смеси с особенностями внутрикамерного течения не позволяли достичь требуемых характеристик КС и двигателей, и требовались их серьезные переделки.

В связи с этим, при создании КС, с одной стороны, требуется умение заранее предсказывать и рассчитывать потребные характеристики форсунок, а при опытной доводке КС происходит как правило доводка и форсунок, которая сопровождается непрерывным потоком испытаний самых различных их схем и модификаций.

В настоящее время общепринятым является подход, контролировать характеристики форсунок, определяемых в нормальных атмосферных (стендовых) условиях, что связано с большими техническими трудностями испытаний форсунок при высоких давлениях и температурах и сложностями использования при том диагностического оборудования как, например, различного рода лазерных измерителей и т.п.

В НИЛ-49 СГАУ в конце 80-х годов для определения характеристик факелов распыла форсунок ГТД была создана проливочная установка с соответствующими измерительными системами и методиками обработки результатов. В последствие на ней также стало возможным испытывать и другие типы распылителей, в том числе автомобильные электромагнитные форсунки. В 1993 году на территории стенда, где размещается установка, была создана небольшая учебная лаборатория по определению ряда физических и энергетических свойств топлив. В результате к настоящему времени НИЛ-49 стала располагать достаточно широкими возможностями по определению свойств топлив и изучению характеристик их распыливания, накоплен также достаточно большой объем экспериментальных данных по параметрам качества распыливания.

Экспериментальная установка и средства измерения

На рис.1 представлена созданная в НИЛ-49 проливочная установка. Она размещена на площади $2,5 \times 3 \text{ м}^2$, высота рабочей камеры 2,25 м. Распыливание в камере производится при атмосферных условиях стенда. Установка имеет две системы подачи топлива - насосную и вытеснительную. К форсункам может подводиться воздух как низкого давления (0,1 ... 0,2 МПа), так и воздух высокого давления (1,5 ... 1,8 МПа). В процессе испытаний может дополнительно моделироваться эффект обдува факела распыла спутным воздушным потоком. Распыленное топливо собирается в специальном накопителе в нижней части установки и периодически удаляется в общее хранилище для повторного использования. В процессе испытания через установку не-

прерывно протягивается воздух с помощью системы вытяжной вентиляции, тяга которой регулироваться двумя заслонками. Воздух перед выбросом в атмосферу очищается от аэрозвеси в импакторе.

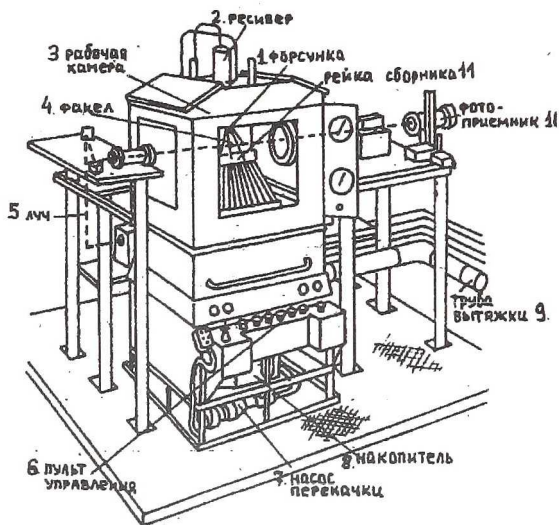


Рис. 1. Пропиловочная установка для испытания форсунок и диагностики факелов распыла

регламентных работ на установке, а также их защиту от возможных вибраций, создаваемых соседним силовым оборудованием.

Расходная характеристика по топливу определяется обычным весовым методом. Распределение топлива по радиусу и во всем поперечном сечении факела определяется с помощью подвижного 35-канального сборника жид-

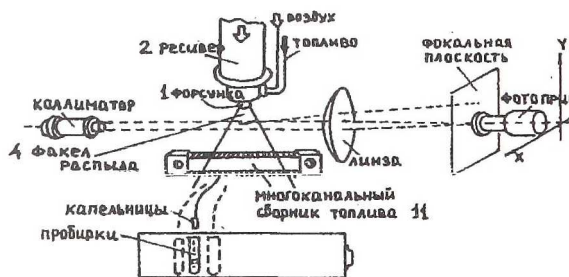


Рис. 2. Системы измерения

Вокруг установки на специальных столах размещены источники когерентного излучения - He-Ne-лазеры и элементы оптических и измерительных систем. Оптические столы и распылительная камера имеют отдельные фундаменты, опирающиеся дополнительно на песчаные подушки. И то и другое повышает надежность настройки оптических систем в процессе испытаний и

регламентных работ на установке, а также их защиту от возможных вибраций, создаваемых соседним силовым оборудованием. Расходная характеристика по топливу определяется обычным весовым методом. Распределение топлива по радиусу и во всем поперечном сечении факела определяется с помощью подвижного 35-канального сборника жидкой фазы, размещенного внутри распылительной камеры (рис.2), с последующим построением эпюр и полей методами сплайн-функций. Угол топливного факела определяется как по его фотографиям, так и по радиальным эпюрам.

Характеристики мелкости распыливания - средние диаметры капель по Заутеру (СДКЗ или d_{32}), концентрация капель в единице объема и функция распределения капель по размерам $f(r)$ определяются с использованием лазерно-оптического измерителя мелкости, реализующего метод малоуглового рассеяния (см. рис. 2).

Методики обработки результатов

а) Рейка пробоотборников многоканального сборника закрепляется на специальной подвеске и может быть размещена в любом сечении факела распыла. В процессе измерения попавшее в каналы топливо через систему капельниц направляется в мерные цилиндры. Капельницы и мерные цилиндры защищены от забрызгивания кожухом. Цилиндры располагаются на подвижном лафете и в нужное время подставляются под капельницы или отодвигаются от них.

За 5...7 положений рейки пробоотборников можно получить достаточный объем данных для восстановления всего поля распределения топлива (рис. 3 а) Для такого предельно минимального числа положений рейки производилась оценка возможного расхождения полного расхода топлива, вычисляемого путем интегрирования по полю, с расходом топлива, известного из предварительно полученной расходной характеристики. Интегрирование

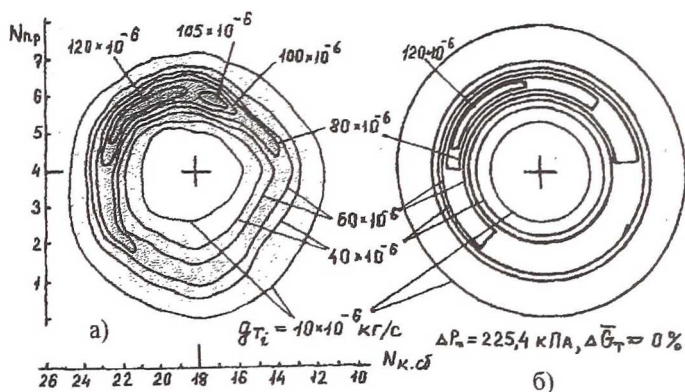


Рис. 3. Поле для двухканальной центробежной форсунки и его осреднение

может производиться без осреднения и с предварительным осреднением по изолиниям, как показано на рис.3 (б).

В настоящее время для построения полей распределения топлива используется специально разработанная для этих целей программа, основанная

на использовании кубических сплайн-функций (см. работу [21] из данного Вестника).

При чисто механическом распыливании (центробежная форсунка) и распыливании с умеренным обдувом факела воздухом расхождения в суммарных расходах топлива не превышали 0 ... 4 %. При пневматическом распыливании, когда к первичному факелу подводился вспомогательный воздух под перепадом до $\Delta P_v \sim 200$ кПа, расхождения составляли 25 ... 35 %.

б) Оптические измерения, конечной целью которых является получение информации о характеристиках мелкости распыливания - средних диаметрах капель (СДКЗ) и функции распределения капель по размерам $f(r)$, производятся в следующем порядке. Метод малоуглового рассеяния, в данном его применении, основан на использовании явления дифракции монохроматического излучения на каплях распыленного топлива. Необходимая информация о каплях содержится в распределении яркости в пятне дифракционно рассеянного света, которое обычно наблюдается в фокальной плоскости собирающей линзы измерителя мелкости (рис. 2). Но это распределение «зашумляется» фоном, бликами и паразитными распределением от света, прошедшего мимо и несколько в стороне от капель, то есть не дифрагируя на них. Все эти «шумы» должны отделяться от «полезного сигнала», что делается в несколько этапов. Затем, полученное распределение яркости в пятне дифракционно рассеянного света нормируется по величине яркости в центре картины и получается так называемая индикатриса рассеяния, которая обрабатывается далее по одной из нескольких методик.

СДКЗ определяется по методу обобщенной индикатрисы Доббинса или уточненному обобщению [1], или по расчетному варианту метода интегрирующей диафрагмы В.И.Ягодкина, А.Г.Голубева (ЦИАМ).

Поскольку величина измерительного объема известна по условиям эксперимента, то может быть определена пространственная концентрация капель.

Функция распределения капель по размерам $f(r)$ находится путем решения обратной задачи светорассеяния - обращения индикатрисы рассеяния относительно искомой $f(r)$. Обращение индикатрисы выполняется либо по методу точного матричного псевдообращения Гревилля, либо по методу аналитически точного интегрального обращения К.С.Шифрина, либо путем минимизации обобщенной невязки методом условного градиента (по аналогии с

регуляризирующими алгоритмами методов А.Н.Тихонова и др.[3]). Названные методы были нами происследованы на предмет их чувствительности к случайным ошибкам измерений, уровень которых варьировался в диапазоне 0 ... 25%. Результаты для одного из методов обращения показаны на рис. 4.

При наличии достаточно большого уровня ошибок оптических измерений или в случае

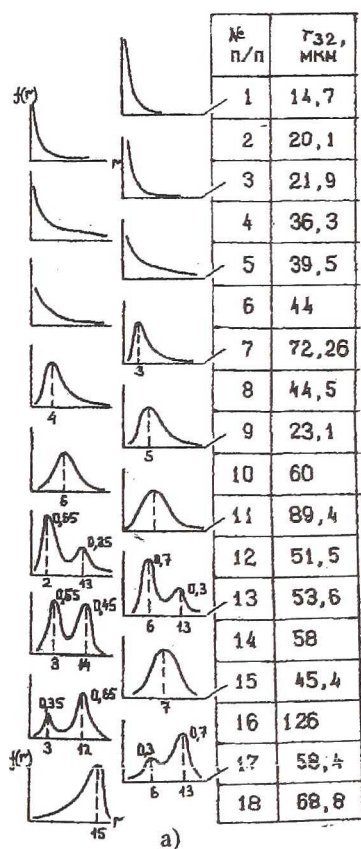


Рис. 5 (а). Общий вид и параметры модельных функций распределения капель по размерам

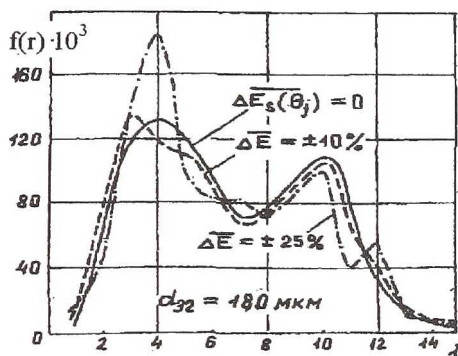


Рис. 4. Восстановление $f(r)$ минимизацией суммарной невязки методом условного градиента

какого-то сложного, нетипичного протекания индикатрисы рассеяния успех в отыскании наиболее вероятной $f(r)$ в немалой степени зависит от качества начального к ней приближения. За начальное приближение можно взять некоторую «пробную» функцию распределения капель по размерам, облик которой предлагается определять из результатов наложения экспериментально получаемых индикатрис рассеяния (рис. 5 в) на сетку модельных индикатрис (рис. 5 б), которые заранее можно рассчитать для некоторого достаточно широкого семейства модельных $f(r)$. Сами же модельные $f(r)$, для которых нами рассчитывались индикатрисы рассеяния, представлены на рис. 5 (а). В их семейство были включены разнообразные по виду

функции распределения, начиная от функций типа Розина-Рамллера до различных вариантов одно-и двумодальных функций распределения. Причем высотой экстремумов у этих функций можно было варьировать [1] и тем самым моделировать самые разнообразные их типы. Нами составлена сетка индикатрис для 28 модельных $f(\tau)$.

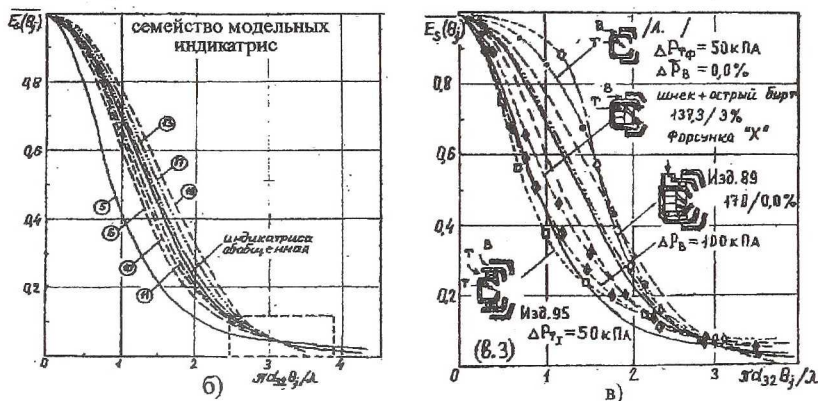


Рис. 5 (б). Семейство расчетных, модельных индикатрис рассеяния и (в) – наложенные на них экспериментально получаемые для различных форсунок и условий распыливания индикатрис

Для отработки техники оптических измерений и получения индикатрис рассеяния, а также для отладки методик получения данных о параметрах мелкости распыливания применялись также физические макеты аэрозольных частиц в виде пылицы ликоподия, металлических шариков в тонком слое машинного масла и др. с диаметрами частиц 25 ... 250 мкм.

Некоторые результаты по полям распределения топлива

К настоящему времени в НИЛ-49 накоплен большой объем данных по полям распределения топлива для центробежных, пневмо-механических, и пневматических форсунок авиационных и наземных ГТД, а также для серии автомобильных электромагнитных форсунок. Изучалось влияние режимных и конструктивных параметров форсунок на рельеф поля распределения топлива. В частности, для центробежной форсунки малоразмерного двигателя было рассмотрено влияние эффектов взаимодействия высоконапорного вспомогательного воздуха, подводимого для интенсификации распыливания к корню

первичного факела. Полное поле распределения топлива для блока таких форсунок, собранных вместе со штатным коллектором, показано на рис. 6.

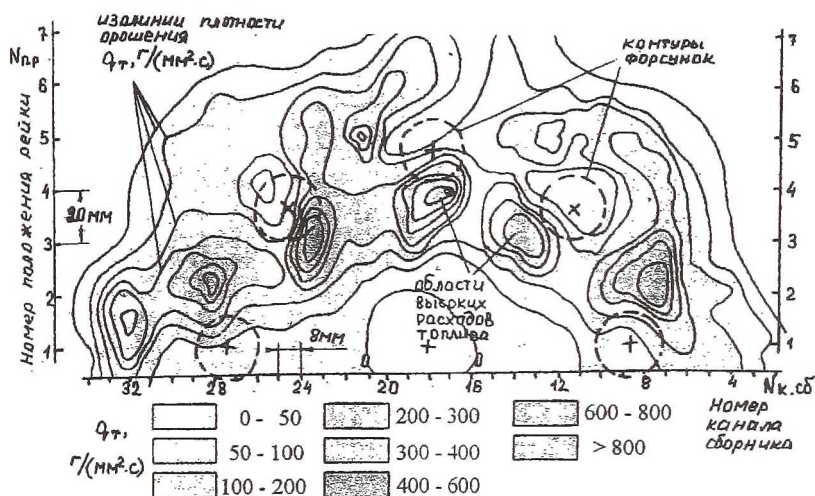


Рис. 6. Поле распределения топлива для $\frac{1}{2}$ части форсунок, собранных с коллектором (КС МГТД)

Изучалось также влияние направлений закрутки воздуха в двухкаскадных пленочных форсунках, широко применяемых в авиационных ГТД.

Для автомобильных форсунок изучалась форма струй и равномерность распределения топлива в факеле впрыска.

Некоторые результаты по мелкости распыливания топлива

На рис. 7 представлены результаты по величинам СДКЗ для двухкаскадных пневмо-механических форсунок с предварительным образованием топливной пленки. Полученные результаты показали, что спутная закрутка воздушных потоков из завихрителей при типичных на них перепадах давления приводит к уменьшению размеров капель по сравнению с исходным вариантом форсунки на 24%, а встречная закрутка уменьшает СДКЗ примерно еще на 20%, то есть в сумме на 45%.

Однако, с точки зрения характеристик КС положительный эффект от повышения мелкости распыливания может быть ослаблен некоторым уменьшением угла факела распыла и нарушением желательного закона распреде-

ления топлива по его радиусу, как это также было обнаружено при испытаниях форсунок.

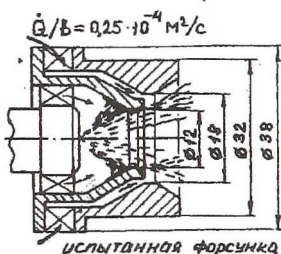
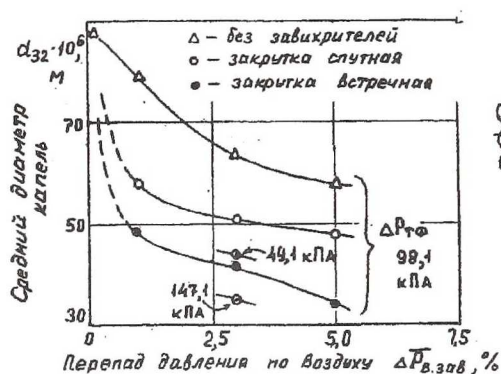


Рис. 7. Влияние направлений закрутки воздуха в двух-ярусной форсунке с частичным пленкообразованием

Интересными являются результаты для форсунок с коническими насадками. Для такого типа форсунок оказалось, в частности, что положительный эффект от пневмораспыла в снижении размеров капель в отличие от форсунок других типов проявляется лишь с некоторой, чуть больше обычной, величины перепада давления на воздушном завихрителе - с $\Delta P_{в} \geq 4\%$.

Анализировалось влияние на размеры капель изменения диаметра сопла топливного распылителя в диапазоне $d_c = 0,34 \dots 0,72$ мм, в частности у шнековой форсунки малоразмерного авиационного ГТД. Было получено (рис. 8), что с уменьшением d_c ниже некоторой величины $\sim 0,5 \dots 0,55$ мм СДКЗ начинают увеличиваться. Возможность подобного эффекта, свойственного очевидно малоразмерным камерам, необходимо учитывать, например при доводке КС, так как он может сдерживать повышение напорности форсунок с целью повышения мелкости распыливания ими топлива.

На рис. 8 на экспериментальные данные по d_{32} наложены расчетные значения толщины топливной пленки t_5 , которые соответствуют сечению выхода топливной струи на цилиндрический участок сопла распылителя. Величины t_5 рассчитывались по специально разработанной программе расчета форсунок, в которой учитываются гидравлические потери как в целом, так и по элементам проточной части форсунок, а общий перепад давления топлива распределяется по элементам с учетом имеющихся в них потерь.

Испытания электромагнитных форсунок (ЭМФ) автомобильных двигателей в схожих стендовых условиях проводились с целью сравнения

форсунок различных изготовителей. Анализировалась мелкость распыливания топлива в зависимости от ширины импульса открытия клапана форсунок, изучалась форма струй по радиальным эпюрам и сравнивались поля распределения топлива. По мелкости распыла лучшей оказалась форсунка фирмы "Bendix", по равномерности рас-

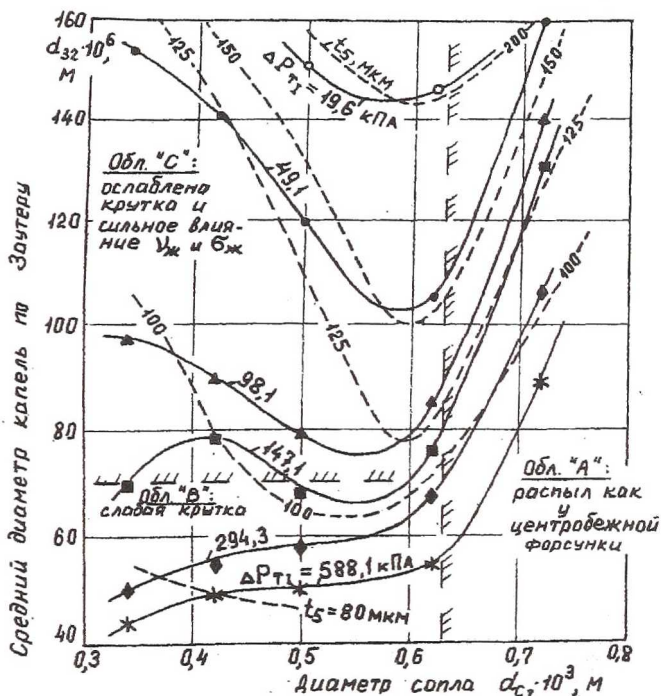


Рис. 8. Влияние сопла распылителя шнековой форсунки МТД на размеры капель

пределения топлива в факеле - форсунка фирмы "Rochester". Форсунки отечественных производителей заняли некоторое промежуточное положение. В целом же, по мелкости распыливания автомобильные ЭМФ обеспечивали размеры капель на уровне 50 ... 90 мкм, что несколько выше, чем у близких по размерам пневмо-механических форсунок авиационных двигателей.

В настоящее время в рамках совместных исследований СГАУ и АО СНПК им. академика Н.Д. Кузнецова по снижению выбросов оксидов азота газотурбинными двигателями проводятся испытания и отработывается конструкция струйных пневматических форсунок игольчатого типа, позволяющих независимо друг от друга управлять расходом топлива, размерами капель и формой функции распределения капель по размерам.

Внедрения

Результаты исследований используются в ОКР по доводке камер сгорания и форсунок в МКБ «Гранит» (г. Москва), в ОКБМ (г. Калуга), на ДААЗе

(г. Димитровград Ульяновской обл.), с отдельными результатами ознакомлены ведущие специалисты КБ моторостроительных предприятий г.г. Самары, Уфы, Перьми, Москвы. Они также получили одобрение у ведущих специалистов ЦИАМа.

Некоторые из нерешенных проблем

Многоканальные сборники позволят собирать подробную информацию для построения всего поля распределения топлива. Однако при их использовании приходится считаться с возможным нарушением структуры двухфазного потока при внесении в него массивных пробоотборников, особенно если имеются обратные течения в циркуляционных потоках. Кроме того, необходимо обеспечивать изокинетичность отбора проб, что очевидно невозможно реализовать в рамках конструкции многоканальных сборников.

Распылительная камера созданной установки не позволяет проводить испытания форсунок при повышенных давлениях и температурах, какие имеют место в камерах сгорания ГТД, что при расчетном анализе характеристик последних требует выработки некоторых поправок к параметрам факелов распыла. [1].

Надежное использование метода малоуглового рассеяния ограничено, как известно, некоторыми умеренными оптическими плотностями диагностируемого облака аэрозоля. Однако, на основании данных некоторых литературных источников, например [4], существующие требования на оптическую плотность могут быть смягчены [1].

Важной практической задачей применения методов малоуглового рассеяния является надежное определение функции распределения капель по размерам $f(r)$ при сравнительно высокой неопределенности решения этой обратной задачи светорассеяния. Для повышения существующей надежности и точности отыскания $f(r)$ необходимо располагать не только высокого разрешения математическими моделями аэрозольных частиц [1], но и иметь соответствующие физические их макеты, составленные желательнее из 10...15 размерных фракций с контролируемым числом частиц, чтобы была возможность реального моделирования всевозможных по виду $f(r)$. Тщательный анализ литературных источников не выявил использование кем-то таких макетов. Обычно измерители мелкости отлаживают либо на макетах

монодисперсных частиц, либо на макетах с числом их размерных фракций не более 4-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.А. Исследование качества распыливания топлива и его влияния на характеристики камер сгорания малоразмерных ГТД // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т (СГАУ), 1996.-267с.
2. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. –М: Мир, 1986. – 566с.
3. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола – М: Наука, 1990.-232с.
4. Савельев Б.А. О применимости теории однократного рассеяния для узких световых пучков // Изв. вузов.Физика. –1967, № 12. –С.135-136.

УДК 621.438.056

ОПЫТ ОТРАБОТКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ СХЕМ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ГТУ

Маркушин А.Н., Постников А.М., Савченко В.П.

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

Камеры сгорания традиционных схем, в которых топливо сгорает в диффузионных пламенах, обладают рядом очевидных преимуществ перед создаваемыми в настоящее время для улучшения экологических характеристик двухзонными (многозонными) камерами сгорания различных схем, в которых все топливо или его большая часть сгорает в гомогенном (или близким к этому) пламени при низких температурах. Простота, надежность, десятилетиями отработанная технология проектирования, изготовления и эксплуатации, одноконтурная система подачи топлива и однозначность управления ее делают обоснованными многочисленные попытки конструкторов усовершенствовать традиционные камеры сгорания с целью улучшения их экологических характеристик.

Известно, что для авиапроизводных ГТУ с высокими параметрами цикла рабочего процесса ($\pi_k > 20$), особенно актуальны снижение выбросов оксидов азота, NO_x , и надежность «горячих» узлов двигателя, в частности, камеры сгорания.