

УДК 621.43

## РАЗВИТИЕ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ «ГОРЕНИЕ И РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД» В КуАИ – СГАУ

С.В.Лукачев

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара*

История самарской школы «горельщиков» насчитывает 35 лет. За это время в институте создан уникальный комплекс испытательных стендов и установок, технологических, измерительных и аналитических подразделений, способных на современном уровне получать и обрабатывать практически любую информацию при испытаниях модельных (академических) объектов, отсеков КС крупных двигателей, блоков КС малоразмерных ГТД и даже целиком МГТД. Такое мощное развитие экспериментальной базы обусловлено тем, что КуАИ на хозяйственной основе выполнял НИОКР по исследованию и доводке рабочего процесса КС для многих ведущих моторостроительных ОКБ страны: КМЗ и ККБМ (г. Куйбышев); МКБ «Гранит» и НПО «Сатурн» (г. Москва); АО «Моторостроитель» (г. Пермь); НПП «Мотор» и ОКБ «Гидравлика» (г. Уфа); КОБМ (г. Калуга); длительное время институт плодотворно работал с ЦИАМ. Успехи самарской школы «горельщиков» в значительной степени обусловлены и тем, что в течение 25 лет ее научным руководителем был профессор В.П.Лукачев, который отличался высокой научной эрудицией и широтой интересов, имел большой авторитет на предприятиях аэрокосмического комплекса и был талантливым менеджером высшего уровня.

Началом научного направления, которое на долгие годы стало основным в группе «Горение» ОНИЛ-9, затем в отделе «Горение» ОНИЛ-2 и далее развивалось в НИЛ-49 («Горение и рабочие процессы»), научный руководитель профессор С.В.Лукачев) и в НИЛ-45 («Энергетика и экология тепловых двигателей», научный руководитель профессор Ю.А.Кныш), можно считать 1963 год, когда Ю.А.Кныш под руководством В.П.Лукачева создал первую экспериментальную установку, позволявшую изучать распыливание жидкостей с помощью ультразвука. Впоследствии эту тему продолжил и закончил кандидатской диссертацией Л.Г.Ключарев.

В 1964-65 годах инженер Ю.Кныш и учебные мастера А.Романенко и В.Васин создают в учебной лаборатории «Тепловые двигатели» кафедры те-

плотехники проливочный стенд для изучения распыливания жидкого топлива форсунками ГТД (с привязкой к двигателю НК-12МВ), а впоследствии и ЖРД (с привязкой к двигателям первой и второй ступени ракеты Н-1). В связи с развитием тематики Н-1 и совместных работ группы «Горение» ОНИЛ-9 и отдела В.Д.Пака в ККБМ в группу вливаются инженеры Ю.Ковылов (1966г.) и В.Анискин (1967г.). В эти годы рядом с проливочным стендом появляется стенд для испытания жидкостных форсунок с противодавлением до 60 атм.

Работа по изучению распыливания топлива центробежными форсунками двигателей комплекса Н-1 проводилась в направлении создания методики (и соответствующих конструкций) изменения угла факела распыла без изменения геометрической характеристики форсунки (за счет эффекта Коанда). В 1969г. эти работы были завершены кандидатской диссертацией Ю.А.Кныша.

И эффект Коанда, и режим автоколебаний изучались в это время и при подаче газа через центробежные форсунки. Так родилось ответвление – вихревые генераторы звука с разделением потоков газа и акустической энергии. Первые результаты уже вошли в диссертацию Ю.А.Кныша. Развитие этой тематики было вначале связано с проблемой ВЧ-неустойчивости процесса горения в КС ЖРД. Однако, из-за уже начавшегося сворачивания ракетной тематики в лаборатории начались исследования чисто газовых центробежных и струйных форсунок. Ю.Ковылов занимался учетом сжимаемости рабочего тела и вопросами изменения угла факела в газовой центробежной форсунке, а В.Анискин – автоколебательными процессами в канале струйной газовой форсунки. Начавшееся сворачивание разработки комплекса Н-1 на КМЗ побудило научного руководителя группы В.П.Лукачева переориентировать ее на решение практических задач для только рождавшегося тогда направления «Наземное применение авиационных ГТД, отработавших свой ресурс на крыле». Эта переориентация совпала по времени с переходом В.П.Лукачева на кафедру ТДЛА и его исследовательской группы в ОНИЛ-2.

Начиная с 1970г. группа (а впоследствии и отдел) «Горение» работает по заданию ККБМ (отдел В.И.Фролова) над проблемой перевода двигателя НК-12МВ на природный газ (модификация НК-12СТ). На базе первой проливочной установки В.Анискин и Ю.Ковылов разрабатывают варианты воспламенителей на пропане для НК-12СТ, а также варианты смесительных элементов, состоящих из фронтального завихрителя основной КС и созданных в лаборатории вариантов струйных и центробежных форсунок. Одноре-

менно на территории ОНИЛ-2 (ГНС) началось строительство первого в отделе огневого испытательного стенда (3-горелочный отсек КС двигателя НК-12СТ). Большой вклад в создание нашего первого серьезного стенда в то время внесли инженеры В.Лупиного и А.Лукс.

В процессе этих работ завершили свои диссертации В.Т.Анискин – по автоколебаниям в струйных форсунках (1973г.) и Ю.А.Ковылов – по газовым центробежным форсункам (1974г.). Комплект разработанных Ковыловым форсунок был установлен на двигателе и без замечаний прошел испытания в цехе № 60 (Винтай) в течение 2500 часов. Основным достоинством этих форсунок было полное устранение нагарообразования.

Работа на огневом стенде, на природном газе, при наличии собственных идей вывела отдел «Горение» на оперативный простор. Исследования течений закрученных потоков жидкости и газа, в том числе и с автоколебаниями, получило свое дальнейшее развитие в кандидатских диссертациях С.В.Лукачева, А.Н.Белюсова, А.Ф.Урывского, О.А. Тарабрина и в докторской диссертации Ю.А.Кныша. В качестве практических разработок эти диссертации включали мультициклонные элементы воздухоочистительных устройств для газокompрессорных станций с двигателями НК-12СТ, газовые и жидкостные вихревые генераторы звука, аэрационные устройства на базе закрученных потоков жидкости, диспергаторы для создания керосино-водяной эмульсии и смесительные элементы для многофорсуночных камер сгорания двигателей НК. Поскольку руководитель этого направления Ю.А.Кныш являлся мощным генератором инженерных идей, сотрудниками отдела было создано и запатентовано более 70 модификаций различных устройств, положительный эффект в которых достигался за счет закрутки рабочего тела. Причем, все это «хитроумное железо» появлялось на свет благодаря «золотым рукам» токаря высочайшей квалификации В.К.Баринава.

С середины 70-х годов отдел стал интенсивно развивать свою экспериментальную базу и осваивать новые методы измерений. Именно освоение нового тогда в отрасли газового анализа привело к созданию в отделе химлаборатории и к началу нового витка контактов с КМЗ. Нуждаясь в применении этого метода измерений при испытании КС и двигателей, начальник КО-3 В.Е.Резник приехал на ГНС для визуального с ним знакомства (1976г.). Результатом этой поездки явилось десятилетнее сотрудничество отдела «Горение» с КМЗ на хоздоговорной основе по тематике ГТД.

В течение этих десяти лет (1976-86гг.) в КуАИ были выполнены четыре основные работы:

- усовершенствован и внедрен на испытательных стендах КМЗ метод газового анализа продуктов сгорания с учетом жидкой фазы в продуктах недожега (Ивлиев А.В.); спроектирован и испытан в лабораторий и на КМЗ ряд доработок по форсункам основных КС и диспергатор для генерации керосино-водяной эмульсии (Ю.А.Кныш, А.Н.Белоусов, А.Ф.Урывский и др.);

разработано, испытано и доведено фронтное устройство для двигателя НК-16СТ на природном газе (А.М.Ланский и др.);

- разработана серия фронтных устройств для форкамеры форсажной КС изделий Р и Е (Ю.А.Кныш, Ю.Л.Ковылов, А.Н.Белоусов, Н.К.Серенков и др.); исследованы особенности совместной работы форкамеры с радиальными стабилизаторами пламени. Работа завершилась кандидатской диссертацией Н.К.Серенкова;

- исследованы особенности рабочего процесса крупноразмерных вихревых горелок для КС двигателей пятого поколения. Для обобщения информации о работе горелок впервые введено понятие «обобщенной характеристики» (А.М.Цыганов). Изучен рабочий процесс канально-струйного диффузора (С.Г.Матвеев, Ю.Л.Ковылов и др.).

В процессе этого взаимодействия с КМЗ отдел «Горение» ОНИЛ-2 вместе с лабораторией перебазировался с ГНС в корпус №11 и существенной расширил и укрепил свою экспериментальную базу, в т.ч. и за счет присоединения стенда высотно-климатических испытаний натуральных МГТД. Это обстоятельство, а также возросший кадровый потенциал позволили отделу расширить круг решаемых задач.

В начале 80-х годов у многих моторостроительных ОКБ вновь появился интерес к проблеме перевода авиационных двигателей на газообразное топливо. В этой связи в КуАИ был выполнен широкий спектр ОК и НИР для ККБМ, КМЗ, МКБ «Гранит», НПП «Мотор» и КОБМ, причём работы по данной тематике продолжались вплоть до 1993г. В результате были получены следующие научно-практические результаты (А.М.Ланский, А.Н.Белоусов, Ю.Л.Ковылов, А.М.Цыганов, В.Ю.Абрашкин, А.Б.Чесликов):

выполнено экспериментальное исследование рабочего процесса вихревых горелок авиационных ГТД на природном газе, установлено влияние конструктивных и режимных параметров горелок на состав смеси и массообмен в зоне рециркуляции;

получены эмпирические зависимости полноты сгорания от закона подвода воздуха по длине жаровой трубы и коэффициента форсирования;

- разработан метод расчета выгорания природного газа, позволяющий на стадии проектирования оценить влияние конструктивных и режимных параметров геометрически подобных камер сгорания на полноту сгорания;

- разработаны рекомендации по проектированию камер сгорания авиационных ГТД, работающих на природном газе, на основании которых созданы конструкции фронтных устройств КС двигателей НК-12СТ, НК-16СТ, ГТУ-89СТ-20, изд. 95ТУ2, проведен полный цикл доводочных работ на отсеках и полноразмерных КС. Результаты испытаний на двигателях подтвердили их целесообразность.

Участие лаборатории в доводке эмиссионных характеристик двигателей НК-12СТ, НК-16СТ, НК-86 привело к многолетнему (1980-1991гг.) сотрудничеству КуАИ и ЦИАМ в области изучения закономерностей образования и выброса канцерогенных веществ, в частности бенз( $\alpha$ )пирена – БП, при работе ГТД. Реперной точкой в этих исследованиях было создание (1985г.) уникальной методики отбора проб продуктов сгорания (А.В.Ивлиев, В.Г.Розно, С.В.Лукачев), позволившей впервые в мировой практике достоверно определять содержание БП (на уровне микродоз) в продуктах сгорания. Впоследствии на базе данной методики, совместно с ЦИАМ, был разработан проект ОСТА «Отбор проб отработавшего газа при оценке канцерогенной активности выхлопа авиационных двигателей». Наличие методики позволило системно подойти к изучению проблемы. В результате исследований, проводимых на модельных факелах, натурных и модельных КС, а также полноразмерных двигателях получены следующие основные результаты:

- выявлены фундаментальные закономерности образования и выгорания БП в модельных пламенах;

разработана модель процесса образования БП для случая горения гомогенных смесей с воздухом;

установлены основные факторы, определяющие интенсивность образования БП в КС;

развиты представления о протекании процессов образования и выгорания БП в условиях КС и разработаны принципы организации рабочего процесса в камере, обеспечивающие пониженный выброс БП с ОГ авиационных ГТД;

впервые в мировой практике создан банк данных по выбросу БП авиационными двигателями.

Результаты этих исследований отражены в кандидатских диссертациях В.Г.Розно, С.Г.Матвеева, М.Ю.Анисимова, М.Ю.Орлова и в докторской диссертации С.В.Лукачева. Большой личный вклад в разработку данного научного направления, помимо названных выше исследователей, внесли А.Ф.Урывский и А.А.Горбатко (ЦИАМ). Отметим, что СГАУ и по сей день является ведущей в России научной школой по изучению проблемы образования и выброса канцерогенных веществ при сжигании углеводородных топлив.

Еще одним важным направлением работ отдела, а с 1992г. и НИЛ-49 стало исследование и доводка рабочего процесса КС малоразмерных ГТД. В 1985-1996 годах А.М.Ланским, Ю.Л.Ковыловым, А.А.Диденко, П.Г.Зубковым, А.М.Цыгановым, В.Ю.Абрашкиным по заданиям МКБ «Гранит», ОКБ «Гидравлика» и КОМБ был проведен широкий спектр работ по решению целого комплекса вопросов: высотного запуска, качества смесеобразования, нагарообразования, стабилизации пламени, аэродинамики КС, теплого состояния жаровой трубы и неравномерности температурного поля.

Неизменная направленность на освоение новых наукоемких методов измерений побудила в 1988 году начать изучение оптических методов оценки параметров топливной аэрозоли, что завершилось созданием уникального стенда и программно-методического комплекса (А.А.Диденко), позволяющего определять как средние размеры капель, так и функций распределений капель по размерам.

В последнее время (1993-1997гг.), в связи с известными трудностями предприятий аэрокосмического комплекса интенсивность работ в НИЛ-49 значительно снизилась. Однако, созданные заделы позволили, в основном за

счет государственного финансирования, продолжить работы по канцерогенной тематике и в направлении обобщений, разработки элементов методологии проектирования и доводки КС, элементов ее теории и расчета. Материально-техническая база лаборатории достаточно эффективно используется в учебном процессе по специальности «Двигатели внутреннего сгорания», по которой кафедра «Теплотехника и тепловые двигатели» является выпускающей.

По научному направлению самарской школы «горельщиков» защищено 3 докторских и 22 кандидатских диссертации, опубликовано более 450 статей и докладов на НТК, получено более 120 авторских свидетельств на изобретения, в настоящее время готовится к изданию 3 монографии. При кафедре «Теплотехника и тепловые двигатели» и НИЛ-49 работает постоянно действующий научный семинар, на котором обсуждаются работы как своих сотрудников, так и работников предприятий аэрокосмического комплекса и родственных вузов.

УДК 621.43-224.3

## РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТД, ПРОБЛЕМЫ И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Лукачев В.П., Ланский А.М., Абрашкин В.Ю., Диденко А.А., Зубков П.Г., Ковылов Ю.Л., Матвеев С.Г., Цыганов А.М., Шамбан М.А., Яковлев В.А.

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара,  
Машиностроительное конструкторское бюро "Гранит", г. Москва*

Традиционный подход к проектированию камер сгорания (КС) малоразмерных ГТД, заключающийся, по существу, в распространении на них опыта создания КС больших двигателей, был подвергнут серьезной критике со стороны NASA [1]. Различия в конструкции, размерах и условиях работы КС больших и малых ГТД являются причиной того, что подобный подход часто приводит к ошибкам при проектировании, ухудшает показатели силовой установки, требует большого объема доводочных работ. Чтобы установить причины такого рода ошибок, следует выяснить и изучить особенности организации рабочего процесса КС малоразмерных ГТД (МГТД), накладывающие наиболее существенный отпечаток на их облик и показатели качества работы. Задача усложняется тем, что процессы в КС МГТД изучены еще