

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ НК-144 НА ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

Иванов А.И.¹, Косицын И.П.¹, Цыбизов Ю.И.²

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, alex_slavross@mail.ru

² АО «Металлист-Самара»

Ключевые слова: жидкий водород, газотурбинный двигатель, форсажная камера, устойчивость горения, турбонасосный агрегат.

Представлены этапы отработки водородного газотурбинного двигателя НК-144ВТ, которые предшествовали созданию двигателя НК-8-2у для криогенного самолёта Ту-155ЛЛ. Экспериментальными зависимостями иллюстрируются работоспособность и устойчивость процесса горения в форсажной камере двигателя НК-144. Приведены данные и продольный разрез турбонасосного агрегата для подачи жидкого водорода в двигатель.

Исследования возможности использования криогенного вида топлива (жидкий водород и сжиженный природный газ (СПГ)) в авиации начались ещё в середине XX века и уже на 1-й Международной конференции по водородной энергетике американский гигант – самолетостроительная компания «Локхид» доложила отдельные результаты исследований по использованию водорода, основным преимуществом которого является высокая теплота сгорания. Опубликованные исследования показывают, что высокая теплота сгорания топлива жидкого водорода, превосходящая в 2,8 раза теплоту сгорания керосина, в авиации позволяет:

- уменьшить массу необходимого запаса топлива на борту самолёта и взлётную массу при заданной дальности и массе полезного груза;
- уменьшить удельную нагрузку на крыло и размеры крыла;
- повысить удельный импульс двигателя и уменьшить размеры и массу силовой установки;
- снизить требования к длине и покрытию взлётно-посадочной полосы для большегрузных самолетов и, следовательно, снизить капитальные затраты на строительство аэродромов.

Отмечено также, что значительно улучшаются характеристики горения и достижение требований экологической безопасности.

В нашей стране решением Военно-промышленной Комиссии при президиуме Совета министров СССР работы, проводимые в то время по жидкому водороду в ЦИАМ, ЦАГИ и институтах ВВС, были объединены в комплексные проекты «Холод-1», «Холод-2» и «Холод-3». Учитывая успешный опыт работы в области создания ЖРД, основным исполнителем ОКР по программе «Холод-2» с середины 70-х являлось ОКБ, руководимое Генеральным конструктором, академиком Н.Д. Кузнецовым, где и начались исследования по решению проблемы использования криогенного топлива в ГТД [1,2].

В августе 1974 г. вышел приказ по МАП СССР, обязывающий ОКБ Н.Д. Кузнецова начать исследовательские работы в этом направлении. Первой разработкой нашего ОКБ по водородной тематике для авиационных ВРД стал двигатель НК-144ВТ для сверхзвукового пассажирского самолёта (СПС) Ту-144 (рис. 1), на котором отрабатывались проблемы использования водорода в качестве топлива в форсажной камере, а с 1975 г. начались регулярные исследования по применению водорода в ГТД.

Планировалось, что форсажная камера (ФК) должна работать и на жидком водороде, и на керосине. Было принято целесообразным взять за прототип именно двигатель НК-144ВТ и на нём провести исследования по определению принципов проектирования криогенных узлов и агрегатов, выявить влияние водорода на свойства сплавов и материалов, соприкасающиеся с ним, а также провести выбор и изучение схем топливопитания, регулирования и управления, см. рис. 1. Кроме этого, двигатель НК-144ВТ имел ФК и первые исследования процессов горения водорода легче было провести именно на ней, а затем выполнить подобные работы на основной

камере сгорания двигателя. При этом экспериментальная отработка двигателя НК-144ВТ на водороде финансировалась в соответствии с госпрограммой “Холод-2” и была логична связана с пиком работ по лётным испытаниям СПС Ту-144 с двигателем НК-144 [4,5].

Испытания ФК показали, что для сжигания водорода требуются новые принципы организации рабочего процесса и новые принципы конструкторских решений для целого ряда вопросов, выявленных в выполненных исследованиях на отдельных узлах и двигателе.

Несколько позднее начались также работы по использованию водорода как основного топлива в камере сгорания ВРД. За основу был взят доведенный серийный двигатель НК-8-2у. В этот же период к водородной тематике подключили ОКБ А.Н. Туполева. Двигатель семейства НК-8-2у на самолёте-лаборатории Ту-155ЛЛ (модификация под водород пассажирского самолёта Ту-154) получил индекс НК-88.

Достигнутые практические результаты выполненной работы
по двигателю НК-88 и самолёту Ту-155ЛЛ

Первый полёт самолёта Ту-155ЛЛ с двигателем НК-88, камера сгорания которого работала на жидком водороде, совершён 15 апреля 1988 г. И уже в сентябре 1988 г, на состоявшейся в Москве V11 Международной конференции по водородной энергетике, зарубежные представители признали, что выполненная коллективом ОКБ Н.Д. Кузнецова работа является уникальной и опережает на тот период времени зарубежные исследования на 5-7 лет [3]. При этом следует иметь в виду, что водород, с его огромной энергоёмкостью и практически неисчерпаемыми запасами – топливо будущего. И этот решительный шаг в будущее сделан именно в советской России. Нигде в мире не было и по сей день нет летательных аппаратов, подобных нашему Ту-155ЛЛ. Согласно высказыванию известного американского авиационного инженера Карла Бревера: «Русские совершили в авиации дело, соразмерное полёту первого спутника Земли!».

В настоящее время в России сформирована правительственная программа «Развитие водородной энергетике». В ней упомянуты отрасли, в которых следует выполнить НИИОКР, в частности, в авиационном и железнодорожном транспорте. Как отмечено выше, для первого в мире криогенного самолёта Ту-155ЛЛ был использован водородный ТРДД НК-88, созданный на базе серийного двигателя НК-8-2у, см. рис. 2.



Рис. 1 – Двигатель НК-144ВТ

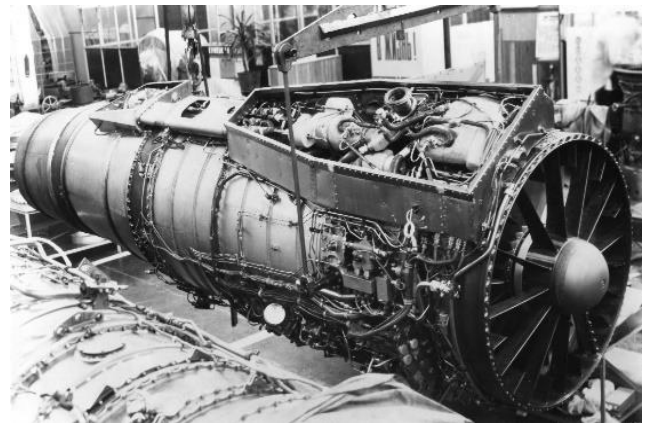


Рис. 2 – Двигатель НК-88

При отработке двигателя НК-88 были решены следующие проблемные вопросы:

1. Возможность сжигания в камере сгорания жидкого или газообразного водорода.
2. Определение устойчивости процесса газификации водорода в теплообменнике и выбор схемы его работы – докритической или сверхкритической.

3. Осуществлён выбор схемы системы турбонасосной подачи водорода: открытой, с удалением в атмосферу рабочего тела после турбины или закрытой, в которой рабочее тело (газифицированный водород) после турбины подаётся в камеру сгорания. Здесь прослеживается полная аналогия с проектированием системы подачи компонентов топлива для ЖРД.

4. Осуществлён выбор схемы регулирования режим работы двигателя: с постоянной температурой водорода на входе в камеру или с регулятором расхода, обеспечивающим заданный расход водорода при переменных температурах.

5. Выполнена оценка наиболее рациональной схемы использования хладоресурса водорода для улучшения характеристик двигателя и самолёта.

Работы по водородному варианту двигателя НК-144ВТ были развёрнуты (1974-1975 гг.) в следующих направлениях:

а. создание современной криогенной экспериментальной базы на территории «Химзавода» с максимальным использованием имеющегося потенциала дорогого оборудования, используемого ранее для стендовых испытаний ЖРД НК;

б. проведение экспериментальной отработки элементов ФК на отсеках и полноразмерном двигателе с подачей газообразного водорода без использования насосной системы подачи.

с. проектирование турбонасосного агрегата для подачи жидкого водорода в двигатель;

д. расчётно-конструкторские проработки по оценке эффективности применения жидкого водорода в качестве топлива для эксплуатируемых (Ту-144) и перспективных широкофюзеляжных самолётов.

Ниже приведены отдельные материалы и данные, которые относятся к результатам начала работ по двигателю НК-144ВТ, выполненных в 1975 году. В целом же, работы по водородному варианту двигателя НК-144ВТ продолжались до 1980 г. Экспериментальная отработка элементов ФК с подачей от систем стенда газообразного водорода проводилась на 2-х и 5-горелочных отсеках камеры. В период с 11 октября 1974 года по 30 октября 1975 года проведено 67 испытаний 9-и вариантов конструкции отсеков форсажной камеры (ОФК) с общей наработкой 8 часов. В результате проведенных работ на ОФК отобраны варианты конструкций и схемы подвода водорода для окончательной отработки на полноразмерной ФК двигателя. При испытании двигателя НК-144ВТ на газообразном водороде отработке подвергались 2 варианта конструкции горелочных контуров ФК с различными сочетаниями подачи водорода на струйные форсунки.

В период с 18 декабря 1974 года по 30 октября 1975 года проведено 73 испытания двигателя НК-144ВТ с общей наработкой 10 часов. Основные результаты отработки ФК по диапазону устойчивой работы в составе двигателя НК-144ВТ приведены на рис. 3.

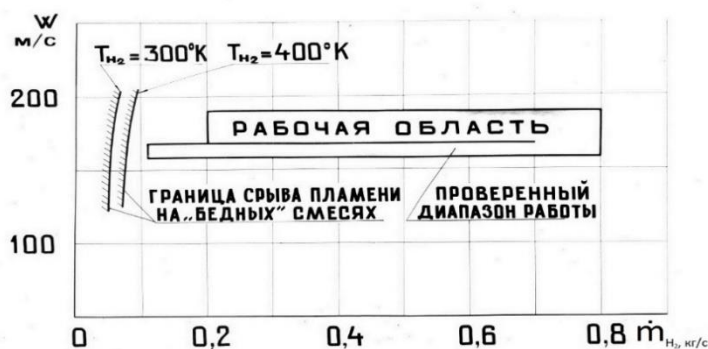


Рис. 3 – Работоспособность и устойчивость ФК двигателя НК-144ВТ в широком диапазоне расходов водорода: \dot{m}_{H_2} – массовый расход водорода;

W – скорость газовоздушного потока на входе в контур;

T_{H_2} – температура водорода на входе в топливный коллектор

Обобщённые результаты отработки на ОФК и ФК в составе двигателя НК-144ВТ, формулируются следующим образом:

- полнота сгорания водорода – 0,95;
- процесс горения в ФК устойчив в диапазоне коэффициента избытка воздуха 20 – 1,25;
- вибрационное горение отсутствует;
- работа турбокомпрессора и ФК на режимах розжига устойчива.

После успешной отработки ФК двигателя НК-144ВТ на газообразном водороде Генеральный конструктор Н.Д. Кузнецов определил задачу перейти на отработку двигателя на жидком водороде. Для этого было необходимо разработать системы регулирования, управления и газификации жидкого водорода, а также систему топливоподачи, в которой ключевым элементом был турбонасосный агрегат (ТНА). Расчётно-конструкторские проработки показали, что на данной стадии работ оптимальной по срокам создания будет открытая схема топливоподачи, в которой приводом водородного насоса будет турбина, питаемая воздухом, отбираемым от компрессора двигателя НК-144ВТ и удаляемого после турбины в атмосферу. Расчётные параметры ТНА для взлётного режима приведены в таб. 1.

Таблица 1 – Параметры водородного ТНА двигателя НК-144В на взлётном режиме

№ п/п	Параметр	Величина
1	Температура водорода на входе в насос $T_{вх}$, К	23
2	Давление водорода на входе в насос $P_{вх}$, кгс/см ²	2,4
3	Плотность водорода на входе в насос, $\rho_{вх}$, кг/м ³	68
4	Массовый расход водорода \dot{m} , кг/с	0,8
5	Давление водорода на выходе из насоса $P_{вых}$, кгс/см ²	46,4
6	Число ступеней насоса $Z_{ст}$	2
7	Частота вращения ротора насоса n , об/мин	40600
8	Коэффициент быстроходности ступени насоса n_s	≈ 37
9	Мощность приводной турбины N_t , л.с. (кВт)	≈ 130 (95,7)

Продольный разрез спроектированного ТНА представлен на рис. 4. При его разработке широко использовался опыт специалистов по ЖРД ОКБ Н.Д. Кузнецова, принимавших участие в отработке и эксплуатации ЖРД НК-15/15В и НК-33/43 [4,6].

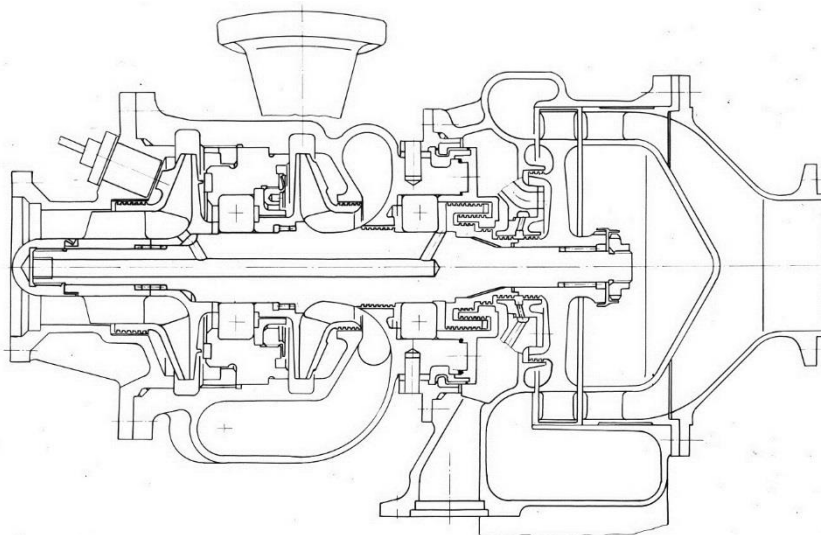


Рис. 4 – Продольный разрез водородного ТНА двигателя НК-144ВТ

Разработанный ТНА выполнен с двухступенчатым водородным шнекоцентробежным насосом и одноступенчатой воздушной турбиной. Этот агрегат должен был быть изготовлен в достаточно короткое время и отработан на длительный ресурс (более 300 часов). Кроме этого, он должен был пройти параметрическую доводку в широком диапазоне расходов жидкого водорода, т.е. для всех потребных режимов работы двигателя НК-144ВТ: от взлётного до режима «малого газа».

Список литературы

1. Кузнецов Н.Д. Использование водорода в качестве топлива в авиации // В кн. Атомно-водородная энергетика и технология. Вып. 3. М.: Атомиздат, 1980. С.161-171.
2. Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т., Малышев В.В., Орлов В.Н. Внимание газы: Криогенное топливо для авиации. М.: Московский рабочий, 2001. 224 с.
3. Цыбизов Ю.И. Будущее в прошлом. Конструктор Н.Д. Кузнецов и его школа. М.: Изд. ЛитРес, 2020. 160 с.
4. Орлов В.Н., Орлова М.В. Генеральный конструктор Н.Д. Кузнецов и его ОКБ. Самара: Издательский дом «Агни», 2011. 200 с.
5. Близнюк В.И., Васильев Л.Е., Вуль В.М. и др. Правда о сверхзвуковых пассажирских самолётах. М.: Московский рабочий, 2000. 335 с.
6. Иванов А.И. Авиаконструктор Н.Д. Кузнецов в ракетном двигателестроении. // Сборник тезисов. Том 2. Научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2018). – М.: Ваш успех, 2018.– с.297-306.

Сведения об авторах

Иванов Александр Иванович начальник отдела ракетных двигателей и криогенной техники ПАО «ОДК-Кузнецов». Область научных интересов: жидкостные ракетные двигатели, криогенные газотурбинные двигатели, турбонасосные агрегаты.

Косицын Иван Петрович, кандидат техн. наук, ведущий инженер ОКБ ПАО «ОДК – Кузнецов». Область научных интересов: жидкостные ракетные двигатели, криогенные газотурбинные двигатели, турбонасосные агрегаты.

Цыбизов Юрий Ильич, д-р техн. наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, ведущий конструктор АО «Металлист-Самара»; область научных интересов: аэрогазодинамика, горение, криогенные газотурбинные двигатели.

EXPERIMENTAL TESTING OF THE NK-144 ENGINE ON LIQUID HYDROGEN

Ivanov A. I. ¹, Kositsyn I. P. ¹, Tsybizov Yu. I. ²

¹ PJSC «UEC-Kuznetsov», Samara, alex_slavross@mail.ru

² PJSC «Metallist-Samara»

Keywords: liquid hydrogen, gas turbine engine, afterburner, combustion stability, turbo pump unit.

The stages of development of the NK-144VT hydrogen gas turbine engine, which preceded the development of the NK-8-2u engine for the Tu-155LL cryogenic aircraft, are presented. Experimental dependences illustrate the efficiency and stability of the burning process in the afterburner chamber of the NK-144 engine. The data and the longitudinal section of the turbopump unit for supplying liquid hydrogen to the engine are given.