

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ НК-144 НА ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

Иванов А.И.<sup>1</sup>, Н.С. Занина Н.С.<sup>1</sup>, Ю.И. Цыбизов Ю.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара (alex\_slavross@mail.ru)

<sup>2</sup>АО «Металлист-Самара» (2422490t@mail.ru)

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

Исследования возможности использования в авиации криогенного вида топлива - жидкий водород и сжиженный природный газ, 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 и огромный хладоресурс. Опубликованные исследования показывают, что высокая теплота сгорания 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 самолётов 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 им. П.И. Баранова, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского и институтах ВВС, были объединены в комплексные программы «Холод-1», «Холод-2» и «Холод-3». Учитывая успешный опыт работы в области создания ЖРД, основным исполнителем ОКР по госпрограмме «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 газотурбинных двигателях (ГТД) [1, 2].

Первой работой ОКБ по водородной тематике для авиационных ГТД стал двигатель НК-144ВТ (рис. 1) для сверхзвукового пассажирского самолёта (СПС) Ту-144, на котором отрабатывались вопросы использования газообразного водорода в качестве топлива в форсажной камере (ФК), а затем и в основной камере (ОК). Планировалось, что эти камеры должны надёжно и эффективно работать и на водороде, и на керосине.

В результате проведенных работ отобраны варианты конструкции 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.

Обобщённые результаты отработки на ОК 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 камер на режимах розжига устойчива.



Рисунок 1 – Двигатель НК-144ВТ

После успешной отработки 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 табл. 1. Продольный разрез спроектированного ТНА представлен на рис. 2. При его разработке широко использовался опыт специалистов ракетного ОКБ-2 Н.Д. Кузнецова, принимавших участие в разработке, стендовых и лётных испытаниях ЖРД НК-15/15В и НК-33/43 [3, 4].

Таблица 1 – Параметры водородного ТНА двигателя НК-144ВТ 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 <sup>2</sup>	2,4
3	Плотность водорода на входе в насос, $\rho_{вх}$ , кг/м <sup>3</sup>	68
4	Массовый расход водорода $\dot{m}$ , кг/с	0,8
5	Давление водорода на выходе из насоса $P_{вых}$ , кгс/см <sup>2</sup>	46,4
6	Число ступеней насоса $Z_{ст}$	2
7	Частота вращения ротора насоса $n$ , об/мин	40600
8	Коэффициент быстроходности ступени насоса $n_s$	$\approx 37$
9	Мощность приводной турбины $N_T$ , л.с. (кВт)	$\approx 130 (95,7)$

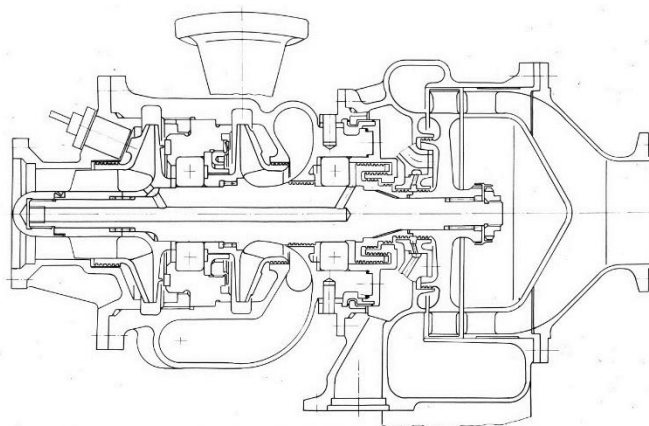


Рисунок 2 – Продольный разрез водородного ТНА двигателя НК-144ВТ

Этот проект ТНА был конструктивно выполнен с двухступенчатым водородным шнекоцентробежным насосом и одноступенчатой воздушной турбиной. По планам, 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”. Однако анализ реальных сроков изготовления и отработки такого ТНА авиационного назначения показал, что этот процесс не будет коротким по времени.

В этой связи, с целью ускорения работ по отработке двигателя НК-144ВТ на жидком водороде, по инициативе Н.Д. Кузнецова была использована водородная насосная матчасть одного из двигателей смежной отрасли. В целом, переход на турбонасосную систему подачи жидкого водорода позволил провести комплексную стендовую отработку двигателя НК-144ВТ и его систем, а также не менее сложных технологий для надёжного функционирования стендовых криогенных систем.

В настоящее время тема применения жидкого водорода в отечественных летательных аппаратах не снята с повестки дня, т.к. сформирована правительственная программа «Развитие водородной энергетики в России». В ней упомянуты отрасли, в которых следует выполнить НИИОКР, в частности, в авиационном и железнодорожном транспорте.

В этой связи, в ОКБ ПАО «ОДК-Кузнецов» активно развёрнуты работы по цифровизации всех информационных ресурсов по криогенной тематике, сохранённых в архивах предприятия, и сбережению матчасти по двигателям НК-144ВТ и НК-88, их узлов, агрегатов, деталей и сборочных единиц.

### **Список литературы**

1. Кузнецов Н.Д. Использование водорода в качестве топлива в авиации. [Текст] // 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. Орлов В.Н., Орлова М.В. Генеральный конструктор Н.Д. Кузнецов и его ОКБ. – Самара: Издательский дом «Агни», 2011. – 200 с.
4. Иванов А.И. Авиаконструктор Н.Д. Кузнецов в ракетном двигателестроении. [Текст] // Сборник тезисов. Том 2. Научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2018). – М.: Ваш успех, 2018. – С. 297-306.

### **Сведения об авторах**

Иванов А.И., начальник отдела ракетных двигателей и криогенной техники ОКБ ПАО «ОДК-Кузнецов»; область научных интересов: жидкостные ракетные двигатели,

криогенные газотурбинные двигатели, турбонасосные агрегаты, промышленные криогенные насосы.

Занина Н.С., инженер-конструктор; область научных интересов: криогенные двигатели, турбонасосные агрегаты, разработка программных комплексов для анализа испытаний двигателей и агрегатов.

Цыбизов Ю.И., доктор техн. наук, профессор кафедры “Теплотехника и тепловые двигатели” 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**

A. I. Ivanov <sup>1</sup>, N. S. Zanina <sup>1</sup>, Yu. I. Tsybizov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> PJSC "UEC-Kuznetsov", Samara (alex\_slavross@mail.ru)

<sup>2</sup> PJSC "Metallist-Samara" (2422490t@mail.ru)

*Keywords: liquid hydrogen, gas turbine engine, afterburner, gorenje stability, turbopump unit*

The stages of development of the NK-144VT hydrogen gas turbine engine, which preceded the development of the NK-88 engine for the Tu-155LL cryogenic aircraft, are presented. Experimental dependences illustrate the efficiency and stability of the gorenje 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.