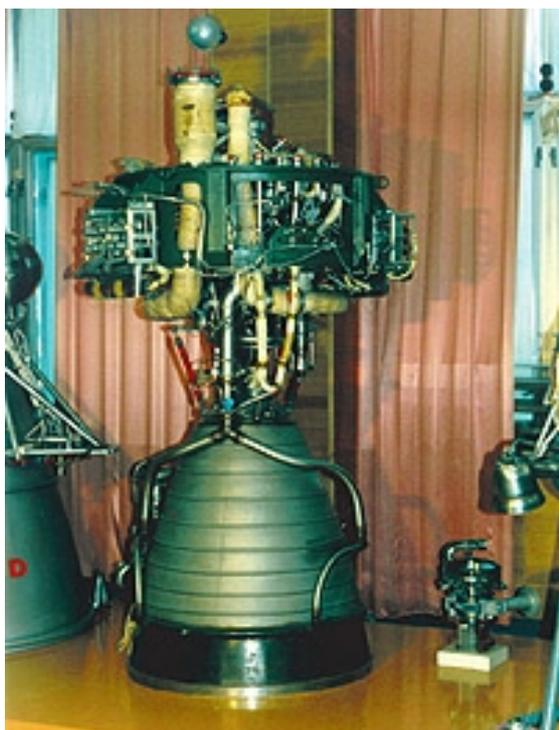


## Эпопея «Пятьдесят шестого»

**И. Черный**

История применения водорода на ракетах в нашей стране сравнительно коротка, хотя такие предложения выдвигались еще до «официального» начала космической эры.



Инициативные работы начались в авиадвигателестроительном конструкторском бюро (КБ) А.М.Люльки, который при поддержке М.В.Келдыша совместно с А.М.Исаевым предложил С.П.Королеву создать первые образцы кислородно-водородных ЖРД. В качестве первоочередной определили задачу разработки двух двигателей для перспективных модификаций ракеты Н-1: 11Д57 тягой 40 тс для блока «С» (третья ступень) и 11Д56 тягой 7.5 тс для космического разгонного блока «Р» (четвертая ступень). Впоследствии Н.Д.Кузнецов, создававший кислородно-керосиновые ЖРД для Н-1, обещал разработать кислородно-водородный двигатель тягой 200 тс для второй ступени ракеты.

Двигательные КБ решали, кроме технических и организационных вопросов создания ЖРД, сложные задачи по освоению криогенной культуры. Это определялось тем, что смежные организации – КБ измерительной техники, ИПРОМАШПРОМ, НИИХМ, НИИТП, ГИПХ, ГИАП, ВНИИКРИОГЕНМАШ – не имели значительной производственной базы. Первые образцы датчиков, стеновой арматуры, трубопроводов и т.п. приходилось изготавливать на производстве КБХМ А.М.Исаева, КБ «Салют» А.М.Люльки и ОКБ-1 С.П.Королева.

Специалисты А.М.Исаева и А.М.Люльки широко использовали опыт обращения с жидким кислородом, предоставленный КБ энергетического машиностроения В.П.Глушко, а также комплексом М.В.Мельникова и Б.А.Соколова ОКБ-1, где в тот момент создавался кислородно-керосиновый блок «Д» для ракеты Н-1. (Кстати, необходимо отметить, что наличие блока «Д» все время тормозило внедрение блока «Р», который представлялся «журавлем в небе».)

Весной 1960 г. работы по криогенному двигателю 11Д56 начались в ОКБ-2 (с 1959 г. – КБ химического машиностроения) А.М.Исаева, которое до этого создавало ЖРД на долгохранимом топливе, в основном для зенитных ракет С.А.Лавочкина и П.Д.Грушина. Для упрощения задачи специалисты КБХМ (по рекомендации сотрудника института ядерных исследований г.Дубны Я.Зельдовича) приняли, что работоспособность конструкции агрегата, проверенного на жидком азоте, будет свидетельствовать о работоспособности этого узла на жидком кислороде и водороде. В тот момент главными задачами являлись подготовка внутренних поверхностей (обезжиривание), подбор материалов (стали аустенитного класса Я1Е и ЭП222), трущихся пар (сталь, бронза), а также решение задач измерения – создание термпар, термометров сопротивления и датчиков сплошности. По остальным параметрам (давление, обороты и т.п.) на первых порах использовались «обычные» датчики, не аттестованные для таких измерений.

На свой страх и риск в КБХМ использовали приводы серийных ЖРД на долгохраняемых компонентах, работающие в диапазоне температур  $\pm 40^\circ$ , хотя по ТЗ оговаривались температуры жидкого азота.

Резко встал вопрос о теплоизоляции поверхностей агрегатов и трубопроводов: по ним шел поток жидкого водорода и они охлаждались ниже температуры ожигения воздуха. За счет привнесения от ожигаемого воздуха огромного теплопритока (даже при пуске горючего с большим расходом) водород вскипал, и магистраль запиралась паровыми включениями.

Специалисты хотели бы поместить весь двигатель в барокамеру, но это требовало сверхгромоздкого стендового оборудования. Затем был предложен оригинальный способ изоляции агрегатов и трубопроводов пеноматериалом. Не представляя всей сложности тепломассообменных процессов, первый двигатель «С5.24» полностью «запенополиуретанили» (даже сопло изнутри) и отправили 31 декабря 1965 г. на испытание в НИИХМ «как Снегурочку». Испытание состоялось 31 января 1966 г.

Двигатель имел перспективную замкнутую схему с дожиганием в камере «сладкого» (восстановительного) генераторного газа, с блоками бустерных насосных агрегатов (БНА), расположенных сразу за топливными баками. При оптимальном давлении 60 атм весь расход водорода шел через рубашку камеры. Турбонасосный агрегат (ТНА) с двухступенчатым насосом водорода имел на основном режиме 40000 об/мин. Оговаривалось семикратное включение двигателя при времени работы  $\sim 1000$  сек.

ЖРД имел вертикальную компоновку и размещался внутри торового бака окислителя блока «Р». Камера сгорания и ТНА соединялись прямым коротким газоводом. Турбины БНА раскручивались генераторным газом. При геометрической степени расширения сопла 108 расчетный удельный импульс составлял 440 ед. при соотношении окислитель/горючее 6.5.

Отработка камеры сгорания и газогенератора (ГГ) началась на вытеснительном стенде с газообразным водородом при температуре окружающей среды и жидким кислородом. Для охлаждения использовался весь расход водорода, температура которого при выходе из рубашки составляла  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ .

При первых испытаниях ГГ в 1962 г. столкнулись с проблемой надежного зажигания смеси. Поджигая порохом все топливо, проходящее через газогенератор, обнаружили, что при расходе пороха 1 кг/с топливная смесь разогревается всего на  $20^{\circ}$  и ее воспламенения не происходит. Было опробовано зажигание топлива локальным факелом на одной форсунке. В результате при надежном воспламенении расход пороха снизился на порядок. После испытаний из 18 вариантов головок ГГ и камеры сгорания выбрали оптимальный.

Последующие испытания показали высокие качества кислородно-водородного топлива, которое позволяло работать в широком диапазоне давлений в камере и соотношения компонентов без возникновения низко- и высокочастотных пульсаций давления. Подтвердились прекрасные охлаждающие свойства водорода.

Испытания насоса горючего на жидком водороде начались в 1965 г. Водород доставили из Дубны в первой отечественной передвижной емкости. Было непонятно, как он поведет себя в центробежном насосе: удастся ли по стендовому трубопроводу доставить его до насоса в жидком виде; произойдет ли захват насосом компонента; какое давление за насосом будет на расчетных оборотах; сработают ли нормально подвижные уплотнения и т.д.? Окончательно ТНА был отработан лишь на двигателе.

К концу 1965 г. на жидком кислороде автономно испытали арматуру (клапаны, регуляторы и т.п.) и насос окислителя. Можно было приступать к испытаниям двигателя.

Характеристики КВД 1 Д56	
1. Тяга, тс	7.5
2. Давление в камере сгорания, ата	60.0
3. Удельный импульс, сек	447.5
4. Соотношение компонентов	6.0
5. Максимальная длина, мм	2500
6. Максимальный диаметр, мм	954
7. Диаметр среза сопла, мм	954
8. Диаметр критического сечения, мм	91.8
9. Степень расширения (геометрическая)	108
10. Частота вращения ТНА, об/мин	40000

Для упрощения работ предложили испытать ЖРД не по замкнутой, а по открытой схеме. Для создания штатного горения и раскрутки ТНА решили запустить камеру сгорания и ГГ на газообразном водороде и жидком кислороде. На насосы ТНА поступали жидкие компоненты из отдельного хранилища. Подача жидкого водорода осуществлялась лишь в рубашку камеры с последующим сбросом наружу через дроссельную шайбу.

Такой двигатель (С5.24) был испытан 31 января 1966 г., проработал при пуске 40 сек,

но при останове разрушился ТНА.

После доработки, 8 апреля 1967 г. удалось испытать первый экземпляр 11Д56 по штатной замкнутой схеме. С тех пор началась длительная доводка, в процессе которой были найдены решения, обеспечивающие невиданный для ЖРД ресурс и диапазон работоспособности агрегатов, решены многие проблемы, в т.ч. высокочастотной неустойчивости процесса горения в камере сгорания и газогенераторе.

Для испытаний двигателя 11Д56 «на совместимость» с разгонным блоком ОКБ-1 разработало стендовый блок «Р». В его создании, а также в доработке всей стендовой базы непосредственное участие принимали специалисты КБХМ. По сложившейся практике, они разрабатывали узлы и агрегаты двигательной установки – системы наддува баков газифицированными компонентами, заправочные горловины, электропневмоклапаны (ЭПК), клапаны входа и т.п. На двигателе и блоке внедрялась технология цельносварных соединений и стыков, что было особенно важно, так как герметизация разъемных соединений на криогенных компонентах осложнена тем, что некоторые из них в начале пуска работают на низких температурах (вплоть до температур жидкого водорода), а на режиме – при температурах до 1100 К.

В результате огромных усилий многих организаций в СССР была создана промышленная криогенная индустрия для применения в ракетной технике.

Были достигнуты:

- работоспособность ЖРД по тяге на камерном 10%-ном режиме (без горения в ГГ) и основном режиме от 40 до 130% при соотношении компонентов топлива  $6.5 \pm 50\%$ ;
- резкий рост удельного импульса при увеличении геометрической степени расширения сопла (во многом благодаря экспериментальным работам КБ «Сатурн»).

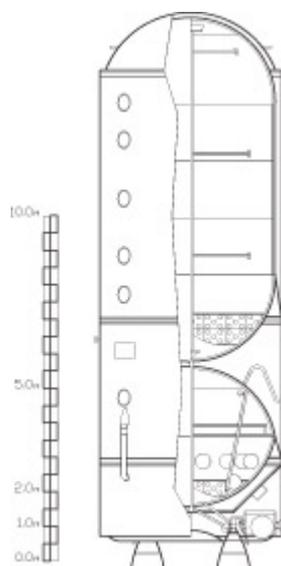
Решены следующие научно-технические проблемы:

- определены материалы для работы в среде жидкого и газообразного водорода;
- созданы средства измерения температур, расходов, сплошности потока жидкого водорода;
- поняты и освоены процессы захолаживания магистралей;
- обеспечено надежное зажигание кислородно-водородного топлива оптимальными пиротехническими средствами;
- использованы охлаждающие свойства водорода;
- получены высокие энерго-массовые характеристики (выше аналогичных кислородно-водородных двигателей США);

- обеспечена надежность работы КВД в широком диапазоне тяги и соотношения компонентов.

Стендовые испытания позволили установить, что удельный импульс ЖРД можно повысить с 440 до 447.5 сек при уменьшении соотношения компонентов с 6.5 до 5.9, что давало возможность увеличить грузоподъемность разгонного блока или расширить область его применения.

11Д56 стал первым отечественным КВД, предназначенным для многократного запуска в условиях космоса. Некоторые из условий его работы (тепловая обстановка, невесомость, несплошность водорода и т.п.) невозможно воспроизвести на стендах. Имитация этих условий проводилась при разработке специальных методов испытаний, базирующихся на современных представлениях о физике протекающих процессов и опыте эксплуатации отечественных «неводородных» разгонных блоков.



Кислородно-водородный разгонный блок «Ср» для одного из вариантов ракеты Н-1.

В 1974 г. все работы по Н-1 были прекращены. Примерно в это же время в КБ «Салют» А.М.Люльки остановилась разработка двигателя 11Д57, дошедшего до стадии стендовых испытаний. Ценой больших усилий энтузиастов испытания блока «Р» и двигателя 11Д56 продолжались до 1979 г. Венцом отработки были успешные тоекратные испытания с давлением водорода при входе в БНА, равным давлению упругости пара, т.е. без наддува бака горючего.

По удельному импульсу отечественный КВД превзошел американский «аналог» RL-10А-3 (434 сек).

Таким образом, программа создания первого отечественного кислородно-водородного двигателя и разгонного блока для стендовых испытаний была выполнена. Весь ход отработки показал – несмотря на скептическое отношение к жидкому водороду – выгодные возможности его использования в качестве горючего.

Перспективность применения КВД поняли американцы, затем французы, китайцы и японцы, создавшие свои кислородно-водородные разгонные блоки. Поняли индусы, связывающие дальнейшее развитие своей ракетной промышленности с использованием водорода.

В СССР же с 1979 г. по 1982 г. в «водородных» работах наступила пауза.

Лишь при развертывании в НПО «Энергия» работ по ракетно-космической системе «Энергия–Буран» в КБ Химической автоматики (г.Воронеж) началась разработка мощного двигателя 11Д122, в которой нашли отражение результаты прежних исследований. Система успешно прошла летную отработку в двух полетах.

С 1982 г. КБ «Салют» продолжило работы по созданию отечественного КВРБ с модифицированным 11Д56 для применения на носителе «Протон-М» и вариантах системы «Энергия». КБХМ разработало модификацию двигателя, отличающегося от исходного следующими параметрами:

- удельный импульс вырос на 13.5 ед. (с 447.5 до 461 сек) путем увеличения степени расширения со 108 до 198 за счет введения охлаждаемого насадка;
- для создания боковых усилий вместо качания ЖРД введены две рулевые камеры тягой по 200 кгс каждая, что позволило ограничиться относительно легкими электроприводами;
- бустерные насосы горючего и окислителя размещены внутри соответствующих баков КВРБ;
- разработан ЭПК на ток срабатывания 0.34 А при подаче в него гелия с температурой до 80 К;
- для полной герметизации двигателя все его магистрали закрыты пироклапанами и мембранами принудительного прорыва, которые вскрываются по команде только в космосе;
- отработана надежная, простая и легкая (1.3 кг) система пиротехнического зажигания, модернизированная под шестикратное срабатывание;
- для уменьшения высоты ЖРД изменена его компоновка: ТНА (ранее соосный с камерой сгорания) расположен «параллельно».

Характеристики КВД 11Д56У		
	Основная камера	Рулевая камера
1. Тяга, тс	7.1	0.4 (2×0.2)
2. Давление в камере, ата	56.0	39.5
3. Удельный импульс, сек	461	440
4. Соотношение компонентов	6.0	5.5
5. Максимальная длина, мм	2146	538
6. Максимальный диаметр, мм	1580	610
7. Диаметр среза сопла, мм	1267	140
8. Диаметр критического сечения, мм	89.9	18.6
9. Степень расширения (геометрическая)	198	57
10. Частота вращения ТНА, об/мин	41000	–

Отработка агрегатов и двигателя велась на созданной в НИИХМ стендовой базе (на ресурс – на стенде В2Б, запуск с имитацией космических условий – на стенде В1Б, где двигатель помещен в барокамеру, к срезу сопла подстыкована газодинамическая труба, из которой эжекторами откачиваются газы до давления 15–20 мм рт.ст.).

БНА горючего и окислителя размещены в пусковых емкостях объемом 2 м<sup>3</sup> и 1 м<sup>3</sup>, в которых создавалось давление вплоть до давления упругости газа. Имитация несплошности потока на входе в БНГ проводилась путем уменьшения оборотов последнего и соответствующего снижения напора. Теплопритоки создавались заведомо большими, чем в эксплуатации.

Двигатель с высотным насадком пока не испытан, хотя для него создали стенд с парэжектором на базе кислородно-водородной камеры сгорания с давлением до 150 атм разработки КБХМ.

В результате отработки модернизированного 11Д56У (КВД-1) достигнут удельный импульс 461 сек при К=6.0.

Специалисты КБХМ считают, что дальнейшее развитие отечественной ракетно-космической техники немыслимо без применения водорода. Они надеются использовать опыт создания двигателей семейства КВД в перспективных разгонных блоках российской разработки.

#### **Источники:**

1. М.К.Сирачев. «История и решение некоторых проблем создания первого отечественного кислородно-водородного ЖРД...», доклад на XX научных чтениях по космонавтике.
2. М.К.Сирачев. «Из опыта новых разработок кислородно-водородного ЖРД...», доклад на XXI научных чтениях по космонавтике.
3. Jane's Space Directory, 1997-98, p.239.
4. «Оружие России», том VI «Ракетно-космическая техника», с.567.
5. И.Афанасьев. «Свободная дискуссия о пользе водорода и не только...». «Новости космонавтики» №13, 1998, с.26-27.