

МЕХАНИЗМ СОЗДАНИЯ НАПОРА КРИОГЕННЫХ НАСОСОВ ПРИ "ГОРЯЧЕМ" ЗАПУСКЕ ЖРД

Посвящается светлой памяти Виктора Мартыновича Калнина, талантливого ученого, друга и товарища по совместной работе в области создания отечественной ракетно-космической техники.

В практике создания криогенных двигателей с минимальным временем запуска (так называемый "горячий запуск") нашло применение ускоренное (неполное) охлаждение насосов, что позволило повысить экономичность, получить выигрыш в массе силовой установки и значительно улучшить эксплуатационные характеристики двигателей. Ускоренное охлаждение криогенных систем подачи, по-видимому, применимо и в авиационных ГТД, например, при отказах или в других случаях. Для правильной организации процесса запуска существенное значение приобретает вопрос о напоре, который могут развить криогенные насосы в условиях неполного охлаждения конструкции. В данной статье приведены результаты исследования механизма создания напора криогенными насосами при "горячем" запуске двигателей, проведенного методом моделирования на жидком азоте в лабораторных условиях и на жидком кислороде в условиях натуральных систем.

Валентин Шерстянников, д.т.н.

Запуск ЖРД, использующих низкокипящее топливо, осуществляется обычно с предварительным, достаточно длительным (более 500 с) захлаживанием насосов криогенных компонентов. При этом элементы конструкции насосов и стенки трубопроводов принимают температуру, близкую к нормальной температуре низкокипящего топлива. Благодаря этому во время запуска двигателей насосы работают на однофазной жидкости и развивают нормальный напор в соответствии со своими обычными характеристиками.

Теория медленно протекающих нестационарных процессов охлаждения трубопроводов криогенными жидкостями, не сопровождающихся резкими изменениями гидродинамических параметров потока, является достаточно развитой, и для расчета таких процессов в литературе имеются критериальные зависимости. При ускоренном проведении запуска общее время рассматриваемых процессов не превышает нескольких секунд или даже долей секунды, в этом случае запуск проводится при неполном охлаждении насосов и, следовательно, при подаче частично газифицированных компонентов. Для правильной организации процесса важно знать, какой напор могут развивать криогенные насосы при запуске в

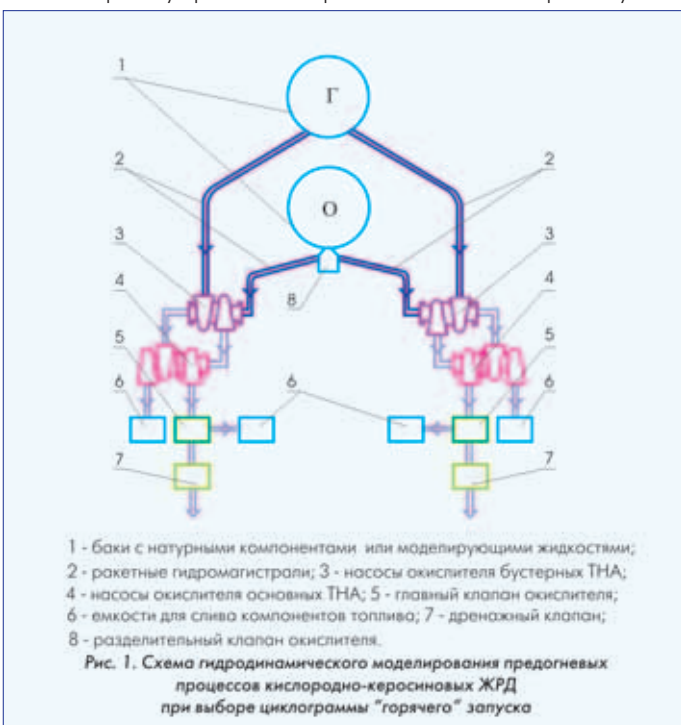
условиях ускоренного их охлаждения. Разработка и внедрение в опытных и перспективных двигателях систем "горячего" запуска, не требующих предварительного охлаждения конструкции, позволяет повысить экономичность, получить выигрыш в массе и значительно улучшить эксплуатационные свойства двигателей.

Впервые метод и схема запуска без предварительного охлаждения были реализованы на кислородно-керосиновом двигателе 1Д58 для ракеты типа "Союз". Этот метод запуска был применен также на двигателях НК-39 и НК-31 конструкции ОКБ Н.Д. Кузнецова для ракеты Н-1. Возможно применение такой системы запуска также и на перспективных кислородных и водородных двигателях. Поэтому представляет интерес разработка теории и методов расчета таких систем.

Для проектирования и доводки "горячего" запуска двигателей, наряду с развитием экспериментальных подходов, требуется создание достаточно надежных расчетных методов. Центральным моментом в построении математических моделей является разработка адекватного математического описания нестационарных теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в незахоложенных быстроразгоняющихся центробежных насосах. Теоретическое решение этой задачи является чрезвычайно сложным. Математических моделей и критериальных зависимостей для расчета таких процессов в литературе нет. Имеется значительный экспериментальный опыт, накопленный в этой области НПО "Энергия" и ОКБ Н.Д. Кузнецова, и построенные на нем теоретические представления о физической модели данного процесса. Задача состоит в дальнейшем развитии этих представлений и придании им более строгих количественных выражений.

Ниже приводятся результаты экспериментального изучения основных закономерностей таких процессов, проведенного методом гидродинамического моделирования. Оно включало в себя холодные проливы натуральных двигателей и их связок на специальных экспериментальных установках в ОКБ с целью выбора циклограммы управления запуском (рис. 1), а также исследование общих закономерностей сложных нестационарных теплофизических и гидродинамических процессов в системе подачи криогенного компонента двигателя на лабораторном стенде с подробным препарированием гидравлического тракта. Выявленные в процессе исследования закономерности присущи широкому классу систем данного типа.

Следует отметить, что в процессе создания двигателей вся информация, необходимая для правильной организации процесса запуска без предварительного охлаждения, получалась в основном при холодных испытаниях, а в ходе огневых



испытаний проводилась только окончательная проверка выбранных циклограмм. Такой методический подход позволил при отработке "горячего" запуска добиться полного исключения отказов двигателей.

В процессе лабораторных испытаний исследовалась система подачи применительно к двигателю НК-39, включающая основную ТНА с кислородным насосом. Испытания проводились на жидком азоте при строгом выдерживании требуемых параметров жидкости перед пусковым клапаном. Раскрутка турбины производилась пневмостартером. Пусковой клапан открывался с опережением на 3...20 с, необходимым для ускоренного охлаждения насоса. Таким способом имитировался процесс запуска двигателя.

В ходе эксперимента малоинерционной аппаратурой регистрировались давление, температура, объемный расход и сплошность рабочей среды на входе и выходе насосов, а также частота вращения ТНА и температура наружных стенок по длине трубопроводов. Давление азота на входе в пусковой клапан перед началом экспериментов устанавливалось равным 0,4 МПа, температура 82К (в отдельных опытах 91К), исходная температура конструкции насоса и трубопроводов составляла 243...263К.

В результате проведения экспериментов выявились следующие закономерности. На начальном этапе процесса сразу после открытия пускового клапана (рис. 2) имеют место три характерных участка:

- 1) на временном отрезке 0...0,4 с - заполнение входного трубопровода до подхода фронта жидкости к насосу;
- 2) на временном отрезке 0,4... 0,7 с - резкое снижение температуры и содержания газовой фазы в потоке на входе в насос и поступление в насос практически только жидкой фазы;
- 3) на временном отрезке 0,7...1 с - увеличение содержания газовой фазы на входе в насос.

На первом участке к моменту 0,4 с объемный расход рабочей среды на входе в насос достигает больших ("бросковых") значений порядка 16...20 л/с, затем он резко падает, вызывая сильный гидроудар по давлению на входе (выше 1,3 МПа); на остальном участке процесса (при $t > 3$ с) расход остается примерно постоянным, равным 2 л/с. При этом в интервале времени 1...20 с регистрируется постепенное уменьшение газосодержания в потоке до величины, не превышающей 5...7 % в конце указанного интервала. На этом временном отрезке стенки трубопровода остаются еще достаточно

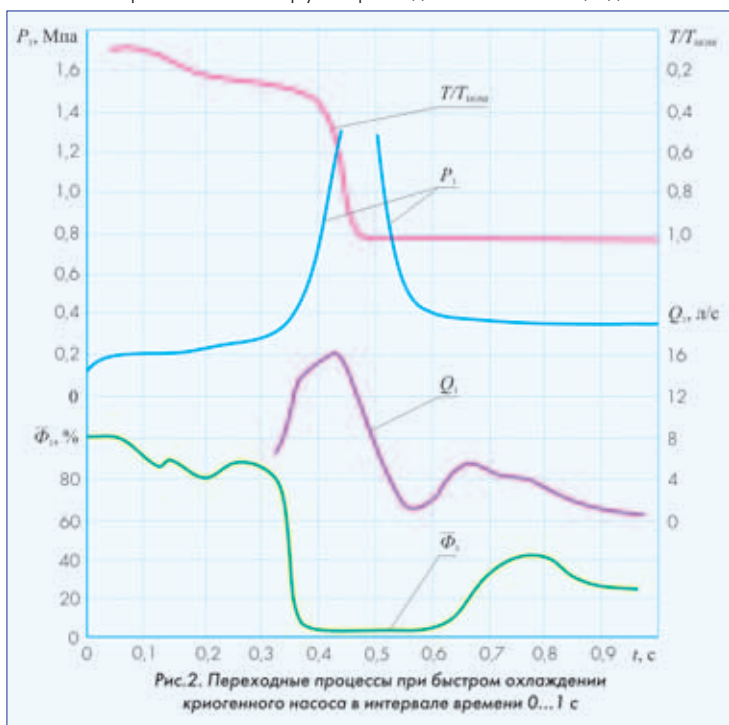


Рис.2. Переходные процессы при быстром охлаждении криогенного насоса в интервале времени 0...1 с

теплыми, их температура значительно (примерно на 80К) превышает температуру криогенной жидкости. Изменение объемного расхода, регистрируемого на выходе насоса, соответствует кривым изменения газосодержания на входе с учетом газификации жидкости в полости насоса. К моменту времени $t = 20$ с расходы на входе в насос и выходе из него сравниваются.

Наиболее важным для практики является протекание процесса на втором участке. Оно связано с образованием стержневой структуры потока во входном трубопроводе при большом расходе криогенной жидкости. Жидкое ядро потока занимает при этом основную часть проходного сечения канала и отделено от стенок тонким кольцевым слоем пара.

Реализация практически однофазного течения при высоких значениях температурного напора оказывается возможной благодаря пленочному кипению криогенной жидкости, возникающему на начальном этапе процесса. Образующийся при пленочном режиме кипения у стенки магистрали тонкий паровой слой, обладающий высоким термическим сопротивлением, обеспечивает сохранение жидкой фазы в ядре потока при достаточно высокой температуре стенок трубопровода. Это позволяет осуществлять запуск не полностью захлажденных насосов без срыва напора.

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость величины удельного теплового потока q от стенки к жидкому азоту в сосуде большого объема от температурного напора.

Значения коэффициента теплоотдачи в тракте исследуемого насоса рассчитаны по формуле:

$$q = a\Delta T = -\rho_w \cdot \delta_w \cdot (1 + \delta_w/D) \cdot c_w \cdot (dT_w/dt),$$

полученной из решения обратной задачи теплопроводности, а также на основании выражения:

$$Nu \cong a \cdot D / \lambda_w = 0,023 \cdot Re_{ж}^{-0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,4} (T_w / T_{ж})^{-0,34},$$

описывающего квазистационарный теплообмен в канале диаметром D .

Здесь ρ_w , c_w и λ_w - плотность, теплоемкость и теплопроводность материала стенки; δ_w и T_w - толщина и температура стенки. Величины коэффициента теплоотдачи a , определенные двумя независимыми способами, существенно отличаются друг от друга. Это свидетельствует о сложности задачи и необходимости развития специальных адекватных ей методов расчета нестационарных коэффициентов теплоотдачи.

На рис. 4 приведен график изменения напора насоса при запуске с различными временами задержки включения стартера ($t_{cm} = 3; 5,5; 10$ и 20 с). Процессы получены при давлении на входе в насос, значительно превышающем критическое по срывной кавитационной характеристике насоса. По кривым нарастающей относительного напора $\bar{H} = (H/n^2)/(H/n^2)_{уст}$, взятого по отношению к напору, получаемому на конечном установившемся режиме $(H/n^2)_{уст}$, можно судить о характере изменения напора криогенного насоса в условиях неполного ускоренного охлаждения. Поскольку при данной серии опытов не представилось возможным задать время задержки включения стартера меньше 3 с, на графике отсутствует кривая изменения напора, соответствующая "захвату" жидкости вращающимся насосом на втором участке процесса ($t = 0,4...0,7$ с; $\bar{\Phi} = 5...7$ %). Другие опыты показали, что на начальном этапе процесса в ограниченном интервале времени, когда в насос поступает в основном жидкая фаза, он успевает развить достаточно высокий напор, необходимый для поддержания повышенного расхода криогенной жидкости и обеспечения нормального запуска двигателя. Величина этого интервала времени увеличивается с возрастанием отношения величины расхода через насос к массе захлаживаемой конструкции (входная магистраль и насос) $G_H/(M_{BX}+M_H)$.

Для систем подачи криогенного топлива двигателя указанная относительная величина является весьма большой. Благодаря этому длительность интервала времени, в пределах кото-

рого может осуществляться экстренный запуск с неполностью захлаженными насосами, составляет 5...10 с и более. Этого времени обычно достаточно для проведения всех операций управления запуском.

В описываемой серии опытов раскрутка насоса начиналась в момент времени $t > 3$ с, т.е. уже после окончания второго участка процесса, когда газосодержание в потоке на входе в насос значительно возросло. Из-за этого напор криогенного насоса появлялся не сразу, а только после некоторого периода ускоренного захлаживания конструкции повышенным расходом рабочей среды, возникавшим благодаря значительному уменьшению гидравлического сопротивления вращающегося насоса по сравнению с остановленным. Затем, при достижении определенной степени захлаживания, происходит резкое нарастание напора, и насос выходит на нормальный режим работы. С увеличением времени задержки включения стартера t_{cm} по отношению к моменту открытия пускового клапана уменьшается время задержки появления напора насоса t_H по отношению к моменту начала его раскрутки. При $t_{cm} = 3$ с задержка появления напора составляет $t_H = 2$ с, а при $t_{cm} = 20$ с она уменьшается до $t_H \approx 0,07$ с. Полученные результаты показывают, что ускоренное охлаждение и запуск криогенных насосов могут производиться и таким путем, но при этом время запуска и предпусковой выброс компонентов получаются значительно большими, чем при запуске насосов в указанном выше наиболее благоприятном начальном интервале времени (на втором участке), когда на входе в насос существует стабильный стержневой режим течения с малым содержанием газовой фазы.

Суммируя изложенное, можно сформулировать следующие положения. В начальный период ускоренного охлаждения криогенных насосов благодаря большому расходу криогенной жидкости возникает достаточно продолжительный стержневой режим течения на входе в насос с пленочным кипением жидкости и малым содержанием газа в потоке. Этот режим стабильно поддерживается некоторое время благодаря высокому термическому сопротивлению тонкого периферийного слоя пара, образующегося при пленочном кипении жидкости. Если раскрутку насоса произвести в интервале времени, когда существует этот режим, то насос будет создавать напор, достаточный для вывода системы подачи на рабочий режим. После выхода системы на режим дальнейшее

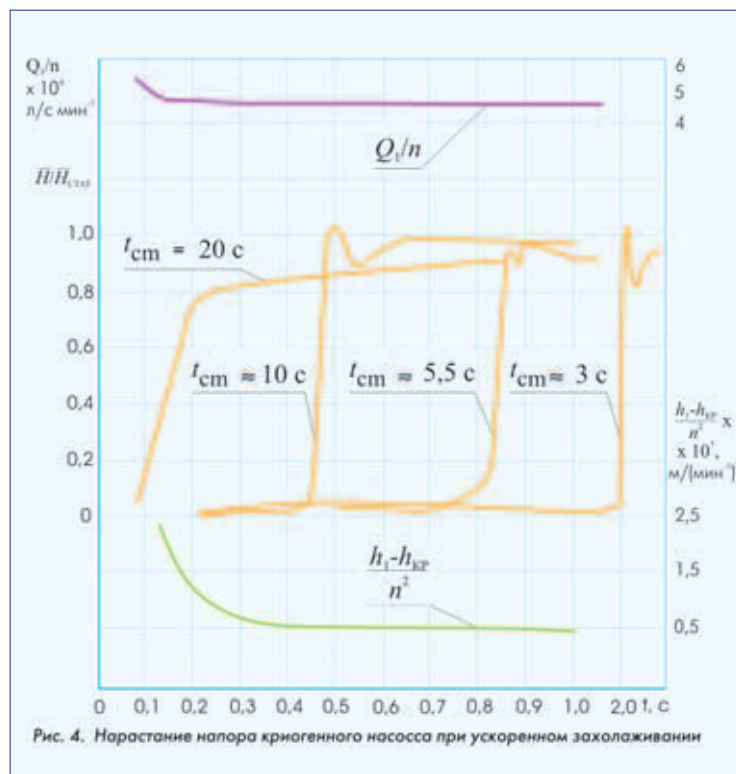
захлаживание конструкции протекает стабильно при повышенном расходе жидкости.

При другом возможном способе ускоренного охлаждения криогенных насосов, основанном на увеличении расхода охлаждающей среды при ранней раскрутке насоса, общее время запуска двигателей также сокращается, но при этом увеличиваются достартовые расходы компонентов и требуется большая продолжительность работы пусковых стартеров. Для определения наиболее благоприятных условий ведения процесса по этой схеме необходима многофакторная оптимизация определяющих параметров.

Холодными проливками натуральных двигателей было установлено, что оптимальное время заливки, обеспечивающее необходимые условия работы насоса в период запуска, равно 3,5...5,0 с. В двигателе НК-31 продолжительность начального этапа процесса была выбрана равной 3,5 с, а в двигателе НК-39 - в пределах 5 с, что потребовалось для выравнивания параметров в разветвленной подводящей магистрали четырехдвигательного ракетного блока. При этом был полностью исключен сброс окислителя за борт ракеты.

Стабильность работы и надежность систем запуска без предварительного охлаждения двигателей подтверждены комплексом испытаний: перегрузочных (в широком диапазоне значений внешних факторов) и специальных (с имитацией натуральных условий эксплуатации). Были проведены огневые пуски двигателей в крайних условиях, способствующих максимально ускоренному запуску, и в условиях крайне замедленного процесса. При всех испытаниях характеристики запуска без предварительного охлаждения были примерно такими же, как и для обычного запуска с предварительным охлаждением. Их показатели практически не выходили за пределы полей среднестатистического разброса параметров при обычном запуске. Надежность разработанных систем, как свидетельствовали результаты проведенных испытаний, была близка к 100 %.

Внедрение систем "горячего" запуска ЖРД позволило существенно сократить общее время запуска двигателей (до 5 с вместо 600...900 с), значительно снизить перегрузки конструкции в момент воспламенения топлива и уменьшить общую массу двигательных установок ракет-носителей. Отмеченные преимущества особенно важны при многократном запуске двигателей в полете. ▣





Вечером 21 августа с космодрома на мысе Канаверал (Флорида, США) стартовала новая ракета-носитель (РН) "Атлас" V. Успешный запуск европейского спутника был обеспечен установлен-

ным на первой ступени "Атласа" российским двигателем РД-180, разработанным и изготовленным НПО "Энергомаш им. академика В.П. Глушко". Этот двигатель уже использовался американцами ранее - он устанавливался на первой ступени РН "Атлас" III, первый старт которой с РД-180 был осуществлен 24 мая 2000 г.

ЖРД РД-180 был разработан на базе РД-170 совместно с фирмой Pratt & Whitney. Стремление "Энергомаша" выйти на американский рынок было вынужденным из-за свертывания отечественной космической программы и отсутствия государственного заказа на разработку и производство новых двигателей. Попытка оказалась успешной: высокий технический уровень и качество разработки позволили "Энергомашу" в начале 90-х годов выиграть тендер на создание двигателя для РН "Атлас" III, разрабатываемого корпорацией "Локхид-Мартин". В соответствии с предварительным соглашением предполагалось изготовление и поставка в США 101 двигателя. Пунктуальное выполнение контракта на поставку первых 20 двигателей РД-170 и успешные старты "Атласов" позволяют надеяться на продолжение взаимовыгодного сотрудничества.

Средства, полученные от выполнения коммерческих контрактов, позволили НПО "Энергомаш" организовать проведение научно-исследовательских работ, связанных с созданием новых двигателей. Среди них можно отметить разработку многоразовых трехкомпонентных двухрежимных ЖРД семейства РД-700 (двухкамерный двигатель РД-701 предназначен для авиакосмической системы МАКС, а однокамерный РД-704 планируется использовать в составе перспективной одноступенчатой РН с вертикальными взлетом и посадкой). Специалистами НПО "Энергомаш" проводятся исследования по применению в ЖРД сжиженного природного газа (метана), а также ведется разработка новых перспективных схем ЖРД. Успешно продолжаются испытания однокамерного двигателя РД 191 для нового семейства российских РН "Ангара". Эта ракета-носитель, как ожидается, станет первой отечественной модульной ракетой. При использовании возвращаемой первой ступени "Байкал", на которой установлен РД-191, "Ангара" будет весьма недорогой и получит возможность эффективно конкурировать с аналогичными зарубежными РН по стоимости запуска.