



КИСЛОРОДНЫЙ НАСОС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ФГУП ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова":
Валерий Игнатьевич Гуров, д.т.н.
Константин Никодимович Шестаков, к.т.н.
Виктор Кузьмич Вионцев

ОАО "НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко":
Евгений Николаевич Ромасенко, к.т.н.

Представлена патентозащищенная концепция замены двухкаскадной схемы кислородного насоса (бустер + основной насос) на трехкаскадный насос. На примере расчета кислородного насоса жидкостного ракетного двигателя тягой 200 тс показаны варианты уменьшения его массы с повышением надежности и эффективности предлагаемой схемы. Рассмотрены перспективы использования трехкаскадного кислородного насоса давлением до 30 МПа для наземного применения.

Presented is a patent-defended concept of replacing two-spool oxygen pump (booster + main pump) by three-spool pump. An example of designing an oxygen pump for 200-tons thrust rocket engine shows variants of its lower mass and greater reliability and efficiency of the proposed scheme. Considered are application perspectives of a 30-MPa three-spool oxygen pump for land service.

Ключевые слова: инновация, жидкий кислород, лопастной насос, многофункциональность применения.
Keywords: innovation, liquid oxygen, vane pump, multifunction application.

Россия является единственным производителем мощных (от 40 тс) жидкостных ракетных двигателей с успешной их продажей за рубежом. У нас накоплен огромный научно-технический и технологический потенциал по дальнейшему совершенствованию перспективных ЖРД в широком диапазоне их тяги. В книгу рекордов Гиннеса внесены самый мощный ЖРД тягой 740 тс (ОАО "НПО Энергомаш им. В.П. Глушко") и самый легкий в своем классе кислородно-керосиновых двигателей тягой 150 тс - НК-33 (ОАО "Кузнецов"). Двигатели РД-180 и НК-33 на постоянной финансовой основе поставлялись до недавнего времени в США. Такое положение дел позволило сохранить научно-производственный костяк специалистов, сосредоточенных в различных ОКБ РФ (Химки - Моск. обл., Самара и др.).

В этом году исполняется 10 лет со дня проведения успешной государственной патентной экспертизы схемы 3-каскадного кислородного насоса [1]. Реализация такого насоса позволит заметно снизить массу турбонасосного агрегата ЖРД при повышении его надежности и эффективности. Одновременно проведена проработка возможности применения турбонасоса новой схемы в народном хозяйстве в связи с повышением интереса к широкому внедрению кислородно-водородных технологий, особенно в части длительного хранения газов высокого давления (до 100 МПа) на основе криогенных жидкостей.

Суть предлагаемой концепции заключается в том, что двухкаскадная насосная система подачи жидкого кислорода заменяется 3-каскадной. Такой подход согласуется с принципом поэтапного совершенствования сложных технических систем по аналогии с переходом от двухвальной к трехвальной схеме авиационного двигателя, когда для улучшения технических показателей систем созревают условия успешной реализации таких улучшений, прежде всего, в формате полученных новых результатов [2]. При этом, благодаря использованию среднего каскада насоса, обеспечивается сверхкритическое значение давления жидкого кисло-

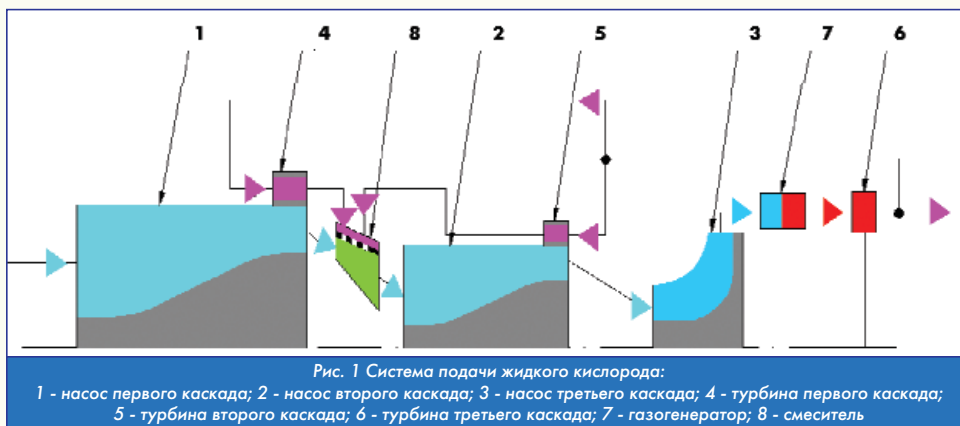
рода на входе в основной насос, а необходимая всасывающая способность всей системы обеспечивается заданием оптимальной окружной скорости бустерного насоса. Такое перераспределение напора между тремя каскадами приводит, как показывают параметрические исследования, к заметному уменьшению массы системы подачи по сравнению с двухкаскадной системой и снижению возможности разгара основного насоса. Разгар проявляется в горении металла конструкции с катастрофическими последствиями для всей материальной части двигателя. Особенность разгара - его быстротечность: время необратимого процесса не превышает 10 мс [3-5].

Разработке концепции предшествовали обширные экспериментально-теоретические исследования, проведенные в ЦиАМ (Москва), КМЗ (Куйбышев) и КБЭМ (Химки) с целью выявления особенностей разгара нагреваемых металлических образцов в потоке жидкого кислорода. Кроме того, доведены до инженерного использования расчеты и проектирование криогенных жидкостных систем с оптимизацией (по режиму работы) их кавитационных показателей. В результате исследований установлено, в частности, что стойкость металла конструкции (при трении) к разгару заметно повышается благодаря устранению кавитационных образований путем повышения давления среды выше его критического значения [5]. В жидком кислороде с давлением, большим критического значения, стойкость к разгару металла конструкции при трении существенно увеличивается: для воспламенения металла требуется большой тепловой импульс по сравнению с условиями, характерными для докритического давления кислорода при ухудшенных условиях по теплоотводу.

Наиболее полно достоинства трехкаскадной системы (рис. 1) подачи кислорода проявляются в трехкаскадных насосах мощных кислородно-керосиновых ЖРД. Как показали расчеты, снижение массы в таком насосе может достигать 40 % при тяге двигателя 200 тс. При этом одновременно повышается надежность

конструкции, поскольку уменьшается вероятность разгара насоса даже при максимально возможной по скоростному параметру подшипника частоте вращения ротора третьего каскада.

Большой вклад в формирование массы кислородного насоса вносит первый (бустерный) каскад (БК), который при нулевом превышении ($\Delta P_{вх}$) полного входного давления кислорода над его давлением насыщенных паров может составлять до 70 % от общей массы насоса. Однако по мере повышения величины параметра $\Delta P_{вх}$ гиперболически снижается и относительная масса БК. На рис. 2 представлено изменение выходно-



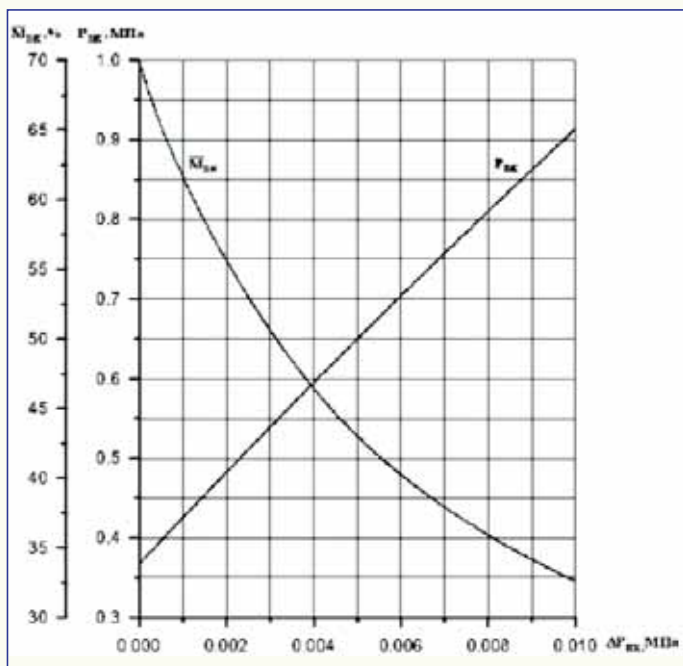


Рис. 2 Зависимость относительной массы бустерного каскада и выходного давления от превышения входного давления над давлением насыщенных паров кислорода

го давления P_{BK} и относительной массы $M_{BK} = M_{BK}/M_H$, как отношения массы бустерного каскада M_{BK} к массе M_H всего кислородного насоса в зависимости от параметра $\Delta P_{вх}$. Из этого рисунка видно, как по мере повышения $\Delta P_{вх}$ снижается относительная масса M_{BK} и одновременно повышаются возможности БК по наращиванию выходного давления P_{BK} . Так, при изменении параметра $\Delta P_{вх}$ от 0 до 0,01 МПа давление P_{BK} меняется от 0,37 до 0,92 МПа (рис. 2).

Большим резервом заметного облегчения БК являются конструктивные мероприятия. Примером может служить конструкция БК с приводом от газовой турбины, расположенной на периферии рабочего колеса бустерного каскада. Привод БК функционирует на рабочем теле, частично отбираемом из выходной полости основной газовой турбины [6]. Смешение высокотемпературного рабочего тела с потоком жидкого кислорода приводит к повышению его температуры и, следовательно, теплофизического показателя α_{01} , характеризующего склонность жидкости к кавитированию. Это позволяет в некоторых случаях оптимизировать окружную скорость U_{1cp} рабочего колеса второго каскада, что связано с заметным повышением термодинамической поправки к кавитационному запасу насоса Δh_{HFO} при его работе на холодной воде. Здесь под кавитационным запасом Δh_{HFO} понимается превышение (выраженное в размерности m^2/c^2) полного входного давления жидкости над давлением насыщенных паров. Расчет оптимальной скорости производится по соотношению [5]

$$(U_{1cp})_{opt} = 0,21 \frac{\sqrt{\alpha_{01}}}{\Delta \bar{h}_{HFO}^{0,7}}, \text{ где } \Delta \bar{h}_{HFO} = \frac{\Delta h_{HFO}}{U_{1cp}^2}.$$

Назначение второго каскада насоса сводится к обеспечению давления кислорода перед третьим каскадом выше критического его значения $P_{кр} = 5,09$ МПа, что снимает ограничения, вызванные возможностью возникновения кавитации и преждевременного разгара конструкции. В таком случае частота вращения ротора третьего каскада лимитируется только максимальным уровнем параметра, характеризующего напряженность работы опор вала насоса произведением мощности на квадрат частоты вращения.

Представленное перераспределение давления кислорода между тремя каскадами приводит, как уже упоминалось, к повышению надежности и заметному уменьшению массы системы подачи компонента топлива по сравнению с двухкаскадной системой. Более того, расчеты установлены, что для кислородно-керосиновых ЖРД тягой 200 тс при освоеном уровне параметра напряженности опор ротора кислородного насоса возможно достижение им вы-

ходного давления в варианте двухкаскадного исполнения не выше 70 МПа при сохранении приемлемых массовых показателей ТНА, тогда как использование трёхкаскадного кислородного насоса позволяет повысить уровень указанного выходного давления до 90 МПа, а в отдельных случаях даже выше.

С целью разработки конструктивной схемы мощного кислородного насоса нового поколения применительно к ЖРД тягой 200 тс проведены расчеты основных параметров насосов всех трех каскадов для расхода кислорода $G = 460$ кг/с при начальном входном давлении $P_{вх} = 0,26$ МПа и суммарном выходном давлении $P_H = 60$ МПа. В таблице представлены результаты расчетов, где $T_{вх}$ - температура кислорода при входе в насос первого каскада, n - частота вращения, N - мощность, η_k - к.п.д., D_k - наружный диаметр рабочего колеса насоса, \bar{D}_{BT1} - относительный диаметр втулочной поверхности при входе в колесо, \bar{D}_{BT2} - относительный диаметр втулочной поверхности при выходе из колеса, β'_{1k} и β'_2 углы рабочего колеса на периферии входа и выхода колеса, Z_k - количество лопаток колеса, S_{1cp} - толщина входных кромок на среднем диаметре входа в колесо, M_H - масса насоса.

Таблица 1
Основные параметры трехкаскадной системы

Каскад	G, кг/с	P _{вх} , МПа	P _{вх} ', МПа	T _{вх} , К	n, мин ⁻¹	N, кВт	D _к , мм
1	460	0,26	1,87	95	6400	790	230
2	483	1,63	5,51	130	11400	2680	173
3	483	5,50	60	135	26300	36100	223

Таблица 2
Основные параметры трехкаскадной системы (продолжение)

Каскад	\bar{D}_{BT1}	\bar{D}_{BT2}	β'_{1k}	β'_2	Z _k	S _{1cp}	M _H , кг
1	0,35	0,72	11	30	4+4	0,5	37
2	0,35	0,75	14	55	4+4	0,5	24
3	0,45	-	30	90	8	1,0	156

Из анализа таблиц следует, что расход газа на привод насосов первого и второго каскадов не превышает 5 %, а параметр напряженности ротора третьего каскада составляет $N \cdot n^2 = 25 \cdot 10^{12}$ кВт/мин², что отвечает современному достигнутому уровню этого технического показателя. Кроме того, следует обратить внимание на то, что из-за высокого уровня термодинамической поправки давление кислорода перед насосом второго каскада ниже давления насыщенных паров на 7,3 %. На рис. 3 приведена конструктивная схема кислородного насоса с обеспечением, в основном, параметров, представленных в таблице. Большая протяженность зоны смешения газа с жидким кислородом позволяет (как показали специальные испытания) обеспечить равномерное смешение разных фаз рабочего тела без дополнительных мероприятий, особенно для представленного на рис. 3 варианта, когда сброс газа производится после каждого каскада.

Предложенное техническое решение может найти применение не только при совершенствовании мощных жидкостных ракетных двигателей, но и в других отраслях народного хозяйства. Так, например, при необходимости получения газообразного кислорода сверхвысокого давления (до 100 МПа) можно производить закачку в закрытые емкости жидкого кислорода давлением до 30 МПа с последующей его газификацией за счет тепла окружающей среды. При этом давление в закрытой емкости будет повышаться практически (без учета реальных свойств газа) пропорционально повышению его температуры. Такой способ получения газообразного кислорода высокого давления при использовании жидкого кислорода путем его заливки в замкнутый резервуар [7] широко применяется в КБХА (Воронеж).

В заключении отметим, что известен единичный пример, когда

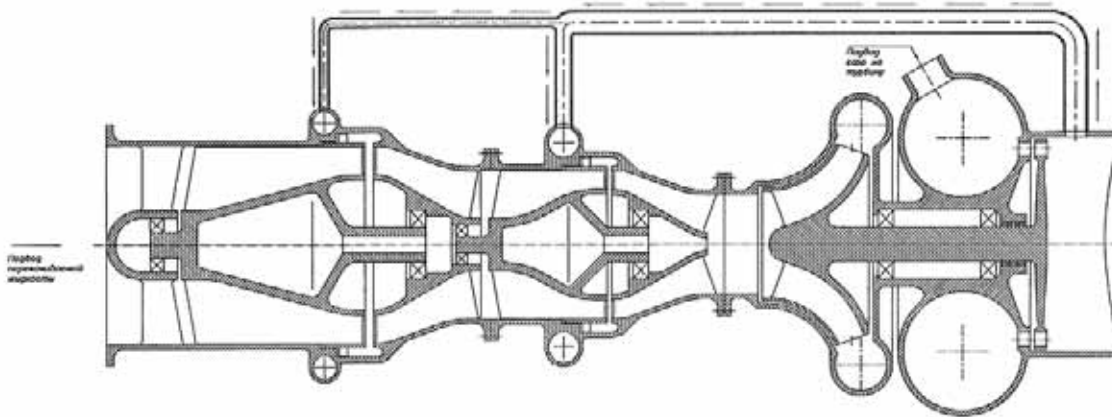


Рис. 3 Конструктивная схема кислородного насоса для ЖРД тягой 200 тс

трехроторная конструкция кислородного насоса реализована в двигателе РД-0120 (КБХА) с несоосными роторами, имеющими разные частоты вращения [8]. Преимущество предлагаемой схемы кислородного насоса нового поколения заключается в соосном размещении трех роторов с разными частотами вращения, причем соотношение этих частот выбрано с обеспечением минимальной массы насоса. Соосность обеспечена размещением приводных газовых турбин на периферии рабочих колес насосов первого и второго каскадов. Кроме того, давление кислорода перед основным насосом выбрано выше критического значения, что призвано обеспечить повышение надежности функционирования насоса за счет снижения возможности возникновения разгара. **□**

Литература

1. Гуров В.И., Ромасенко Е.Н., Шестаков К.Н. и др. Насосная система подачи жидкого кислорода. Патент РФ № 42072 на полезную модель с приоритетом от 20.11.2004.
2. Гуров В.И. Принцип постадийности - направление совершенствования сложных технических систем. Энергия: экономика - техника - экология. 2013., № 4., С. 46-48.

3. Ромасенко Е.Н., Гуров В.И., Шестаков К.Н. Пути повышения эффективности насосной системы подачи ЖРД. Конверсия в машиностроении. 2004., № 6., С. 42-44.

4. V. Gurov, E. Romasenko, K. Shestakov. The concept of efficient high pressure oxygen feed system. - The 42th AIAA/ASME/SAE/ASEE Conference and Exhibit, 9-12 July, 2006, Sacramento, California.

5. Гуров В.И., Шестаков К.Н. Разработка криогенных турбонасосов. М.: Информконверсия. 2000., 132 с.

6. Ромасенко Е.Н. Опыт разработки и применение схемы кислородного бустерного ТНА ЖРД со сбросом газа после турбины БТНА на вход в основной насос. Труды НПО "Энергомаш им. академика В.П. Глушко" XIX. Москва, 2001., С. 139-157.

7. Ильичев В.А., Пригожин В.И., Савич А.Р. и др. Стенд для испытаний энергоустановок с криогенными компонентами. Патент РФ № 2445503 на изобретение с приоритетом от 08.10.2010.

8. Демьяненко Ю.В., Дмитриенко А.И., Калитин И.И., Першин В.К. Способ обеспечения антикавитационной устойчивости систем питания жидкостных ракетных двигателей, разработанных КБ Химавтоматики. Космонавтика и ракетостроение. 1999., №16., С. 73-81.