



Детонационные двигатели – инновационный прорыв в гиперзвук

19 мая 2017г. на совещании в г. Сочи Президент России Владимир Путин поставил перед оборонно-промышленным комплексом страны задачу создания перспективного технического задела на основе прорывных технологий. Об одной из таких технологий, с использованием которой можно создать двигатели для сверхскоростных летательных и подводных аппаратов, можно узнать из предлагаемой статьи.

К одному из важнейших глобальных вызовов для России относится стратегическая инициатива США Prompt Global Strike (PGS) - Глобальный молниеносный удар или Быстрый глобальный удар - по разработке систем, позволяющих нанести удар обычным (неядерным) боеприпасом по любой точке планеты в течение одного часа с момента принятия решения, взамен ядерных ударов, осуществляемых межконтинентальными баллистическими ракетами. С целью реализации PGS в США принят ряд программ по развитию гиперзвуковых технологий. Отсутствие необходимости извещать о пусках другим странам, маневрирующий характер и относительно небольшие высоты полета гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) затрудняют задачу их перехвата и уничтожения.

Проблемами создания силовых установок для ГЛА в США занимаются в НАСА (Исследовательский центр в Ленгли, Летно-исследовательский центр Драйден, Центр им.Льюиса,

Центр им. Эймса), Минобороны, создавшем Объединенное технологическое управление по гиперзвуковым исследованиям, а также ДАРПА, Исследовательская лаборатория ВВС, подразделения ВМФ и организации промышленности, создавшие Промышленную группу по гиперзвуковым исследованиям НІТ. К работам привлекается более 10 университетов. Создание двигателей для ГЛА в США относят к одной из критических технологий. В Европе этими проблемами занимаются в ЕАДС, МБДА, ОНЕРА, Снекма, МАТРА и других компаниях, а также в университетах. Под эгидой НАТО эти оборонные исследования координируются Организацией по исследованиям и технологиям, создавшей многочисленные интернациональные рабочие группы. В Австралии, как известно, активно проводятся летные испытания ГЛА. В Китае создание таких двигателей еще в 1997г. было отнесено к ключевой области, требующей государственной поддержки.



Рис.1 PROMPT GLOBAL STRIKE – военно-технологическая программа разработки высокоскоростных средств доставки

Парирование возникшей угрозы требует ускорения разработки в России беспилотных и, возможно, пилотируемых ГЛА, способных осуществлять дальние высокоскоростные полеты в атмосфере. Создаваемые беспилотные ГЛА могут осуществлять планирующий управляемый полет подобно HTV-2, достигая гиперзвуковой скорости в атмосфере путем разгона аппарата ракетой-носителем, что не требует работы маршевого двигателя. К другому классу ГЛА относятся аппараты с практически постоянной маршевой скоростью полета, обеспечивающейся прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД), подобно американским демонстраторам X-43 и X-51. Следует отметить преимущество «моторного» гиперзвука по сравнению с планирующими вариантами, выражающееся в высокой скорости подхода беспилотного ГЛА к цели – на скорости, близкой к скорости маршевого полета.

Как составная часть адекватного ответа на этот вызов - PGS - по инициативе Корпорации «Тактическое ракетное вооружение» (КТРВ) Фонд перспективных исследований (ФПИ) принял решение о реализации проекта по созданию демонстратора детонационного

воздушно-реактивного двигателя из композитных материалов для ГЛА. Главным исполнителем проекта было определено входящее в КТРВ ПАО «ТМКБ «Союз».

Выбор этого предприятия был обусловлен тем, что с конца 1980-х годов ТМКБ «Союз» проводит широкомасштабные разработки ПВРД для высокоскоростных ракет. Двигатели разработки ТМКБ «Союз» для ракет корабельного комплекса «Москит» и для семейства сверхзвуковых крылатых ракет класса «воздух-поверхность» X-31 с маршевой скоростью более 3,5М не имеют аналогов в мире. Именно в ТМКБ «Союз» был создан двигатель для ГЛА X-90. В 2013г. на предприятии было завершено создание ПВРД для ракет X-31АД/ПД разработки КТРВ, дальность пуска которых возросла более, чем в 2 раза по сравнению с X-31.

Результаты проекта должны быть использованы для разработки двигателей беспилотных и пилотируемых ГЛА, способных осуществлять дальние высокоскоростные полеты в атмосфере, а также ступеней авиационно-космических систем (АКС), предназначенных для транспортировки людей и грузов на околоземную орбиту и в ближний космос.



Воздушно-реактивные двигатели и детонация

Основными препятствиями на пути создания ПВРД для ГЛА являлись необходимость эффективной организации в них рабочего процесса при требуемых скоростях полета и наличие ультравысокотемпературных конструкционных материалов для изготовления наиболее теплонагруженной части двигателя – камеры сгорания (КС).

Известно, что для гиперзвуковых скоростей полета в атмосфере недопустимо торможение набегающего потока в ПВРД до скорости звука, поскольку при сверхвысоких скоростях полета температура торможения так высока, что подведение энтальпии сгорания топлива ограничено жаропрочностью материала горячих элементов конструкции двигателя. Это влечет необходимость обеспечения горения в КС в сверхзвуковом потоке. При этом необходимо обеспечить высокую полноту сгорания топлива для эффективного функционирования двигателя как тепловой машины.

В традиционных ПВРД, как и в турбореактивных воздушно-реактивных двигателях -

ТРД химическая энергия горючего преобразуется в тепло и механическую работу за счет «медленного» горения - дефлаграции при практически постоянном давлении: $P=const$, т.е. реализуется термодинамический цикл Брайтона. Помимо дефлаграции, известен и другой режим горения – детонация, которая протекает при постоянном объеме $V=const$. Этот цикл близок к циклу Гемфри.

При детонации химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоких значениях температуры и давления за сильной ударной волной, бегущей с высокой сверхзвуковой скоростью. Если при дефлаграции углеводородного горючего мощность тепловыделения с единицы площади поверхности фронта реакции составляет ~ 1 МВт/м², то мощность тепловыделения в детонационном фронте существенно выше (приближается к мощности излучения с поверхности Солнца!). Более высокая скорость детонационного горения может обеспечить больший массовый расход рабочего тела, стало быть, меньшие габариты КС при той же мощности двигателя, а интенсивность сгорания топлива

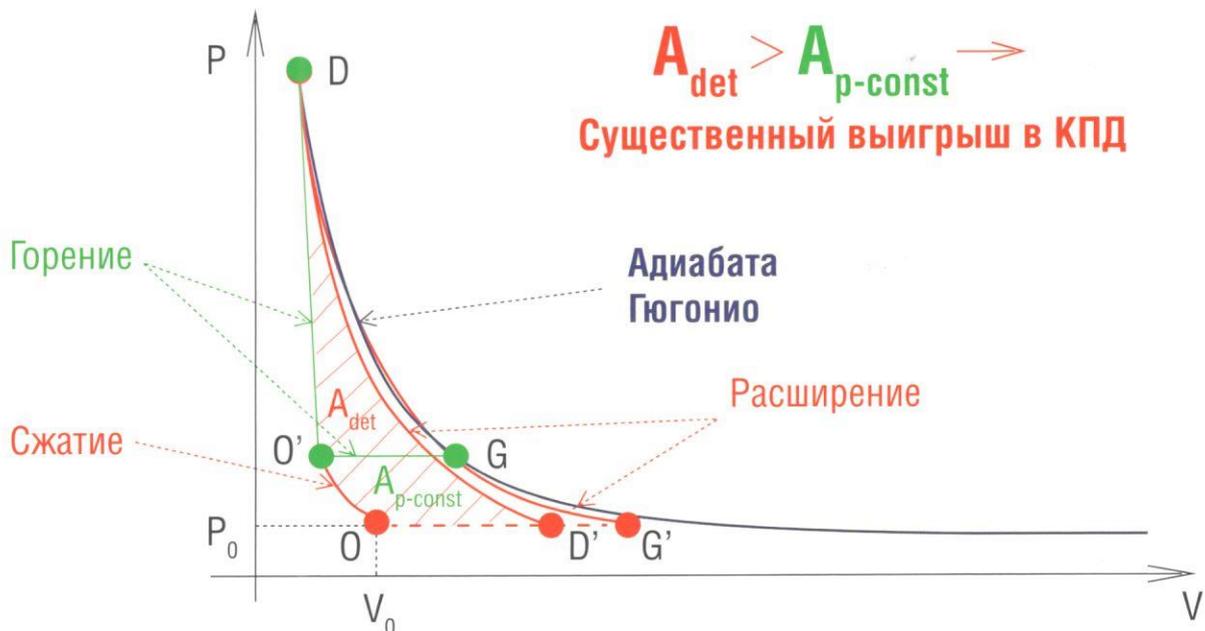


Рис.2. Термодинамические циклы. Красные линии соответствуют термодинамическому циклу, близкому к $V=const$

Существующие ПВРД

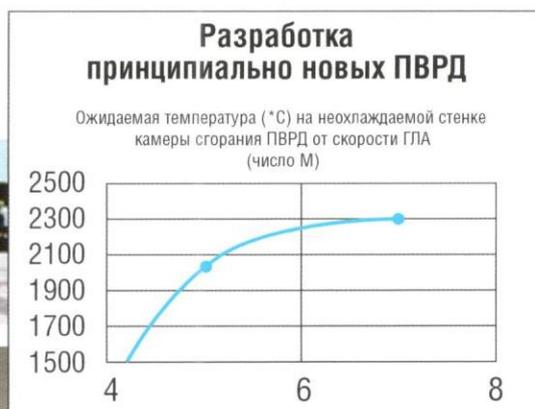
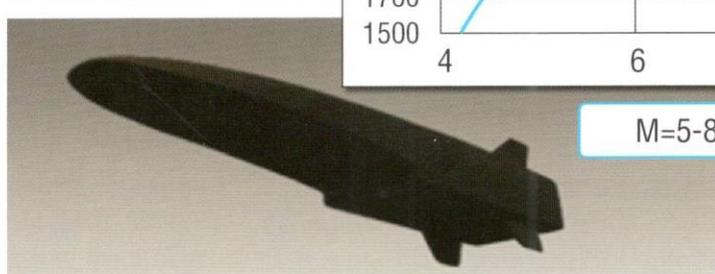


Рис.3. Существующие и перспективные ракеты с ПВРД

в ДВ позволяет сократить её длину. Это позволят создать принципиально новый высокоэффективный ПВРД, необходимый для ГЛА.

С ростом скорости полета в атмосфере возможности повышения эффективности работы ПВРД с традиционной организацией горения в дозвуковом потоке – так называемого, дефлаграционного – практически исчерпаны. Необходимо создать хотя бы ГПВРД – то есть ПВРД, в котором дефлаграционное горение топлива в КС происходит при сверхзвуковой среднемассовой скорости потока. Однако использование детонации дает больший эффект.

Основной показатель энергоэффективности ракетного двигателя – удельный импульс тяги $I_{уд}$, он измеряется в секундах и равен отношению тяги, развиваемой двигателем, к весовому секунднему расходу горючей смеси.

Эффективность детонационных двигателей впервые изучалась теоретически Я. Б. Зельдовичем [1], в дальнейшем академиком, трижды

Героём социалистического труда. Концепция КС с непрерывной детонацией была предложена в 1959 г. академиком АН СССР Б.В. Войцеховским и долгое время разрабатывалась в Институте гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН.

Первые схемы гиперзвуковых ПВРД с детонационным горением стали появляться с 60-х годов XX века. Однако до настоящего времени не создан ни один серийный образец техники с таким двигателем. За рубежом теорией и изучением возможности практического применения детонационных двигателей начали интенсивно заниматься только в 90-е годы XX века с целью создания силовых установок для гиперзвуковых самолетов и крылатых ракет. С 2004 года информация о зарубежных практических достижениях в этой сфере не публикуется. В последние годы в различных странах мира опубликованы результаты экспериментов, говорящие о реальной возможности создания таких двигателей.

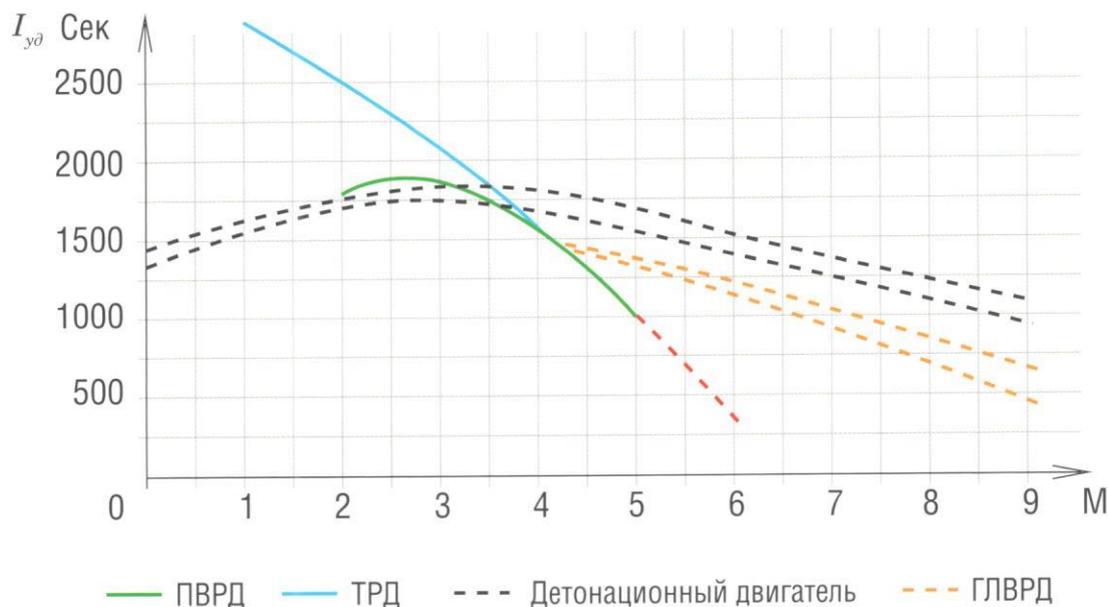


Рис.4. Теоретическая зависимость удельного импульса тяги воздушно-реактивных двигателей от скорости полета летательного аппарата в атмосфере

Важнейшая проблема, которую было необходимо решить при создании непрерывно-детонационных камер сгорания, работающих на жидком углеводородном топливе - низкая детонационная способность таких топлив в воздухе. Эта проблема была успешно решена в ПАО ТМКБ «Союз» при реализации упомянутого проекта ФПИ. На огневых испытаниях в 2016г. впервые в мире (по открытым источникам) на стенде ФГУП «ЦИАМ им.П.И.Баранова» было зафиксировано непрерывное детонационное горение жидкого углеводородного топлива в КС, созданной в ПАО ТМКБ «Союз», в потоке со среднемаховой скоростью более 2М. Этих результатов было бы невозможно достичь без привлечения к работе по проекту ведущих институтов РАН, в первую очередь, Института химической физики им.Н.Н.Семенова. Достигнутые в сфере организации детонационного горения результаты проекта позволяют говорить о мировом лидерстве России в этой сфере.

Для достижения этого успеха потребовалось создание адекватных математических моделей

процессов, протекающих в детонационной КС, и развитие уникальных вычислительных технологий, предназначенных для полномасштабного 3-мерного суперкомпьютерного моделирования рабочего процесса в детонационном ПВРД, включающих расчеты нестационарных сжимаемых турбулентных многофазных реагирующих течений.

Для обеспечения анализа рабочего процесса в КС в ходе огневых испытаний сотрудниками ИХФ им. Н.Н.Семенова РАН была создана система регистрации быстропротекающих



Камера сгорания детонационного ПВРД перед огневыми испытаниями на стенде ЦИАМ им.П.И.Баранова (фото автора)



Рис.5. Визуализация расчета рабочего режима детонационного ПВРД в полетных условиях

процессов горения и детонации, включающая ионизационные зонды, систему обработки акустической и видеоинформации, датчики статического и полного давления. Эта система показала высокую эффективность при обработке результатов огневых испытаний, она позволяет идентифицировать параметры режимов детонационного горения в КС (непрерывная спиновая или продольно-пульсирующая детонация), а также измерять характерную частоту рабочего процесса, скорость и направление распространения детонационной волны (ДВ). Отдельным «ноу-хау» является система инициирования ДВ с помощью специально разработанных детонаторов.

В ходе реализации проекта были разработаны технологии проектирования газодинамического тракта ПВРД и организации рабочего процесса, обеспечивающих потребные тягово-экономические характеристики двигателя; технологии создания теплостойких конструкций составных частей детонационного ПВРД. Конструкторы ПАО ТМКБ «Союз» обеспечили материальное воплощение передовых научных идей ученых РАН. Проект является примером успешной кооперации науки и промышленности в сфере передовых инноваций и обладает значительным потенциалом коммерциализации в гражданской сфере.

Работы по изучению детонационного горения активно ведутся в институтах РАН. Коллективом ИХФ им. Н.Н.Семенова РАН был

разработан стендовый демонстратор детонационного двигателя на водороде на основе реализованных в проекте ФПИ идей. Он был успешно испытан в аэродинамической трубе ИТПМ им.С.АХристиановича СО РАН под руководством В.М.Фомина совместно с его сотрудниками с обдувом на скоростях потока вплоть до $M=8$ с измерением тяги [2]. Этот результат Президиумом РАН был отнесен к числу наиболее значительных достижений ученых РАН за 2016г.

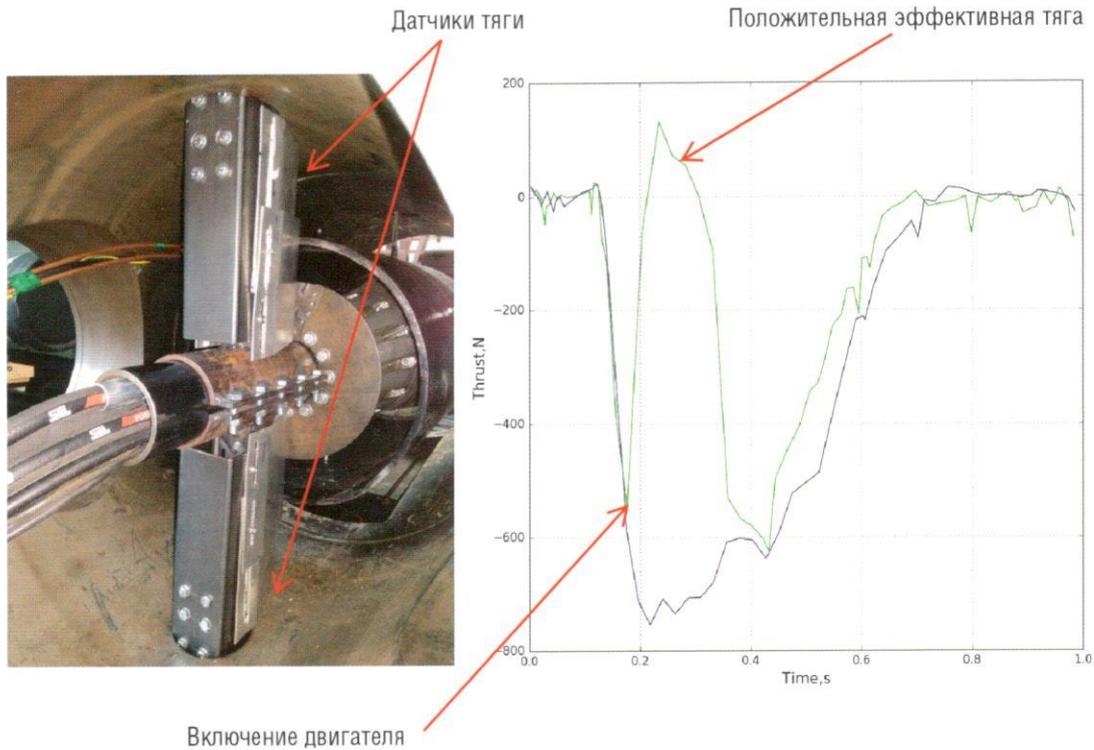
Прогресс в создании ультравысокотемпературных материалов

Технологические демонстраторы высокоскоростных ПВРД типа «LEA», «X-51 Waverider», российского проекта «Холод» были изготовлены с применением традиционных подходов к теплозащите, предполагающих захлаживание металлической стенки за счет формирования пристеночной завесы или наличия интегрированных в стенку охлаждающих каналов. Это утяжеляет и усложняет конструкцию, и, в конечном счете, не позволяет обеспечить длительный полет и скорость более $5,5M$. Одним из разделов программы гиперзвуковых исследований в США является раздел «Перспективные конструкции и материалы», основным содержанием которого является разработка перспективных высокотемпературных материалов. Поэтому составной частью реализуемого проекта была разработка нового поколения композиционных материалов (КМ).

Созданные в ОАО «Композит» КМ в ходе работ по проекту существенно превосходят по характеристикам использованные в советском воздушно-космическом самолете «Буран», их испытания в потоке воздушной плазмы с плотностью энерговыделения более 4 МВт/м^2 показали стабильность свойств в течение заданного времени. Зафиксированы околонулевые скорости линейного уноса и КМ для критического сечения КС, причем материал обладает достаточно низкой плотностью,



Установленный на тягоизмерителе макет-демонстратор детонационного двигателя и тяговые характеристики для $M = 5, 6$ и 8



Результаты: получен удельный импульс более 3000 с

Рис.6. Результаты измерений тяги двигателя на стенде ИТПМ им.С.А.Христиановича СО РАН

технология его производства обеспечивает возможность изготовления необходимых составных частей ГПВРД и он не имеет значительных изменений прочностных характеристик в диапазоне температур до 2300°C за требуемое время. При этом полученные характеристики КМ удалось достичь в короткие сроки «срезая угол», путем нетривиальной комбинации известных подходов.

Перспективы технологии и направления дальнейших исследований

По зарубежным оценкам, применение гиперзвуковых технологий при создании авиационно-космических систем (АКС), предназначенных для транспортировки людей и

грузов на околоземную орбиту и в ближний космос, позволит снизить стоимость выведения килограмма полезного груза на околоземную орбиту на порядок. Первоочередным и ключевым технологическим приоритетом для успеха этих работ является развитие технологий, связанных с созданием эффективных ПВРД, являющихся основой при создании комбинированных силовых установок АКС. Также представляется перспективным использование этих технологий в двигателях сверхзвуковых пассажирских самолетов нового поколения. Развитие детонационных технологий будет способствовать завоеванию рынков товаров и услуг, связанных с осуществлением длительных высокоскоростных полетов в атмосфере и по суборбитальным траек-

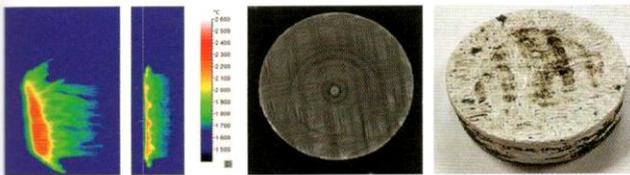


Рис.7. Термограммы испытаний образцов из разработанного КМ в потоке плазмы, вид образца до и после испытаний

ториям, а также с доставкой грузов на околоземную орбиту с помощью ГЛА и АКС.

Применение детонационного горения в силовых установках не ограничивается только атмосферными и аэрокосмическими аппаратами [3]. В обозримое время могут быть созданы детонационные двигатели для надводных и подводных аппаратов. В ИХФ им.Н.Н.Семенова РАН созданы и доведены до разной степени готовности к передаче в промышленность экспериментальные стендовые демонстраторы энергоэффективных импульсно-детонационных водометных гидрореактивных двигателей для высокоскоростных надводных и подводных транспортных средств и средств доставки. Расчеты, подтвержденные экспериментами, показывают возможность достижения скоростей существенно больших, чем у серийно выпускаемых аппаратов. Поскольку происходит прямое преобразование химической энергии топлива в движение заборной воды, то реализуется более высокая топливная эффективность таких двигателей по сравнению с применяемыми.

Конечно, в этой новой области на стыке фундаментальной и прикладной науки много непознанного. Так, требуют дальнейшей разработки:

технологии инициирования ДВ с минимальными энергетическими затратами и обеспечения устойчивости детонационного горения на всех режимах полета ГЛА;

технологии создания приемлемых по стоимости теплостойких несущих конфигураций ГЛА, интегрированных с силовыми установками на основе детонационных ПВРД;

технологии суперкомпьютерного расчета

полей скоростей, давлений, температур в газоздушном тракте и напряжений в конструкции двигателя и планера ГЛА;

технологии расчетно-экспериментального определения теплофизических и прочностных характеристик металлических и КМ при больших давлениях, высоких и сверхвысоких температурах для обеспечения разработок новых изделий авиационной и ракетной техники с гиперзвуковыми скоростями полета;

технологии обеспечения теплозащиты элементов конструкции летательных аппаратов и двигателей при длительном гиперзвуковом полете.

В рамках существующих федеральных программ требуется предусмотреть создание опережающего научно-технического задела и развитие суперкомпьютерных методов расчета и прогнозирования результатов экспериментов по изучению процессов, протекающих в детонационных ПВРД и комбинированных двигательных установках при различных числах Маха на базе современных физических и математических моделей.

С учетом полученных результатов целесообразно рассмотреть вопрос о выделении детонационных технологий как приоритетного технологического направления в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 20 июля 2016г. №347. ■

Н.Н.Яковлев,
научный руководитель проекта ПАО ТМКБ «Союз»

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. Т. 10. В. 17. С. 1455–1461.
2. С.М.Фролов, В.И.Звегинцев, В.С.Иванов, В.С.Аксенов, И.О.Шамшин, Д.А.Внучков, Д.Г.Наливайченко, А.А.Берлин, В.М.Фомин. Макет-демонстратор непрерывно-детонационного прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Результаты испытаний в аэродинамической трубе// Доклады РАН, 2017.-т.474, №1, С.51-55.
3. С.М.Фролов. Водная ракета - новый движитель для скоростного флота // «Коммерсант-Наука», 2017, №3, С.32-34.