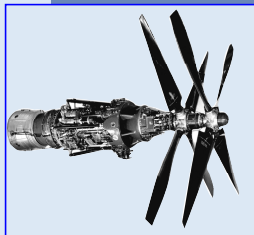


НК-12NG КАК "ПАРОВОЗ" ДЛЯ ТРАНСПОРТА

(Из записок корабельного инженера-механика Семёнова)

Владимир Александрович Герасимов, СГАУ, кафедра КиПДЛА



Две идеи конвертации авиационных ГТД при социализме

В период "штормового развития и триумфального становления" отечественных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), отечественный парк их превысил 1/3 от мирового. При эксплуатации самолётов с ГТД обозначилась проблема наличия двигателей с выработанным ресурсом на взлётном и номинальном режимах, но с большим остатком ресурса на частичных нагрузках. Ответом на это стала конвертация (в плане процесса адаптации конструкции двигателя) для работы двигателя в наземных условиях. В основе конвертации - экономическое обоснование необходимости и возможности загрузки серийного производства с одновременным увеличением жизненного цикла изделия. Всё это подтверждено отечественной и мировой практикой.

По-видимому, наибольшие варианты конвертации получились у отечественного Д-30, созданного в 1963 г. и устанавливаемого на самолёте Ту-134. От турбореактивного двигателя (ТРД) Д-30, который состоит из так называемой "холодной части" - турбокомпрессора низкого давления (ТКНД) и "горячей части" - турбокомпрессора высокого давления (ТКВД), для целей конвертации был взят ТКВД. ТКВД, как самая нагруженная часть, является "ядром двигателя" и вместе с камерой сгорания (КС) образуют газогенератор (ГГ). Именно ГГ от Д-30 получил наземное применение в промышленных ГТД в мощностном диапазоне 4...10 МВт с к.п.д. двигателя на выходном валу от 25,6% до 34,2%. Более того, основу двигателей морского исполнения М70РУ (7 000 л.с.), М70ФРУ (14000 л.с.) составляет тот же ТКВД от Д-30, включающий 10-ти ступенчатый компрессор и 2-х ступенчатую турбину. Авиационная история ТКВД от Д-30 и соответствующей конвертации в промышленные ГТД, продолжилась в авиационных Д-30КУ/КП и новой ветки - ПС-90 (различных модификаций).

Условно можно считать, что в основе идеи конвертации Д-30 лежит "горячая часть" двигателя, задающая высокие параметры цикла.

Другая идея конвертации связана с турбовинтовым одновальным НК-12, созданным в 1954 г., устанавливаемым на самолёте Ту-95. Как и все первые турбореактивные двигатели, НК-12 вместо привычных сегодня "холодной части" и "горячей части" для двухроторных ТРД, имеет один турбокомпрессор (ТК), т.е. "два в одном" и силовой турбиной на одном валу. Куйбышевские конструкторы для целей конвертации разделили НК-12 на два модуля - газогенераторный блок и блок свободной силовой турбины, имеющей только газодинамическую связь с ГГ и получили первый серийный конвертированный ГТД авиационного типа - НК-12СТ. Дальнейшее развитие НК-12СТ шло как по линии совершенствования модуля ГГ - с поэтапным уменьшением расхода воздуха через ГГ и увеличением π_k и T_r , так и работой над модулем силовой турбины. Это семейство конвертированных авиационных ГТД обозначено как НК-14СТ с повышением к.п.д. с 27% до 34% в мощностном диапазоне от 6,3 до 10 МВт, с перспективой роста до 16...18 МВт

Обращает внимание, что к.п.д. 27-34% получен при суммарной степени сжатия 9,5...10,5, соответствующей степени сжатия после компрессора низкого давления (КНД) двигателя НК-93, входящего в состав "холодной части" двигателя.

Условно можно считать, что в основе идеи конвертации НК-12, как раз "холодная часть" двигателя, задающая высокую надёжность двигателя (в противовес выше приведённому примеру с Д-30).

Таким образом, два направления конвертации авиационных ГТД как "горячей части", так и "холодной части" дают практически

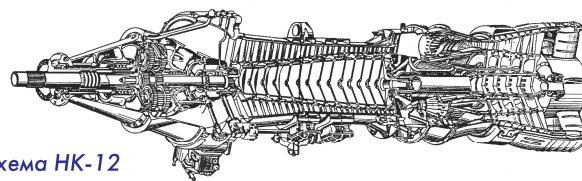


схема НК-12

одинаковый к.п.д. промышленных ГТД, где вопросы массы двигателя вне первоочередных интересов эксплуатантов.

"НК-12NG": из одновального в двухвальный

В отличие от ГГ двигателя Д-30, турбокомпрессор НК-12 приостановил свою авиационную историю, оставшись на земле в виде блока ГГ двигателя НК-12(14)СТ с 14-ти ступенчатым компрессором, спроектированным в 50-х годах.

Чтобы возобновить жизнь в небесах, располагая мировой "бочкой мёда", чем является в авиации сочетание редуктора НК-12 с биротативно вращающимися винтами (БВВ), необходимо разрешить проблему с массогабаритами ГГ, со временем ставшего "ложкой дёгтя" для авиаторов. Даже повышение к.п.д. НК-14СТ до 34% для наземного применения не оказывает влияние на возможность продолжения авиационной истории НК-12, несмотря на наличие отработанного серийного производства. Правда, без вала, производства, достигшего свыше 3500 ед. за всё время. Сложность проблемы не столько в проектном решении, авральном освоении нового производства и организации спроса, исключая кризис перепроизводства, сколько в качестве решения перечисленных проблем.

Проектное решение уместно построить на сравнении параметров воздуха за компрессором НК-12 (14) СТ и КНД двигателя НК93("холодной части") на основе:

- равенства расхода воздуха (52...55 кг/сек);
- совокупной степени сжатия в компрессоре 9,5...10,5;
- расположения входа в двигатель после биротативных (соосовращающихся) винтов и вентиляторов:
- степени повышения давления за БВВ (1,22...1,27).

Это показывает равнозначность компрессоров по производимой работе и мощности (но при разных частотах вращения). Если после КНД двигателя НК-93 установить камеру сгорания от НК-12(14)СТ и адаптировать силовую турбину привода КНД под параметры цикла ГГ НК-12(14)СТ, то получим конструктивный профиль нового ГГ из "холодной части" НК-93. По параметрам новый



Редуктор НК-12

ГГ аналогичен ГГ двигателя НК-12(14)СТ, имея всего 7 ступеней компрессора вместо 14.

Следующей благоприятной конструктивной особенностью трехвального двигателя НК-93 для проектного решения, является вал силовой турбины (СТ), проходящий внутри вала ТКНД. Вал рассчитан на номинальную мощность 25 тыс. л.с. при 8300 об/мин и располагает превосходным запасом для передачи 15 тыс. л.с., имеющей быть на исходном НК-12 при равных оборотах.

Таким образом, использование в полном объеме КНД двигателя НК-93 и конструктивного профиля ТКНД с валом СТ формируют проектный облик двухвального авиационного ГТД с сохранением редуктора НК-12. Выражение "на 1000 мм короче и на 1000 кг легче" наиболее ёмко передаёт новые возможности НК-12 с буквами "NG" (Next Generation).

В пользу проектного решения - два производственных фактора.

Первый фактор. Происходит исчерпание запасов НК-12 для конвертации в НК-12(14)СТ и необходимо полное изготовление нового ГГ блока для НК-14СТ, который может быть заменен на равнозначный от НК-12NG.

Второй фактор. Диверсификация производств авиадвигателя НК-93, рассчитанного на темп выпуска 57 экземпляров в год. Окончательный вывод можно сделать по итогам опытной эксплуатации, если часть экспериментальных НК-93 в количестве 10 единиц конвертировать до уровня НК-12NG на площадке СНТК им. Н.Д. Кузнецова.

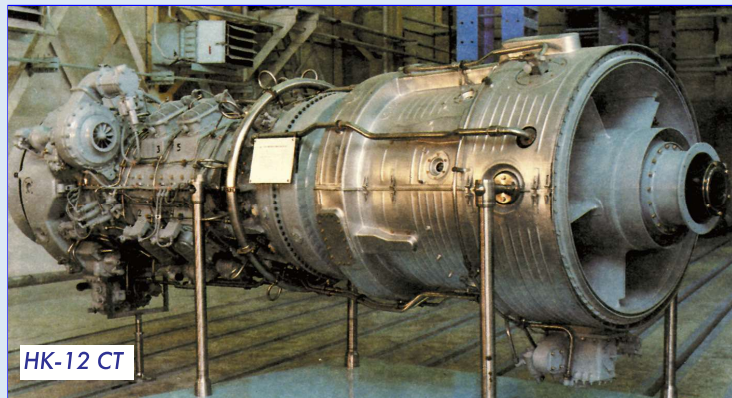
При разуконплектовании НК-93 и реконструкции до НК-12NG, высвобождается непосредственно ГГ НК-93 с ТКВД и КС, т.е. "горячая часть". При рассмотрении диапазона частот вращения ТКВД 14000...15000 об/мин находим его идентичным диапазону частот вращения ТК однороторного турбовинтового НК-4. Конструктивно вал ТКНД, проходящий внутри ТКВД, можно подвергнуть реконструкции в вал СТ с мощностью около 4,0-6,0 тыс. л.с. и выводу мощности вперед/назад. "Двухвальному прообразу" двигателя логично присвоить имя "НК-4NG". Главным условием сравнения выступает конструктивно-силовая схема ТКВД и ТКНД двигателя НК-93 с заводским превышением запаса прочности и надежности. Параметры λ_k , T_r , G_b надо оптимизировать, выстраивая опытно-конструкторскую работу, исходя из возможностей серийного производства и незамедлительной реализации НК-4NG.

Вопрос к редуктору НК-4NG: какая частота вращения на выходе важнее - 1000 об/мин для воздушных винтов серии АВ-68 или 1200 об/мин для винтов серии АВ-34/112/140. Последний вариант обеспечивает главная венцовая шестерня с внутренним зацеплением от редуктора НК-12. Производство НК-93 предусматривало создание 15 000 рабочих мест на моторостроительных заводах Куйбышева (ныне Самара), Казани и других городов Советского Союза. Трансформация производства проекта НК-93 в пользу проектов НК-12NG и НК-4NG на основе производственного задела по НК-93 размораживает большую часть рабочих мест.

Другими словами, производственный опыт конвертирования "холодной части" НК-12(14)СТ необходимо перенести на реконструкцию "холодной части" НК-93 в "горячую часть" и сформировать генерального заказчика на НК-12NG с редуктором НК-12.

При стартовом к.п.д. двигателя 34% и применении винтовентиляторов по типу СВ-27 с тягами 12-16 тонн, двигатель НК-12NG выходит на лидирующие позиции с удельным расходом топлива около 0,25 кг/кгс·час. Это главная задача НК-12NG - стать авиационным двигателем и вернуть утраченное.

Итак, что же должно быть главным проектом, который как "паровоз" вытащит народное хозяйство.



Автономный электровоз - газотурбоход

Авиация, под прикрытием программ создания авиадвигателей ПД-14 и ПД-35, встретит проект "НК-12NG" в традициях оппонирования и скепсиса, а необходим заказчик-союзник. В таком качестве для "НК" могут выступать РЖД, руководство которых в начале 2000-х озаботилось созданием к 2020 году парка локомотивов-газотурбовозов на сжиженном природном газе (СПГ) мощностью ГТД 8...10 МВт в количестве 40 ед. В основании решения - составляющие мировой опыт эксплуатация газотурбовозов начата в 1941 году с к.п.д. двигателя 7...9 % и отечественные эксперименты в 50-60 гг. с газотурбовозом конструкции Лебедянского.

Этот опыт показывает, что скорость движения поездов с газотурбовозом (ГТ) выше, чем под тепловозной тягой - при равной себестоимости, отнесенной к измерителю перевозочной работы. И это - несмотря на двухкратное увеличение расхода мазута вместо дизтоплива. Применение СПГ как самого дешевого топлива и рост к.п.д. ГТД с 15% у газотурбовоза Лебедянского до 30% газотурбовоза ГТ-1 с НК-361 должно обеспечить абсолютное превосходство газотурбовоза перед тепловозом.

Но опытная эксплуатация ГТ-1 с НК-361 показывает, что расход газа в 2300 кг/час на номинальном режиме приходится на 6700 кВт мощности тяговых электродвигателей при генерации двигателем 8300 кВт. Часть выработанной электроэнергии уходит на охлаждение выхлопных газов приводным вентилятором. Отрицательные нюансы: такие, как снижение к.п.д. ГТД на частичных нагрузках, компенсировано установкой тяговых аккумуляторных батарей (АБ) для маневровых работ, а цена ГТ-1 (200 млн. рублей в ценах 2012 г.), равная цене двух тепловозов с аналогичными параметрами, компенсируется логистическими преимуществами ГТ-1 к тепловозам как 1:5 с показателем выхлопа, соответствующим "Евро-5".

Америка, эксплуатирующая парк газотурбовозов трёх поколений (всего 65 ед.), для обозначенных отрицательных нюансов нашла свое решение. Газотурбовоз мощностью 5 МВт поставили в тандем с тепловозом, чем дополнительно обеспечили движение в тоннелях, где газотурбовоз может терять работоспособность.

Идея с тандемом пригодится. Много важнее очистка возду-

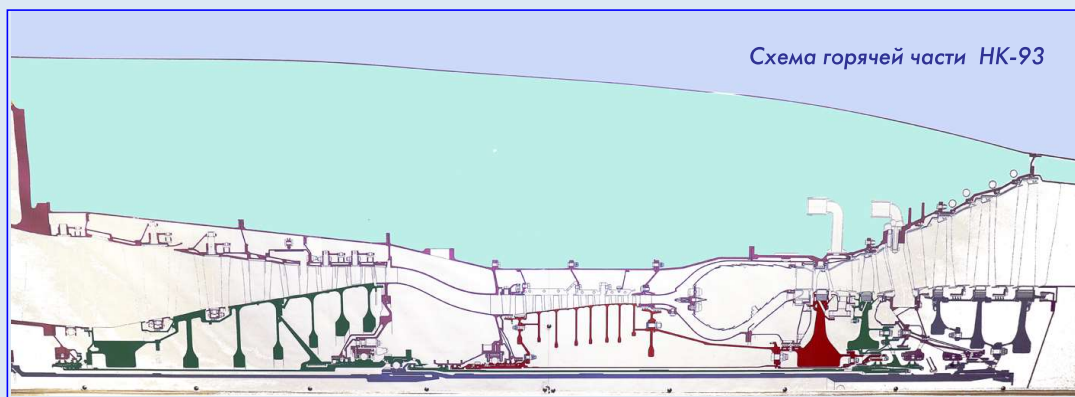
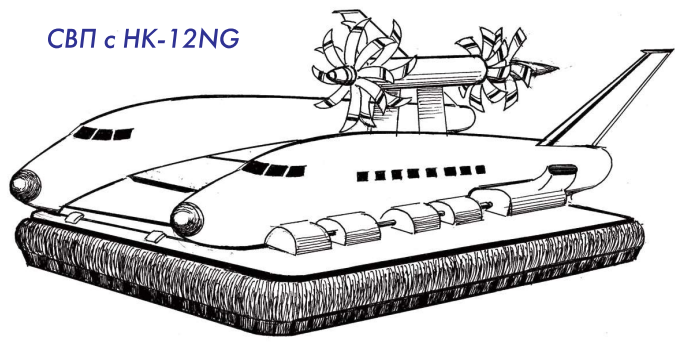


Схема горячей части НК-93

СВП с НК-12NG



ха для ГТД от торфяной пыли и сажи (термоопасны), мошки и мелкой пыли (налетоопасны), кварцевого шпата и растворов солей (коррозионно и эрозионно опасны) в тундровой зоне, где планируется интенсивная эксплуатация ГТ-1 для вывоза углеводородов. На сегодня планы с 40 ед. скорректированы до 20 ед. ГТ-1, а запуск Северного широтного хода, где востребуется 200 ед. газотурбовозов говорит о патовой ситуации.

Патовая ситуация может быть разрешена переносом ряда отработанных конструкций, как по вопросам очистки воздуха и охлаждения газов, так и по вопросам состава энергоустановки (ЭУ).

Вихревой сепаратор. Для длительной работы эффективны самоочищающиеся системы воздухоочистки для ГТД, установленные на амфибийных кораблях на воздушной подушке (АКВП). Воздух проходит 4 ступени очистки, включая и вихревой сепаратор. Вихревой сепаратор также установлен перед ГТД-1250 танка Т-80, что обеспечивает движение в условиях песчаной бури. Вся эта система очистки требует избыточного давления воздуха и энергетических затрат на дополнительный вентилятор около 10% от мощности ГТД.

Конструктивный профиль НК-12NG, благодаря двухвальной схеме, позволяет вывести вперед необходимую мощность. Редуктор НК-12 с БВВ обеспечат избыток давления воздуха перед вихревым сепаратором и избыток расхода воздуха для охлаждения выхлопных газов. Задний привод передает крутящий момент и мощность на генератор. В этой схеме потери на преобразование механической энергии в электрическую и затем в механическую для привода вентилятора охлаждения отсутствуют, как это есть в схеме ГТ-1. Затраты мощности на блок очистки воздуха и охлаждения газов регулируется положением БВВ с лопастями изменяемого шага.

Ориентировочно, при к.п.д. 34% и генерации мощности 7,4 МВт (6,7 МВт на тяговые электродвигатели и 0,7 МВт механической энергии на БВВ) расход газа составит около 1800 кг/час на номинальном режиме.

Состав энергоустановки. Начиная с флота и авиации, где кроме главной ЭУ есть и вспомогательная, компоновочная идея прижилась на танках в виде автономной газотурбоэлектростанции (ГТЭ). Для маневровых работ необходимо установить единый агрегатированный блок ГТЭ на базе ГТД-1250, адаптированного к СПГ. При расходе воздуха 4,0-4,5 кг/сек у ГТД-1250 вместо 52-55 кг/сек у главного двигателя снимается проблема ограничения времени маневровых работ и движения в тоннелях. При этом, расход топлива около 250 кг/час на номинальном режиме и не более 30 кг/час на стояночном малом газу. Опытный маневровый локомотив с ГТД-1250 на СПГ готовится к презентации.

Чрезвычайные ситуации и тандем. Максимальной много топливностью среди тяговой техники на железной дороге обладают паровозы, которые могут работать на угле, мазуте и прочем и использовать любые горючие газы. За это качество паровозы хранят для чрезвычайных ситуаций, когда провозные возможности парка электровозов обнуляются из-за повреждения контактной сети.

По заданию, газотурбовоз должен быть равноценен по тяге и скорости перспективным электровозам, а по экономичности и

надёжности не уступать тепловозу, с расчетом замещения выходящего мобилизационного ресурса паровозной тяги. Что важно, равенство мощности в 8-10 МВт недостаточно, т.к. для создания тяги страгивания, равной 1/3 от полной массы локомотива, масса газотурбовоза должна быть равной массе электровоза и составлять 250...300 тонн.

Американский опыт эксплуатации около 20 тандемов (тепловоз+газотурбовоз) незаметно переключался на территорию РЖД, в виде автономной дизель-электростанции (ДЭ) для пассажирского поезда "Стриж" и электровозов внутривозовских работ, не оборудованных контактной сетью. Если базовый магистральный электровоз "ВЛ-10" получает энергоснабжение от бустерной ГТЭ на базе НК-12NG, то парк электровозов будет работоспособен без контактной сети в любых условиях.

Учитывая возможность проводки литерных составов до 2500 км, а в тендерном (запасная цистерна с СПГ) исполнении до 5000 км, проходить станции стыкования электрической и тепловозной тяги безостановочно, без влияния на движение обледенения и обмерзания токопроводов, то применение автономного электровоза в тандеме с ГТЭ НК-12NG приобретает стратегическое значение для страны. Если треть парка электровозов укомплектовать с ГТЭ НК-12NG, то оценочный спрос свыше 1000 единиц и возможностью применения на новых скоростных магистралях, обеспечивает удешевление, ускорение строительства и окупаемость дорог.

Как сопутствующий эффект по подобию с ГТЭ НК-12NG, надо рассмотреть изготовление ГТЭ с НК-4NG мощностью 5 МВт на СПГ для работы в тандеме с пассажирскими электровозами равной мощности. Для сравнения, второе пришествие ГТД на железной дороге в США пришло в виде скоростных пассажирских поездов - турболайнеров.

Таким образом, тандем электровоза с ГТЭ НК-12NG, где наличие редуктора НК-12 с БВВ обеспечивает эксплуатацию в условиях РЖД без ограничений в ответ на патовую ситуацию и диверсификацию производств авиадвигателя НК-93.

Маркетинг и конструкция: что первично? Физика

На прошедшей в 2016 году международной научно-технической конференции "Проблемы и перспективы развития двигателестроения" (Самара) были приведены соотношения затрат на этапе НИОКР в России и США.

Затраты по странам

Затраты	Фундаментальные	Прикладные	ОКР
РФ	1	10	100
США	2	3	1

Как видно, США первостепенное значение уделяют достижимости результатов ОКР на практике и после гарантированной реализации вкладывают средства в расширение применения, т.е. в маркетинг или диверсификацию. Наше отставание, связанное со степенью сжатия (π_c) и температурой газов (T_c), выраженное в ускорении рабочего тела (a), компенсируется повышенным расходом воздуха, т.е. массой воздуха (m) - одной из составляющих тяги в формуле $F=ma$.

При конвертации авиадвигателей, независимо от первоначальных массогабаритов, к.п.д. в наземных условиях уравниваются, а массогабариты конвертированных двигателей - вне интересов эксплуатанта.

Вариант НК-12NG позволяет соединить школу проектирования и конструирования Н.Д. Кузнецова, имеющую немецкие корни, с американским прагматизмом и, потеснив конкурентов на земном транспорте, заняться научными исследованиями. **П**

Связь с автором: g_vva714@mail.ru