

УДК 621.431.75

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАСЛОТДЕЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ СУФЛЁРА РАДИАЛЬНОГО ТИПА

© 2012 А. Г. Петрухин¹, А. Е. Трянов²¹ОАО «КУЗНЕЦОВ»²Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Представлено моделирование процесса маслоотделения в рабочем колесе суфлёра радиального типа. Установлено, что при выбранном диаметре и ширине канала рабочего колеса, заданных его оборотах и определенном объёмном расходе воздухомасляной смеси важным геометрическим параметром, определяющим сепарирующую способность колеса, является относительный диаметр выходного сечения его лопаточной решётки.

Система суфлирования, рабочее колесо центробежного суфлёра, часовой расход масла в двигателе.

Назначение системы суфлирования

Одним из наиболее важных параметров масляной системы авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), определяющих её техническое совершенство, является нормируемая величина часового расхода масла. Как показывает практика, возможные причины, которые могут вызвать повышенный расход масла в двигателе, представлены на рис. 1.

Анализ приведённой на рис. 1 структурной схемы показывает, что при обеспечении приемлемого температурного состояния элементов двигателя, контактирующих с маслом, и при отсутствии возможных нарушений герметичности уплотнений отдельных узлов и трубопроводов масляной системы основное влияние на величину часового расхода масла оказывает совершенство системы суфлирования.



Рис. 1. Возможные причины повышенного расхода масла в двигателе

Как известно, в конструкциях опор ГТД с целью отделения масляных полостей двигателя от воздушных применяют специальные уплотнения валов роторов. При этом, для того, чтобы предотвратить утечку масла через любое уплотнение, давление воздуха перед ним должно быть больше, чем давление внутри масляной полости. При создании указанного перепада давления воздух непрерывно будет проникать внутрь масляных полостей опор, препятствуя утечкам масла из них. Очевидно, что для исключения возможности накопления в масляных полостях воздуха, которое приводило бы к уменьшению перепада давления на уплотнениях (в пределе – до нуля), необходимо осуществлять равновесный отвод воздуха из масляных полостей как на постоянных, так и на переменных режимах работы двигателя. Эту функцию выполняет система суфлирования [1].

Основными элементами системы суфлирования являются:

- сепарирующие устройства, в которых осуществляется отделение масла от воздуха, удаляемого из системы суфлирования;
- коммуникации, соединяющие масляные полости с зоной сброса очищенного воздуха.

Многолетняя практика создания и эксплуатации двигателей марки «НК» показала, что важнейшее значение для минимизации расхода масла в авиационном ГТД имеет эффективность процесса маслоотделения в рабочем колесе суфлёра.

Типы суфлёров

В современных авиационных ГТД практически во всех двигателях в системах суфлирования используют приводные динамические сепараторы, получившие название центробежных суфлёров. Основной их функцией является очистка от частиц масла воздуха, удаляемого из масляных полостей двигателя. При этом конструкции суфлёров обеспечивают возвращение в масляную систему отделённого масла.

Центробежные суфлёры радиального типа получили наиболее широкое распространение в двигателестроении. Их применяют практически во всех двигателях, созданных ведущими зарубежными фирмами, а в России радиальные суфлёры использованы во всех ТРДД, разработанных в ОКБ под руководством Генерального конструктора Н.Д.Кузнецова [1]. Преимуществом суфлёров радиального типа по сравнению с суфлёрами осевого типа является значительно меньшая габаритная длина. Также с точки зрения обеспечения компактности конструкции двигателя предпочтение целесообразно отдавать суфлёру радиального типа (за исключением тех случаев, когда суфлёр, размещаемый в виде агрегата на коробке приводов, ограничен по диаметральному размеру).

При работе радиального суфлёра воздухомасляная смесь поступает в его рабочее колесо с периферии (рис. 2). При этом за счёт разности давлений между входом и выходом из рабочего колеса суфлёра воздухомасляная смесь принудительно продавливается через него в сторону отводного канала. Центробежные силы, накладываемые на поток, препятствуют проникновению частиц масла в центральную область ротора.

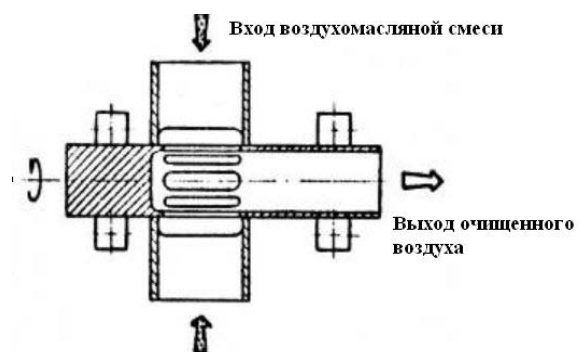


Рис. 2. Рабочее колесо суфлёра радиального типа

Из многочисленных вариантов конструкций колёс таких суфлёров широкое распространение получили колёса с прямыми радиальными лопатками. Можно констатировать факт, что суфлёры данной

конструкции прошли длительную практическую проверку, обеспечив приемлемые результаты по эффективности сепарации воздухомасляных смесей в системах суфлирования ГТД. При этом следует отметить, что конструкции данных колёс технологичны, и они отличаются умеренным гидравлическим сопротивлением.

Рабочие колеса с прямыми лопатками, применяемые на двигателях, имеют либо постоянную ширину канала, либо заужены к периферии. Анализ показывает, что предпочтительней выполнять колёса с постоянной шириной канала. Они обеспечивают снижение входной скорости (при прочих равных условиях), что приводит к улучшению маслоотделения в них. Для такого рабочего колеса с прямыми лопатками легко может быть составлена упрощённая модель маслоотделения, базирующаяся на достаточно точном представлении о кинематике потока в его гидравлическом тракте.

Экспериментальное исследование эффективности сепарирующей способности рабочих колёс суфлёра

Из-за отсутствия в технической литературе справочных данных по теплофизическим свойствам воздухомасляных смесей процессы сепарации воздухомасляной смеси в рабочем колесе не поддаются расчёту с достаточной степенью достоверности их результатов. Поэтому при выборе геометрических размеров рабочих колёс суфлёров конструкторы используют полуэмпирические методы, в основу которых заложены результаты соответствующих экспериментальных исследований.

В ОКБ генерального конструктора Н.Д. Кузнецова был создан специальный стенд для проведения испытаний суфлёров с целью исследования влияния режимных параметров и формы проточной части их рабочих колёс на эффективность маслоотделения в них [1].

Принципиальная схема этого стенда приведена на рис. 3.

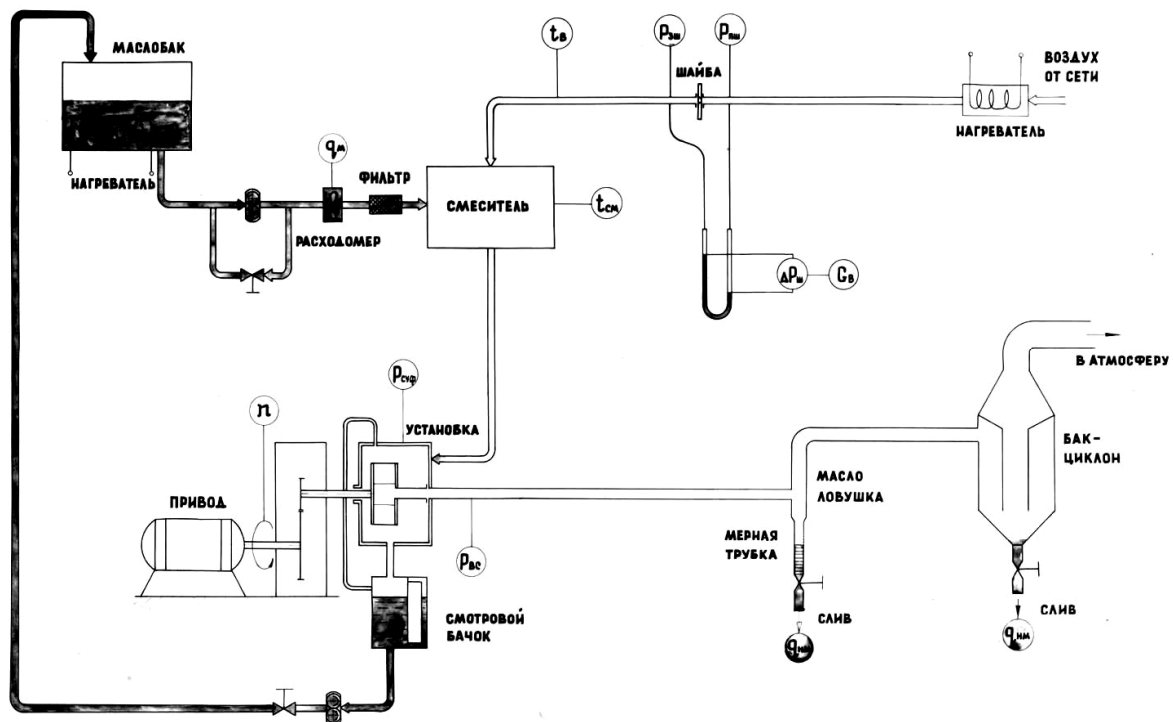


Рис. 3. Схема стенда для испытания суфлёра

Стендовое оборудование, назначение которого заключалось в обеспечении изменяемых рабочих условий, включало следующие основные узлы и системы:

- привод, обеспечивающий возможность двустороннего вращения колеса;
- стационарный корпус суфлёра (названный «установка»), в который поочередно устанавливали сменные рабочие колёса;
- масляный бак с подогревателем и автоматическим терморегулированием;
- воздушную систему с подогревателем и автоматическим терморегулированием;
- воздухомасляный смеситель с устройством для распыла масла (за счёт использования двухкомпонентных форсунок);
- статический сепаратор (бак-циклон);
- систему трубопроводов с нагнетающим и откачивающим насосами, фильтрами, клапанами, вентилями и т.д.;
- систему измерения и регулирования уровня параметров;
- систему дистанционного управления с пульта.

Стенд имеет замкнутый масляный и разомкнутый воздушный контуры. Масло из бака и воздух из системы с заданной температурой поступают в смеситель, в котором происходит образование мелкодисперсной воздухомасляной смеси. Далее полученная смесь поступает в полость исследуемого суфлёра. Из внутренней полости корпуса суфлёра отделённое масло через сливной канал насосом откачивают в бак, а воздух через межлопаточные каналы рабочего колеса, полый вал, магистраль отвода с масляной ловушкой и баком-циклон (для отлова масла) выпускают в атмосферу.

Установка, находящаяся в составе стенда для экспериментальных исследований рабочих колёс радиального типа с различными геометрическими размерами, представлена на рис. 4. Данная установка включает рабочее центробежное колесо, консольно установленное на двух шарикоподшипниках в её корпусе. Центральная полость рабочего колеса соединена через отверстие в покрывном диске с отводным каналом.

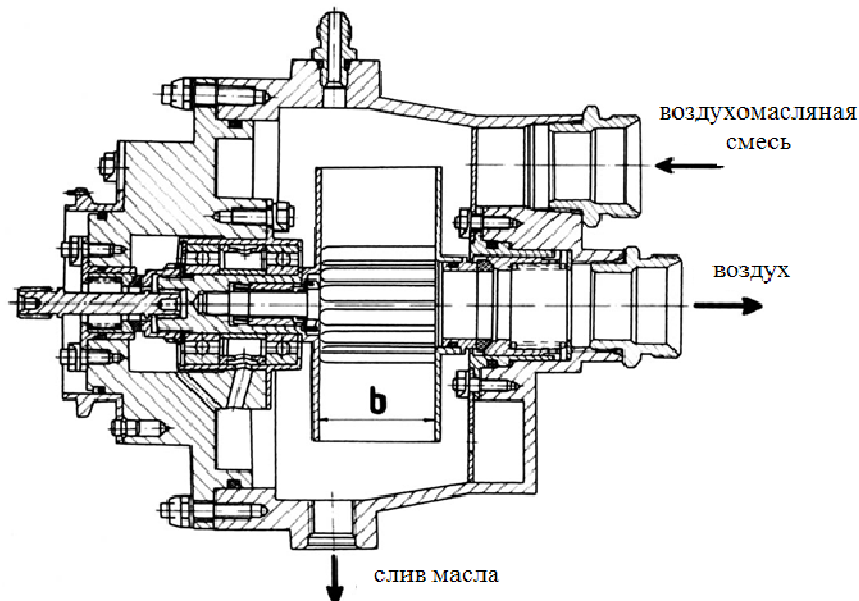


Рис. 4. Установка для экспериментальных исследований колёс выносного суфлёра

Экспериментальные исследования были проведены для серии рабочих колёс радиальных суфлёров, имеющих следующие геометрические размеры:

- наружный диаметр рабочего колеса $D = 60 \div 120$ мм;

- ширина канала $b = 10 \div 50$ мм.

При этом число исследования проводилось для радиальных суфлёров с 12 лопатками, а также для суфлёров с отклонением угла установки лопаток $\pm 20^\circ$.

Для удобства сравнения первичных результатов испытаний по определению эффективности сепарации воздухомасляной смеси и гидравлического сопротивления каждое рабочее колесо испытывали по типовой программе, которая включала следующие режимы:

- количество подаваемого в смеситель воздуха: 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 г/с;

- объёмное количество подаваемого в смеситель масла: 0,05 и 0,1 л/с;

- частота вращения ротора: 1000, 2000, 3000, 5000, 7000, 9000 и 12000 об/мин.

Причём было установлено, что ни для одного из исследованных колёс не было зафиксировано полное маслоотделение - минимальная величина неотсепарированного масла находилась на уровне 0,1 л/ч. Но следует отметить, что такая величина неотсепарированного масла является вполне допустимой даже для малоразмер-

ных ГТД, т.е. такой уровень является приемлемым для практических целей.

Подробно результаты проведённых испытаний приведены в учебном пособии [1].

Анализ экспериментальных данных и представленное ниже моделирование процесса маслоотделения проводилось применительно к рабочим колесам суфлёра с чисто радиальными лопатками (рис 5).

Картина течения воздухомасляного потока в рабочем колесе суфлёра

Сепарация воздухомасляной смеси в рабочем колесе суфлёра представляет собой сложный физический процесс. Смесь поступает во вращающееся рабочее колесо из периферийной зоны, и при принудительном движении потока в межлопаточных каналах происходит разделение фаз: воздух, очищенный от масла, выходит в центральную зону колеса, а отделённое масло центробежными силами выбрасывается из колеса через его входное сечение. По сути, для суфлируемой воздухомасляной смеси рабочее колесо представляет собой сток, на который натекает поток с чисто радиальной абсолютной скоростью.

О кинематике потока в круговой лопаточной решётке рабочего колеса даёт представление рис. 5.

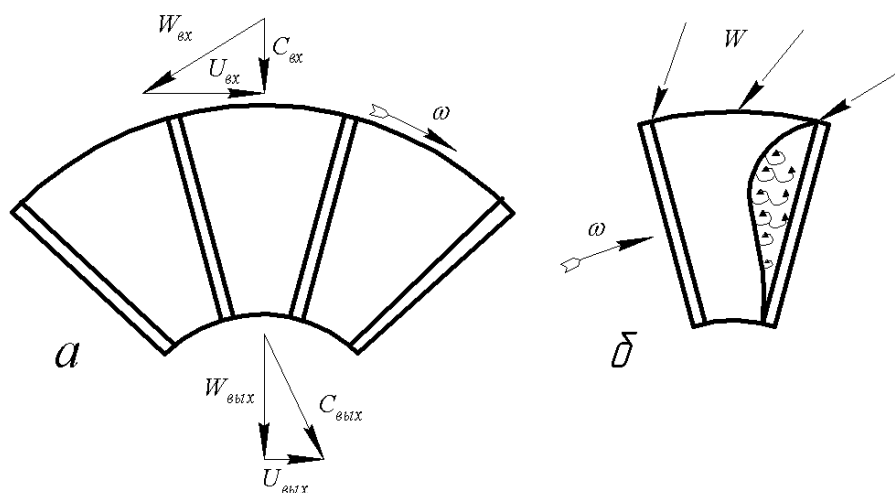


Рис. 5. Кинематика потока в каналах колеса:
а – треугольники скоростей; б – срывные течения в межлопаточном канале колеса

Очевидно, что эффективность сепарации воздухомасляной смеси в сумме будет определяться поведением всех капель масла. При наложении вращения на движущуюся внутри колеса смесь каждая капля масла находится под действием комплекса сил. Обладая по сравнению с воздухом большей инерционностью, капли при течении потока в межлопаточном канале будут иметь существенное поперечное перемещение и, достигнув стенки, будут прилипать к ней. Вследствие этого вдоль стенок лопаток под действием центробежных сил на периферию будет непрерывно стекать плёнка прилипающего к ним масла.

Следует отметить, что обтекание лопаточной решётки на рабочих режимах рабочего колеса суфлёра происходит с большими углами атаки, для которого характерно образование отрывных зон в межлопаточных каналах (рис.5, б). Вихревые течения смеси приводят к резкому изменению её дисперсности и способствуют образованию масляных «жгутов», способных проникать за счёт инерционных сил даже на выход колеса. При этом следует учитывать, что мелкодисперсные частицы масла с размером $d_{ч} = 1 \div 2$ мкм являются трудноотделимыми.

Таким образом, очевидно, что эффективность маслоотделения в рабочем колесе в значительной мере обусловлена траекторией масляных капель, зависящей от поля центробежных сил, времени пребывания потока в колесе и ряда других факторов.

Математическая модель процесса маслоотделения

В первом приближении можно принять, что условием полного маслоотделения будет служить возможность соприкосновения лопатки с любой масляной каплей, проходящей через межлопаточный канал рабочего колеса. В математи-

ческой форме это допущение можно записать в виде следующего неравенства:

$$\varphi_K - 2\pi/z \geq \varphi_{ч}, \quad (1)$$

где φ_K и $\varphi_{ч}$ – углы поворота, соответственно, колеса и частицы за время τ прохождения межлопаточного канала частицей масла; z – число лопаток в колесе.

Окружная составляющая скорости частицы масла при входе в колесо (на диаметре D) равна нулю, а при выходе из него она не превысит величину окружной скорости колеса на внутреннем диаметре d лопаточной решётки. Поэтому среднюю окружную скорость частицы масла можно принять равной половине последней. Тогда угловую скорость частицы масла будет определять зависимость

$$\omega_{ч} = U_{вых} / 0,5 (D+d),$$

а неравенству (1) можно придать вид

$$\frac{D \cdot U_{вых} \cdot t}{d \cdot (D+d)} \geq \frac{p}{z}. \quad (2)$$

В данном неравенстве при заданных геометрических размерах колеса неизвестным является время прохождения межлопаточного канала частицей масла. Если считать, что она не отстаёт от воздушного потока, то это время можно определить из соотношения

$$\tau = 0,5 (D - d) / C_{r\text{cp}},$$

где $C_{r\text{cp}}$ – среднелогарифмическая скорость потока в межлопаточном канале.

С учётом загромождения проходного сечения колеса лопатками, имеющими толщину δ , среднелогарифмическая скорость потока равна

$$C_{r\text{cp}} = C_{ex} \cdot \frac{D - \frac{z\delta}{2}}{D - d} \cdot \ln \frac{D - \frac{z\delta}{2}}{d - \frac{z\delta}{2}}.$$

После определённых преобразований неравенство (2) будет иметь вид

$$\frac{w_K}{4p} \cdot \frac{D \cdot z}{D+d} \cdot \frac{(D-d)^2}{C_{BX}} \cdot \frac{1}{\left(D - \frac{zd}{p}\right) \cdot \ln\left(D - \frac{zd}{p} / d - \frac{zd}{p}\right)} \geq 1. \quad (3)$$

С учётом принятых допущений может быть установлена аналитическая зависимость, позволяющая определять условие полного маслоотделения в рабочем колесе суфлёра.

Для удобства практического использования эту зависимость целесообразно привести к безразмерному виду, а также ввести в неё нормирующие множители, отражающие особенности реальной картины течения в межлопаточных каналах.

С учётом этого рассматриваемому неравенству можно придать окончательный вид

$$\frac{C_{BX}}{U_{BX}} \leq \frac{z}{2 \cdot p} \cdot \frac{(1-\bar{d})^2}{1+\bar{d}} \cdot \frac{K_l \cdot K_n}{\left(1 - \frac{z \cdot \bar{d}}{p}\right) \cdot \ln \frac{1 - \frac{z \cdot \bar{d}}{p}}{\bar{d} - \frac{z \cdot \bar{d}}{p}}}, \quad (4)$$

где \bar{d} – относительный внутренний диаметр колеса, равный отношению d/D ;

\bar{d} – относительная толщина лопаток, равная отношению δ/D ;

В данное соотношение введены два нормирующих множителя K_n и K_l . Первый из них учитывает, что часть капель, соприкоснувшись с поверхностью лопатки, отражается от неё и дробится, и для них потребуется повторное касание стенки. Коэффициент K_l учитывает влияние на процесс маслоотделения боковых стенок колеса, а именно влияние ширины колеса.

Аналитические зависимости для коэффициентов K_n и K_l были установлены на основании анализа результатов упомянутых экспериментальных исследований [1]

$$K_n = \left| \frac{1700}{n} \right| + 0,15; \quad K_l = 30 \cdot \bar{d}^{(2,75+5\bar{b})},$$

где \bar{b} – относительная ширина рабочего колеса, равная отношению b/D .

О возможности практического использования найденной зависимости

При проектировании систем суфлирования масляных полостей ГТД одним из важных вопросов является выбор оптимальных геометрических размеров рабочего колеса суфлёра и его рациональная компоновка либо в составе автономного агрегата, либо при размещении колеса внутри масляной полости двигателя (в коробке приводов, в передней или задней опоры).

Основным исходным параметром при выборе конструкции рабочего колеса суфлёра является объёмный расход воздухомаляной смеси, проходящей через него. При выбираемых диаметре и ширине колеса от этого расхода зависит величина абсолютной входной скорости потока. Но следует учитывать, что расчётный объёмный расход воздухомаляной смеси необходимо определять, исходя из того, что система суфлирования должна иметь запас по пропускной способности (в соответствии с требованиями [2]). Так, при использовании в масляных полостях опор двигателя лабиринтных уплотнений суфлёр должен обеспечивать возможность сепарации объёмного расхода смеси, превышающего фактический не менее чем в 1,5 раза (а при использовании контактных уплотнений – более чем в 2,5 раза).

В процессе эскизной компоновки рабочего колеса, прежде всего, предварительно должны быть выбраны его наружный диаметр D и ширина b . Если принять в качестве расчётных несколько вариантов значений величин D и b , то для каждого из них, используя равенство левой и правой частей зависимости (3), можно найти минимально возможные обороты ротора суфлёра, обеспечивающего приемлемую сепарирующую способность его рабочего колеса.

Однако при этом следует иметь в виду, что для любого выбранного рабочего колеса необходимо экспериментальное подтверждение его сепарирующей способности. Такого рода испытания целесообразно проводить в составе ГТД.

Библиографический список

1. Трянов, А. Е. Проектирование систем суфлирования масляных полостей

авиационных двигателей [Текст] / А. Е. Трянов, О. А. Гришанов, С. В. Бутылкин. - Самара: Изд-во СГАУ, 2006. - 83 с.

2. ОСТ 1-00969-80. Системы масляные газотурбинных двигателей самолётов. Общие технические требования [Текст] – Введ. 1980-06-10. – М.: ВНИИСу, 1980. - 41 с.

MODELING OIL SEPARATION IN THE IMPELLER OF A RADIAL- TYPE CENTRIFUGAL BREATHER

© 2012 A. G. Petrukhin¹, A. E. Tryanov²

¹”KUZNETSOV”plc

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The paper describes modeling of oil separation in the impeller of a radial- type centrifugal breather. The derived equation proves that with the chosen diameter and width of the wheel passage, the assigned breather rotor speed and a certain air-oil mixture volumetric flow rate the relative diameter of the impeller blade outer section presents an essential geometric parameter that defines oil separation capacity.

Breathing system, centrifugal breather impeller, engine oil consumption per hour.

Информация об авторах

Петрухин Анатолий Геннадьевич, инженер-конструктор, ОАО «КУЗНЕЦОВ». E-mail: petruhin_t@mail.ru. Область научных интересов: конструкция и производство газотурбинных двигателей.

Трянов Анатолий Ефимович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: вопросы проектирования и эксплуатации авиационных ГТД, перспективы их развития, использование конвертированных двигателей в наземных установках.

Petrukhin Anatoly Gennadyevich, design engineer, ”KUZNETSOV”plc. E-mail: petruhin_t@mail.ru. Area of research: GTE designing and manufacturing.

Tryanov Anatoly Efimovich, candidate of technical science, associate professor, the department of aircraft engine design and production, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: aircraft GTE designing, operation and development prospects; ground application of aeroderivatives.