

КОМПЛЕКС ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ Д-18Т

Д.Ф. Симбирский, д-р техн. наук, профессор, А.В. Олейник, канд. техн. наук, доц., А.В. Филяев, канд. техн. наук, доц.,

Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Харьков, Украина

В.И. Колесников, *канд техн. наук, главный конструктор, А.В. Шереметьев, канд. техн. наук, нач. отдела,*

В.В. Грищенко, ведущий инженер,

ЗМКБ «Прогресс» им. акад. А.Г. Ивченко, г. Запорожье, Украина

1. Постановка задачи.

1.1. В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) транспортной авиации оснащаются оперативными бортовыми или наземными цифровыми автоматизированными системами диагностики технического состояния. В их состав входят системы эксплуатационного мониторинга (учета) выработки ресурсов (МВР) контролируемых основных деталей (КД) двигателя. Наиболее известны бортовые и наземные системы МВР фирм Пратт-Уитни и Дженерал Электрик (США), «Анализ-86» НПО «Труд» и «Диагноз-90» АО «Пермские моторы» (Россия) и ряд других. Предполагается, что МВР должен быть положен в основу эксплуатации двигателей по техническому состоянию, позволяя повышать безопасность полетов, устанавливать индивидуальные межремонтные сроки и уменьшать эксплуатационные расходы. Это особо важно при эксплуатации двигателя в различных географических регионах и с различными целями, то есть с различной интенсивностью выработки ресурсов.

1.2. Однако, как показали наши исследования, достоверность результатов, а следовательно, эффективность и целесообразность использования систем МВР существенным образом зависят от точности входящих в них алгоритмов мониторинга температурного и напряженного состояний (ТС и НС) КД. Так, в работе [1] показано, что при реальных для известных алгоритмов мониторинга НС погрешностях на переходных режимах в 15-20% величины повреждаемостей в текущих полетных циклах, а следовательно, выработка ресурса КД по малоцикловой усталости (МЦУ)

определяются с ошибками в 20 - 40 раз.

1.3. В связи с этим НАКУ «ХАИ» совместно с ЗМКБ «Прогресс» проведены исследования, разработка и практическое внедрение (в форме программных комплексов) системы МВР с алгоритмами мониторинга ТС и НС повышенной точности [2 - 4]. В ней погрешности мониторинга (по сравнению с расчетами по моделям верхнего уровня) не превышали значений: по ТС – 0,1% и 3,5%, по НС – 1,8% и 4,23% на установившихся и переходных режимах соответственно. Это, по нашим приближенным оценкам, позволяет определять коэффициенты $\eta_{N_i} = \Pi_{N_i} / \Pi_{N_{опц}}$ и $\eta_{\tau_i} = \Pi_{\tau_i} / \Pi_{\tau_{опц}}$ соответствия текущего *i*-го полетного цикла (ПЦ) и обобщенного полетного цикла (ОПЦ) двигателя по критериям МЦУ (η_{N_i}) и длительной прочности (η_{τ_i}) с погрешностями в пределах до 6-15% (здесь Π_{N_i} , $\Pi_{N_{опц}}$ и Π_{τ_i} , $\Pi_{\tau_{опц}}$ - повреждаемости по МЦУ и длительной прочности (ДП) соответственно в *i*-м ПЦ и ОПЦ).

При известных значениях $\Pi_{\tau_{опц}}$ и $\Pi_{N_{опц}}$, рассчитанных по заданному ОПЦ, выработки назначенных ресурсов детали $\tau_{выр}$ и $N_{выр}$ в часах и количестве ОПЦ определяются по формулам

$$\tau_{выр} = \sum_{i=1}^n \eta_{\tau_i} \cdot \tau_{опц}, \quad (1)$$

$$N_{выр} = \sum_{i=1}^n \eta_{N_i}, \quad (2)$$

где *n* – количество выполненных ПЦ, а $\tau_{опц}$ – длительность ОПЦ. Тогда приведенные выше значения

погрешностей мониторинга ТС и НС могут быть приняты в качестве приближенной оценки погрешностей этой системы МВР в целом. Выполненные в [4] оценочные расчеты показали, что погрешности систем МВР с распространенными упрощенными алгоритмами мониторинга ТС и НС примерно на 0,5-1,5 порядка выше.

1.4. В настоящей статье приводятся основные результаты дальнейшего совершенствования алгоритмов мониторинга ТС и НС. Они реализованы в программном комплексе (ПК) «Ресурс-18Т», предназначенном для мониторинга выработки и прогнозирования остатка назначенного ресурса двухконтурного ТРД Д-18Т по штатно регистрируемым параметрам в процессе его эксплуатации на самолете АН-124 («Руслан»). Кроме того, ПК используется для экспресс-расчетов выработки ресурсов КД при различных предполагаемых вариантах ПЦ и условий эксплуатации двигателя. Структура ПК, в основном соответствующая реализованной в работах [2 - 4], приведена на рис. 1.

2. Основные данные ПК «Ресурс-18Т».

2.1. ПК может применяться в двух модификациях: для работы на борту в темпе реального времени и для наземной обработки полетной информации. В последнем случае регистрируемые параметры и сигналы двигателя первично обрабатываются и сохраняются в ПК «Диагностика», разработанном в НАКУ «ХАИ» под руководством С.В. Епифанова.

В состав КД были включены лопатка вентилятора, диски компрессоров среднего и высокого давлений, диски турбин высокого давления и вентилятора, а также отдельные валы. Исходными данными для расчетов служат значения штатно регистрируемых параметров двигателя, приведенные на рис. 1 в общепринятых обозначениях, а также сигналы «Запуск двигателя», «Стационарный режим» и «Останов двигателя». Выработка ресурса КД рассчитывается непрерывно в накопительном режиме.

ПК после каждого своего включения и выполнения цикла вычислений выдает следующую текущую информацию: накопленные повреждения КД по ДП и

МЦУ, выработанный ресурс и остаток назначенного ресурса (в часах и количестве ОПЦ), а также любую информацию, имеющуюся в базе данных ПК (смотри ниже).

2.2. Основой для разработки ПК послужил цикл специальных исследований особенностей ТС и НС каждой КД, выполненный на соответствующих моделях верхнего уровня. По их результатам были решены следующие задачи:

- выделение основных факторов механического и температурного нагружения КД: вращение, газодинамические и газостатические воздействия, силовые воздействия смежных деталей (в частности, закрытие или возникновение зазоров), конвективный и кондуктивный теплообмен КД с потоками рабочего тела, охлаждающего воздуха и с деталями узла;

- выделение параметров нагружения КД в соответствии с перечисленными выше факторами нагружения, а также построение зависимостей для вычисления их по величинам параметров газозооного тракта (ГВТ) двигателя;

- выбор базового установившегося режима и определение положения критических точек КД на этом, а также на других установившихся и переходных режимах;

- выделение величин составляющих НС по основным факторам нагружения на выбранном базовом установившемся режиме;

- исследования влияния температурного поля узла на НС КД из-за различий в теплопроводности $\lambda(t)$ и коэффициента температурного расширения $\alpha(t)$ материалов деталей узла, а также зависимостей их модулей упругости $E(t)$ от температур t ;

- получение для каждой КД переходных характеристик по ТС и НС, необходимых для разработки алгоритмов мониторинга на переходных режимах.

Проведенный анализ показал необходимость при мониторинге ТС и НС рассматривать КД в составе соответствующих узлов (за исключением лопатки вентилятора). Это обстоятельство существенно усложнило поставленные задачи по сравнению с аналогичными, рассмотренными в работах [2 - 4].

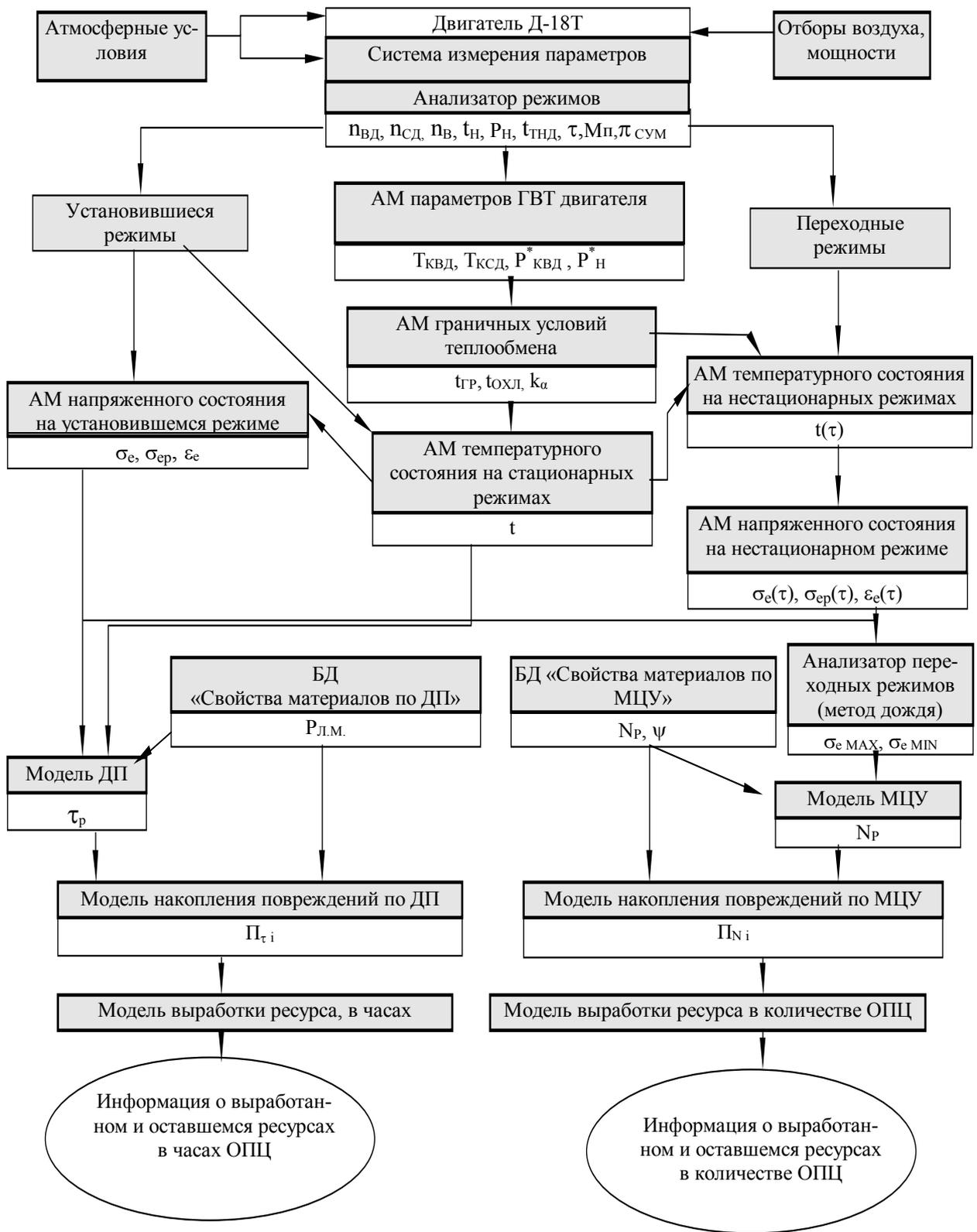


Рис. 1. Структура программного комплекса «Ресурс – 18Т»

2.3. ПК включает в себя следующие основные:

- блок мониторинга нерегистрируемых параметров ГВТ двигателя, необходимых для определения параметров нагружения КД;
- блок мониторинга параметров нагружения КД;
- блок мониторинга локальных граничных условий 3-го рода на поверхностях КД;
- блоки мониторинга ТС и НС КД на установившихся и переходных режимах;
- анализатор НС на переходных режимах (модифицированный «метод дождя»);
- модели ДП и МЦУ, накопления повреждаемости и выработки ресурсов КД.

3. Алгоритмы мониторинга ТС и НС.

При разработке ПК «Ресурс-18Т» основные изменения были внесены в алгоритмы мониторинга ТС и НС в целях повышения их точности путем учета дополнительных факторов температурного и механического нагружения КД.

3.1. При мониторинге НС КД на установившихся режимах вычисляются:

- компоненты тензора напряжений (далее напряжения) в критической точке КД от действия факторов механического нагружения;
- напряжения от действия факторов температурного нагружения (температурные напряжения);
- суммарные напряжения (с учетом концентрации напряжений);
- эквивалентное упругое напряжение;
- эквивалентное упругопластическое напряжение.

В основу этих алгоритмов мониторинга положены принципы:

- суперпозиции упругих напряжений, создаваемых разными факторами, в одинаковых полях температур;
- пропорциональности напряжений и параметров нагружения в постоянном поле температур;
- подобия температурных полей на различных режимах;
- подобия перераспределения напряжений из-за зависимости модуля упругости $E(t)$ от температуры в условиях подобия полей температур.

3.2. Основное внимание было уделено алгоритмам

мониторинга температурных напряжений в КД, которые были выражены через некоторое безразмерное напряжение \hat{S} , являющееся функциями предложенных режимных параметров [5]. Для КД со значительной долей температурных напряжений (диски, валы и др.) был предложен алгоритм мониторинга, погрешность которого не превышала 1% (0,6 МПа в наших расчетах) во всем диапазоне режимов двигателя. Его разработка заключалась в проведении для каждой компоненты тензора температурных напряжений структурной идентификации алгоритма (определении наилучшего набора из трех режимных параметров) и последующей его параметрической идентификации (определении коэффициентов полиномиальных аппроксимаций режимных параметров).

3.3. Задачами мониторинга ТС деталей являются вычисления на различных режимах работы двигателя:

- а) температур t в критических точках контролируемых деталей;
- б) характерных температур для учета зависимости коэффициента теплопроводности $\lambda(t)$ от температуры;
- в) эквивалентных температур t_e для учета зависимости модуля упругости $E(t)$ от температуры при расчетах напряжений от факторов механического нагружения;
- г) первой и второй эффективных температур t_1 и t_2 для учета температурной зависимости модуля упругости $E(t)$ и коэффициента температурного расширения $\alpha(t)$ при расчетах температурных напряжений.

Был предложен комплекс оригинальных алгоритмов мониторинга ТС, разрешающий поставленные задачи [6, 7]. Проведенные исследования показали, что в целом их погрешности (по сравнению с конечно-элементными расчетами по моделям верхнего уровня) во всем диапазоне реальных режимов работы двигателя не превышают 0,2%.

3.4. При мониторинге ТС и НС на переходных режимах были существенно развиты предложенные ранее алгоритмы, основанные на использовании методов теории пространства состояний [8].

4. Программная реализация ПК.

4.1. Приведенные выше алгоритмы МВР были

программно реализованы в виде автономного консольного приложения с использованием алгоритмического языка C++. Расчет вырабатываемого КД ресурса заключается в однократном вызове приложения на исполнение. Последующая визуализация результатов, а также их протоколирование являются задачей **оболочки**, реализующей интерфейс ПК с пользователем.

Исходный код приложения имеет блочную структуру. В первом блоке осуществляется инициализация параметров, необходимых для работы алгоритма (параметры базовых режимов, ТС и НС деталей на базовых режимах, свойства материалов и др.). Данные считываются из текстового файла, который должен храниться в папке инсталляции ПК.

В следующем блоке по значениям регистрируемых параметров двигателя вычисляются нерегистрируемые параметры, а также давление на входе с учетом скорости полета.

Далее в соответствующих блоках рассчитываются параметры механического и температурного нагружений каждой КД, их ТС и НС на установившихся и переходных режимах. При этом все алгоритмы носят унифицированный характер, что позволяет использовать универсальный программный код. В случае превышения напряжениями пределов текучести материалов проводится учет пластичности с помощью гиперболы Нейбера.

В следующих блоках по формулам (1) и (2) для каждой КД рассчитываются выработки назначенных ресурсов $\tau_{\text{выр}}$ и $N_{\text{выр}}$ в часах и циклах ОПЦ. В последнем блоке сохраняется полученная информация, необходимая для использования в следующем цикле расчетов.

4.2. Интерфейсное приложение (оболочка) ПК предлагает пользователю подготовить исходные данные, запускает расчетный модуль, выводит результаты расчетов в упорядоченном табличном виде, а также в виде графиков. Предусмотрена возможность визуализации практически всех результатов, а также задания перечня и порядка следования графиков и параметров, представляемых в табличном виде, масштаба, размеров, цвета и др.

Главное окно интерфейсного приложения состоит из рамки приложения, главного меню, панели инструментов, плавающих панелей «параметры» и «режимы», окна визуализации результатов в табличном и графическом видах, статусной строки. Предусмотрена возможность изменения положений как главного окна, так и плавающих панелей в зависимости от потребности пользователя.

Информация главного окна разбита на порции (каналы). В каждый канал может быть выведен неограниченный набор параметров в любой комбинации. Полный перечень параметров, оперируемых ПК, следующий: регистрируемые параметры, нерегистрируемые параметры, температуры, напряжения и деформации в критических точках всех КД (напряжения выводятся как покомпонентные, так и эквивалентные, условно-упругие и упругопластические), повреждаемости P_{T_i} и P_{N_i} , а также выработанный ресурс всех КД в часах и циклах.

Установка ПК на компьютер пользователя, а также работа с ним детально описаны в справочной системе, поставляемой вместе с ПК.

5. Тестирование и оценка погрешностей ПК.

5.1. Тестирование ПК заключалось в выполнении контроля правильности информационного обмена и представления конечных результатов МВР.

Тестирование было проведено для таких режимов работы двигателя, как установившийся взлетный, нормальный взлетный, экстремальный ПЦ, нормативный ОПЦ, реальные ПЦ по результатам обработки данных бортового регистратора самолета АН-124. Результаты тестирования подтвердили правильность информационного обмена во всех блоках алгоритма ПК и представления результатов мониторинга.

5.2. Оценки погрешностей алгоритмов мониторинга ТС и НС выполнялись как в автономных исследованиях, так и в процессе тестирования ПК. (Под погрешностями везде в настоящем изложении понимаются отличия результатов мониторинга и результатов аналогичных расчетов по моделям верхнего уровня).

В качестве предварительных оценок предельных погрешностей мониторинга были приняты значения:

- ТС на установившихся режимах: 0.2...0.4%;
- ТС на неустановившихся режимах: менее 2.5%;
- НС на установившихся режимах: менее 1.5%;
- по НС на неустановившихся режимах: менее 3%.

5.3. Для количественных оценок погрешностей МВР была применена методика [1] с использованием приведенных выше значений предельных погрешностей мониторинга ТС и НС.

Кроме того, указанные оценки были также проведены для типовых КД авиационного ГТД [4] при аналогичных условиях. Был выполнен детальный количественный анализ погрешностей определения коэффициента соответствия η_{Ni} с учетом всех систематических и случайных составляющих применительно к диску и рабочей лопатке ТВД двигателя. В частности, для ряда установившихся режимов и тестового переходного режима «Малый газ – Взлетный» было определено, что относительная погрешность определения η_{Ni} по предлагаемой методике не превышает 6%, а по известным методикам достигает 46...50%. Для установившихся режимов двигателя Д-18Т аналогичные расчеты показали, что относительная погрешность определения η_{Ni} по предложенной методике на всех режимах и различных КД не превышает 5%.

Эти оценки могут быть приняты в качестве предварительных. В дальнейшем предполагается их развитие и уточнение в процессе практического внедрения ПК «Ресурс-18Т».

Литература

1. Симбирский Д.Ф., Филяев В.А., Шереметьев А.В. Требования к точности мониторинга температурного и напряженного состояний деталей ГТД в системах учета выработки их ресурса // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. Держ. аерокосм. ун-т.*– Харків: ХАИ, 2002.– Вып. 34.– С. 130-132.
2. Система учета выработки ресурса турбовально-го привода газоперекачивающего агрегата / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.А. Филяев, С.В. Епифанов, Ф.М. Муравченко, А.В. Шереметьев, В.И. Колесников // *Авиационно-космическая техника*

и технология: Сб.науч. тр.– Харьков: ХАИ, 1998.– Вып. 5.– С. 343-347.

3. Комплекс программно-методических средств для учета выработки ресурса авиационного ГТД в системах диагностической обработки информации / Д.Ф. Симбирский, А.В. Олейник, В.А. Филяев, Ф.М. Муравченко, В.И. Колесников, А.В. Шереметьев, В.В. Грищенко // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.*– Харьков: ХАИ, 2002.– Вып. 26.– С. 163-166.

4. Филяев В.А. Мониторинг температурного и напряженного состояний деталей авиационных ГТД в системах учета выработки их ресурса. Дис... канд.техн.наук: 05.07.05.– Харьков, 2002.– 193 с.

5. Олейник А.В., Шимановская Н.А. Выбор алгоритмов мониторинга температурных напряжений в деталях на установившихся режимах для учета выработки ресурса газотурбинного двигателя / *Авіаційно-космічна техніка і технологія.*– Харків: ХАИ, 2003 (в печати).

6. Олейник А.В., Крикунов Д.В., Шимановская Н.А. Модели температурного состояния деталей на установившихся режимах для систем учета выработки ресурса газотурбинных двигателей // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.*– Харків, 2002.– Вып. 34.– С. 133–135.

7. Олейник А.В., Шимановская Н.А. Выбор алгоритмов мониторинга температуры деталей на установившихся режимах для учета выработки ресурса газотурбинного двигателя / *Авіаційно-космічна техніка і технологія.*– Харків: ХАИ, 2003 (в печати).

8. Модель термонапряженного состояния диска турбины на основе его переходных характеристик / А.В. Олейник, Д.Ф. Симбирский, В.А. Филяев, Д.В. Крикунов // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.*– Харьков: ХАИ, 2000.– Вып. 19.– С. 228-235.

Поступила в редакцию 05.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Ю.С. Воробьев, ИПМАШ НАНУ, г. Харьков; д-р техн. наук, профессор В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», г. Харьков.