4. Лазуткин Г.В. Колебания виброзащитных систем с конструкционным демпфированием.-В сб.:Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев:КуАИ, 1984, с. 118-126.
5. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники.-М.:Машиностроение, 1968.- 362 с.

УДК 628.7.036

Р.Г.Перельман

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Увеличение требований к надежности и ресурсу двигателей в условиях интенсификации рабочих процессов и всепогодного использования привело к возрастанию роли конструкционной прочности - прочности конструкции с учетом металлургических, технологических и конструкционных факторов в условиях эксплуатации.

Определяющий вклад в развитие этой области знаний внесен академиком Н.Д.Кузнецовым. Им показано /1/, что эрозионно-коррозионное воздействие внешней среды, особенно активное при переменных нагрузках, вызывает более 40% прочностных дефектов. Н.Д.Кузнецов постоянно уделяет внимание развитию такого направления конструкционной прочности, как эрозионная прочность, поскольку эрозионное изнашивание - одна из причин ограничения надежности и ресурса ГТД /2/. Так, в США досрочно снимается более 300 самолетных ГТД ежегодно, из которых до 75% из-за повреждения (забоин) лопаток посторонними предметами и примерно 30% из них вследствие эрозии лопаток. Кроме того, крупные частицы, вызывающие забоины, могут при этом дробиться и затем эродировать ступени. Интенсивнее изнашиваются ГТД пилонной компоновки и вертолетные. Изнашивание обусловливается соударением лопаток с твердыми (песок) и жидкими (капли дождя) частицами и интенсифицируется при последовательном воздействии жидких, а затем твердых частиц /4/.

Прогнозирование, диагностирование и обеспечение эрозионной прочности лопаточных машин - актуальная и важная задача, изучению которой посвящается все больше работ /2-7/.

Эрозионная прочность не коррелируется в широком диапазоне с общепринятыми механическими характеристиками материалов и их комби-

нациями. Это самостоятельное свойство, зависящее от многих факторов, которое должно изучаться с позиций системного подхода /5/. Процесс эрозии, механика нагружения и механизм повреждения и износа деталей при воздействии твердых и жидких частиц, содержащихся в газовом потоке, определяются соотношением характеристик системы, состоящей из двух взаимодействующих систем:

системы нагружения с его интенсивностью, частотой, площадью приложения, направлением, длительностью, зависящими от скорости, диаметра, угла воздействия частиц, расстояния между ними;

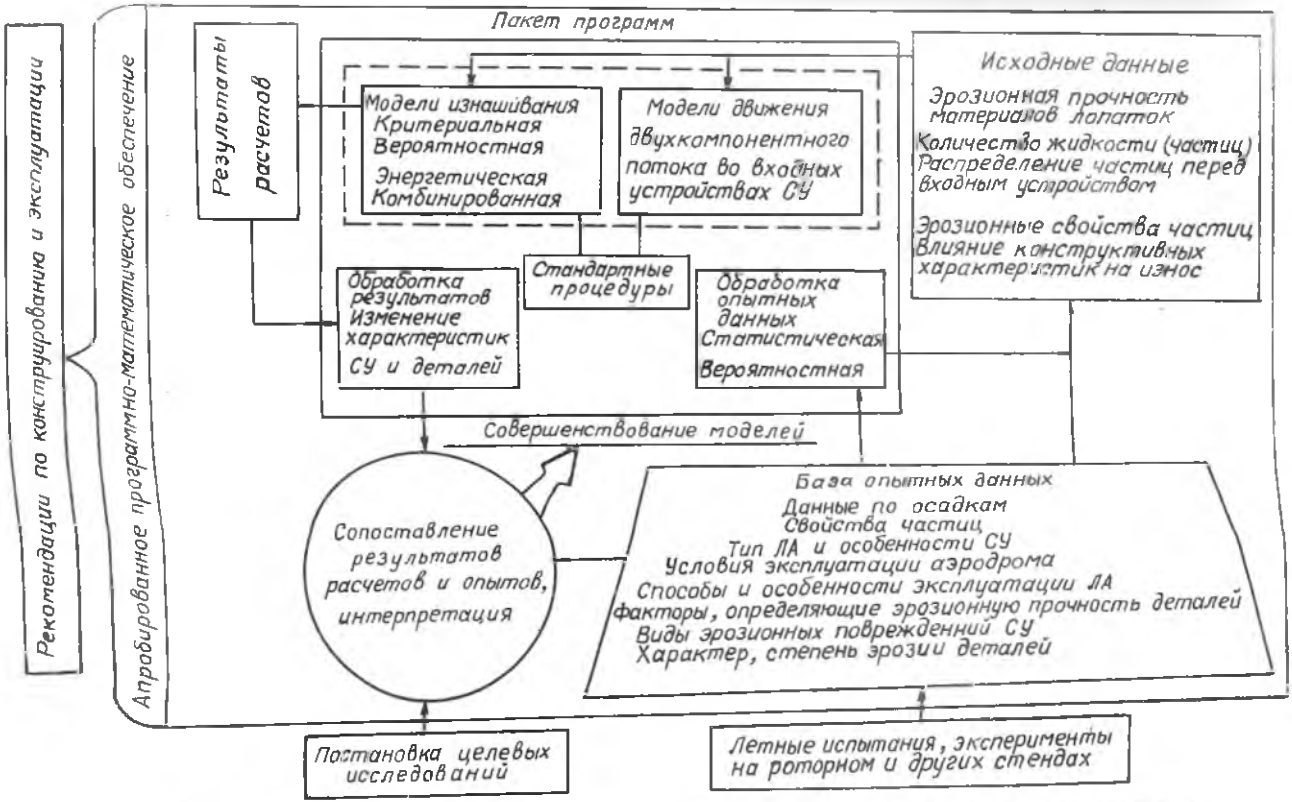
системы - материала, в котором формируются напряжения, с присущими ему характером основы (железная, никелевая, титановая и т.д.), структурой (размеры, форма зерен, субзерен, особенности их границ), частотными характеристиками структурных составляющих, склонностью к фазовым превращениям и остаточным напряжениям.

Механизмы эрозионного повреждения дополнительно усложняются их зависимостью от рельефа поверхности образца (детали), изменяющегося в различных периодах износа.

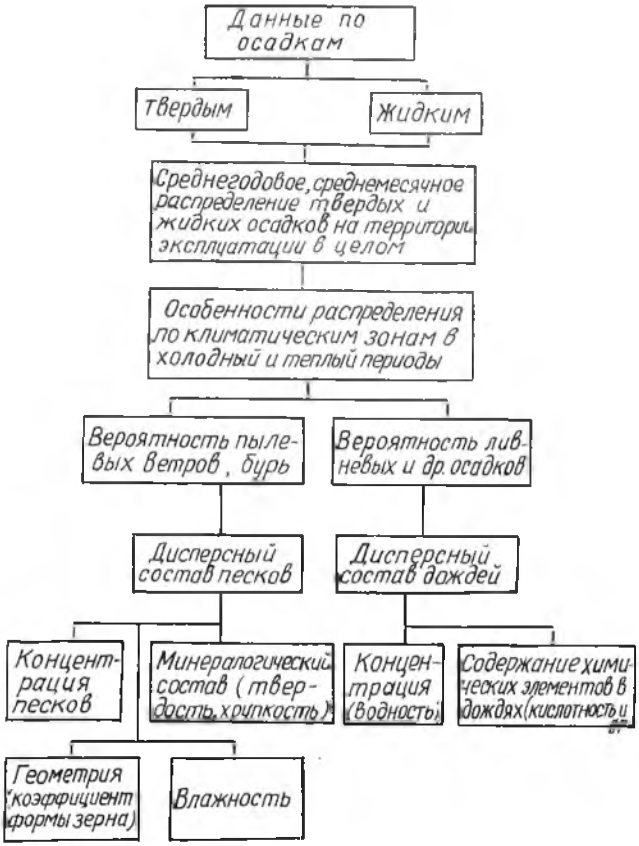
Схема исследований эрозионного изнашивания ГТД представлена на рис.I.

База опытных данных (БД) включает в себя первичные сведения,необходимые для расчетов изнашивания.На рис.2 и 3 они приведены лишь по двум позициям БД, свидетельствующим о многофакторности проблемы.

Материалы БД подлежат статистической и вероятностной обработке с помощью специально разработанных процедур. Например, количество и характеристики влаги, попадающей на вход ГТД эксплуатируемого типа, при известных компоновке на ЛА, профиле полета с учетом вероятности и характера дождя на трассе определяются с использованием методики, приведенной в работе /2/. Для определения количества и характеристик твердых частиц, попадающих в ГТД, необходимо знать, кроме сведений, приведенных на рис. 3, характер покрытия, условия эксплуатации аэродрома и ЛА, а при использовании ГТД с пылезащитными устройствами (ПЗУ) - учитывать характеристики последних. Перечисленные данные - исходные для расчета характеристик частиц, взаимодействующих с лопатками компрессора; при этом использовались модели движения двухкомпонентных потоков во входных устройствах с различными газодинамическими параметрами /2,6,7/. Соответствующие методики используются для определения характеристик частиц на различных режимах работы ГТД и в экстремальных условиях (например, при попадании в ливень или пылевую бурю). Результаты, при известных эрозионной прочности материала и конструктивных особенностях СУ, используются для расчетов изнашивания



Р и с. I. Функциональная схема расчетно-теоретических и экспериментальных исследований газоабразивного изнашивания

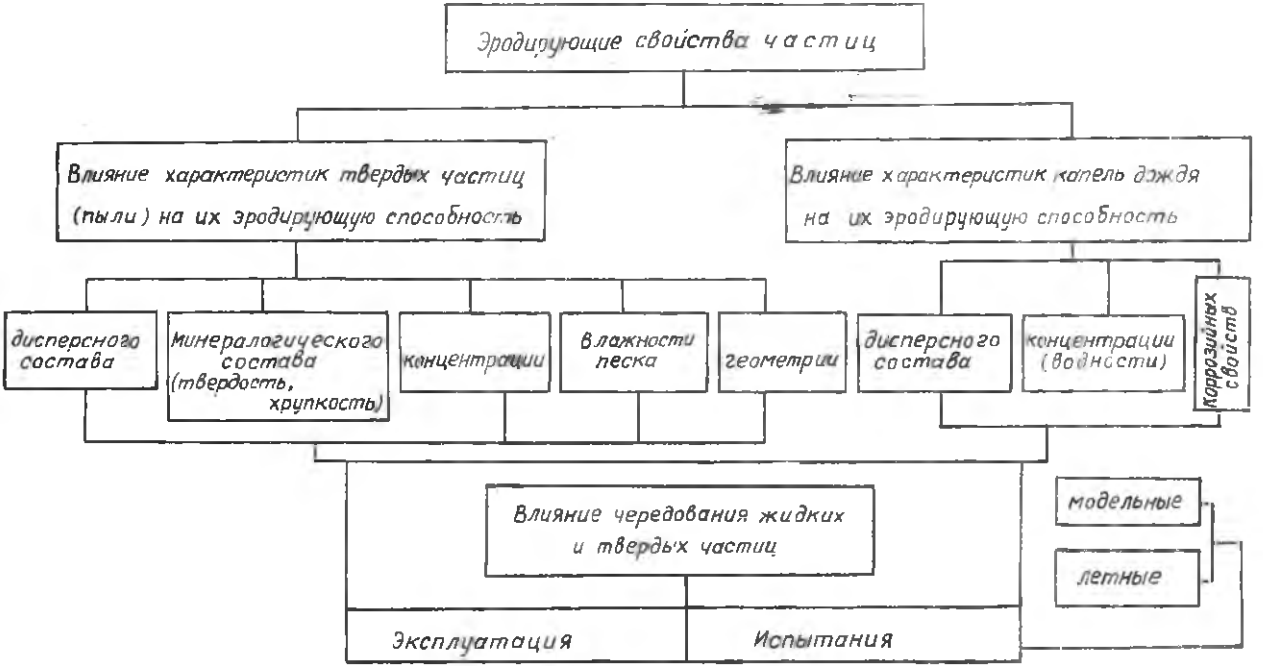


Р и с. 2. Сведения по осадкам, необходимые для БД

с применением одной из моделей в пакете программ, представленных в порядке увеличения их сложности на рис.I.

Остановимся на этих моделях.

Модель изнашивания элементов ДЛА жидкими частицами с использованием теории подобия и анализа размерностей формализована, не требует проникновения в существо процессов изнашивания, учитывает только внешние условия, определяющие взаимодействие. Необходимо знать лишь влияние сочетаний входных (воздействующих) параметров на выходные (на изнашивание).



Р и с. 3. Сведения об эрозионных свойствах частиц, необходимые для БД

Согласно π -теореме принимается, что потеря массы изнашиваемым элементом

$$\Delta M_э = f(\rho_{жс}, \nu_{жс}, d_{жс}, v_{жс}, \Delta M_{жс}, P_г, \ell, h, v_{обр}, \alpha, \tau), \quad (1)$$

где $\rho_{жс}$, $\nu_{жс}$ - плотность и кинематическая вязкость жидкости соответственно;

$d_{жс}$, $v_{жс}$ - характерный размер и скорость частицы соответственно;

$\Delta M_{жс}$ - масса жидкости, изнашивающей образец;

$P_г$ - давление газа, увлекающего частицы;

ℓ, h - характерный размер и шероховатость образца соответственно;

α - угол между вектором скорости частицы и поверхностью образца.

Выбираются основные единицы измерения: L - длина; M - масса; T - время; базисные параметры: $\rho_{жс}$, $d_{жс}$, $v_{жс}$.

Поскольку число частиц, воздействующих на поверхность,

$$N_{жс} = \Delta M_{жс} \left(\frac{\pi}{6} d_{жс}^3 \rho_{жс}\right)^{-1},$$

уравнение (1) методом нулевых размерностей приводится к виду

$$J_M = \frac{\Delta M_э}{\Delta M_{жс}} = \pi_1 = f_1\left(\frac{v_{жс} d_{жс}}{\nu}; \frac{P_г}{\rho_{жс} v_{жс}^2}; \frac{v_{жс}\tau}{d_{жс}}; \frac{\Delta M}{\rho_{жс} d_{жс}^3}; \frac{v_{обр}}{v_{жс}}; \frac{\ell}{d_{жс}}; \frac{h}{d_{жс}}\right). \quad (2)$$

Здесь $\pi_2 = \frac{v_{жс} d_{жс}}{\nu} = Re$; $\pi_3 = \frac{P_г}{\rho_{жс} v_{жс}^2} = E_u$; $\pi_4 = \frac{v_{жс}\tau}{d_{жс}} = H_0$ - критерии Рейнольдса, Эйлера и гомохронности соответственно;

$\pi_5 = \frac{\Delta M_{жс}}{\rho d_{жс}^3}$ - критерий, учитывающий число воздействующих частиц;

$\pi_6 = \frac{v_{обр}}{v_{жс}}$; $\pi_7 = \frac{\ell}{d_{жс}}$; $\pi_8 = \frac{h}{d_{жс}}$ симплексы скоростей и геометрических параметров соответственно.

Симплекс π_8 опускается, если изнашивание установившееся. Тогда уравнение регрессии примет вид

$$J_M = \frac{\Delta M_э}{\Delta M_{жс}} = A \pi_2^a \pi_3^b \pi_4^c \pi_5^d \pi_6^e \pi_7^f. \quad (3)$$

Постоянная A и коэффициенты a, b, c, d, e, f - опытные.

Эксперимент планируется с использованием управляющих факторов $v_{жс}$, $d_{жс}$, $\Delta M_{жс}$, $v_{обр}$, $P_г$, ℓ и выходного параметра $\Delta M_э$.

Для отыскания постоянной и степенных коэффициентов уравнения

(3) нужно выполнить при дробном факторном эксперименте 16 опытов /8/, обеспечивающих достаточную точность определения искомых величин. Постоянная и коэффициенты должны быть одинаковыми в опытах всех исследователей, испытывающих, например, на роторном стенде /1/ один и тот же материал в одинаковом состоянии. При переходе к оценке износа лопаток компрессора необходимо учитывать особенности его газодинамики, в частности отсутствие области сжатия между частицей и лопаткой, своеобразие рельефа и т.д.

Для расчета изнашивания твердыми частицами аналогичное уравнение регрессии приведено в работе /9/. Поскольку для эрозии характерна статистическая природа процессов разрушения, связанная со структурной неоднородностью изнашиваемой поверхности и локальностью нагрузок, полезнооразно рассмотреть модель изнашивания элементов ДЛА частицами с использованием статистического, вероятностного подхода /10/.

В результате удается оценить эрозионное изнашивание деталей. Однако и в этом случае ряд его особенностей не учитывается, что обусловливает весьма приближенный характер прогнозирования.

Несколько физичнее, но и сложнее "энергетический" подход к расчету износа. Его возможность обсуждалась как с позиций механики разрушения /1,11,12/, так и с позиций термодинамики /13/. При этом использовалось представление о разрыве межатомных связей разрушенной части материала в результате накопления и усвоения им в процессе, например, газоабразивного изнашивания энергии (часть подводимой энергии рассеивается), когда в контактных зонах энергия поступательного движения частиц скачкообразно преобразуется в энергию волновых и колебательных процессов. Отмечалось, что насыщение энергией продуктов износа в зависимости от условий нагружения может меняться на несколько порядков. В работе /14/ в результате обобщения предыдущих исследований и с учетом положений монографии /15/ предлагается ориентироваться на удельную энергию разрушения E_p. Такой подход приемлем, например, в многоцикловой области нагружения при оценке изнашивания сплавов однородной структуры. В этом случае используется модель изнашивания элементов ДЛА частицами с учетом энергетического подхода. Зависимость инкубационного периода ряда материалов от E_p подтверждает возможность использования этой модели. Однако необходимость прогнозирования изнашивания в широком диапазоне определяющих его параметров, опирающегося на возможно более глубокое проникновение в физическую сущность процесса, заставляет обратиться к модели, учитывающей и обобщающей наиболее ценные положения известных моделей.

Предлагается комбинированная структурно-энергетическая модель.

Режим изнашивания может прогнозироваться с помощью критериальной модели (уравнение (3)). Рассмотрим далее комбинированную модель с использованием в качестве примера режима многоциклового взаимодействия жидких частиц с пластическими металлами. Последовательное развитие изнашивания в соответствии с этой моделью и уровень его аналитического описания в каждом из периодов представлены в таблице. Показано /2/, что для многоциклового режима при взаимодействии с частицами жидкости в инкубационном периоде ведущий фактор повреждения – волны Релея, амплитуда которых пропорциональна их длине, так что она значительна при частотах более 100 кГц /16/. Когда силы упругости, действующие на границе частицы (капли), приложены по нормали к поверхности преграды и деформации последней малы, на поверхности под действием волны Релея возникают в радиальном направлении большие динамические напряжения растяжения /17/. Они быстро убывают в глубину материала, и энергия разрушения накапливается в тонком поверхностном слое. Сближение длин воздействующих волн с размерами элементов структуры или конгломератов способствует накоплению деформаций, поскольку при каждом соударении волны Релея возбуждают колебания элементов материала. Так, например, при d_K = 0,3 мм и скорости соударения со стальной лопаткой 400 м·с$^{-1}$ длина волны λ всего вдвое больше средней величины зерна стали. В процессе взаимодействия жидких частиц с материалом наряду с упругими происходят микропластические деформации (главным образом в менее прочных зернах и на их границах). Число деформированных элементов растет. В местах многократных пересечений кольцевых микродеформаций, возникающих вокруг центров соударения, происходит передеформация материала, образуются скопления дислокаций, материал упрочняется и охрупчивается. Если это упрочнение недостаточно для того, чтобы он при действующем уровне нагружения перестал деформироваться, накапливать энергию разрушения, то в результате дальнейших передеформаций материал выкрашивается. При воздействии твердых частиц инкубационный период в большинстве практических случаев не наблюдается. Взаимодействие, обусловленное распространением ударных волн, сопровождается микрорезанием, материал выдавливается из валика кратера /16/, потери металла происходят в результате последовательных ударов в материал валика, и процесс изнашивания существенно усложняется.

Скорость распространения пластических волн при ударном нагружении определяется по формуле

$$C_1 = f'(\varepsilon)^{0.5} \rho^{-1}, \qquad (4)$$

КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ

для режима многоциклового взаимодействия

№ п/п	Периоды изнашивания	Воздействующие факторы	Сущность процесса	Аналитическое описание
I	Инкубационный	Ударные волны	Взаимодействие волн Релея с элементами структуры (сближение длин волн с ними ускоряет накопление деформаций)	Первоначальное
2	Первый переходный и установившийся. Колебание элементов структуры, их местное вырывание	Двухкомпонентный поток и частицы на элементы структуры материала	Сближение возбуждающих частот с собственными определяет амплитуды колебаний	Есть
3	Второй переходный. Формирование рельефа	Двухкомпонентный поток и частицы на элементы	Сближение возбуждающих частот с собственными частотами макровыступов и структурных элементов. Изнашивание их боковых сторон	Есть
4	Второй установившийся. Отступание оформировавшегося рельефа		Развитие трещин на дне впадин, отламывание выступов и их элементов. Формирование новых элементов рельефа	Частичное. Необходимо привлечение теорий кинетической и дислокаций

где $f'(\varepsilon)=d\sigma/d\varepsilon$ – модуль упрочнения, тангенс угла наклона кривой $\sigma-\varepsilon$ в области пластических деформаций.

При малых пластических деформациях, свойственных многоцикловому взаимодействию, скорость пластических волн, от которых отражаются упругие волны разгрузки /16/, близка к скорости упругих волн.

Процесс "впитывания" материалом энергии при колебаниях зерен поверхностного слоя, не выступающих из него, в момент прохождения волны, сопровождающийся микродеформациями материала по их границам, пока математически не описан.

После выкрашивания материала у границ отдельных зерен и по мере все большего их выступания над поверхностью частота колебаний зерен, а затем выступов – конгломератов зерен, вызванная периодическими срывами обтекающего их высокоскоростного потока жидкости, возникающего при растекании частицы (с учетом продольных и угловых перемещений зерен), уменьшается. Для зерен стали 20Х13 она представлена в работе /2/, где основное внимание уделено определению резонансных частот, при которых происходит ускоренное разрушение материала, что подтверждено экспериментально. В работе /17/ задача определения частот колебаний выступающего зерна решалась для случая его обтекания потоком газа, "утяжеленного" посторонними частицами. Отметим, что, например, при ударе частицы песка по металлической поверхности со скоростью 300 $м \cdot с^{-1}$ твердая частица разрушается и растекается вдоль поверхности подобно жидкой. При частотах колебаний зерен, отличных от резонансных /18, 19/, ограничились определением характера распределения напряжений в заделке зерна, резко возрастающих к поверхности материала. Аналитического определения влияния этих напряжений на величину микродеформаций при различных коэффициентах динамичности еще нет. Данные, необходимые для расчетов эрозионного изнашивания при нерезонансных режимах, получены из экспериментов.

Сформировавшийся рельеф отступает от поверхности с отламыванием частей отдельных выступов и их новым формированием. На этом этапе темп эрозии уменьшается примерно вдвое и изнашивание может быть описано с использованием статистических и вероятностных подходов, что еще также не сделано.

При воздействии твердых частиц выраженного рельефа на поверхности деталей не образуется, однако на кромках лопаток, особенно сопловых лопаток вертолетных ГТД, возникают пилообразные зубцы – концентраторы напряжений, уменьшающие усталостную прочность лопаток на 30-40% еще до того, как они в результате эрозионного изнашивания по-

теряли связь с корпусом. Это явление нуждается в дальнейшем изучении.

Выводы

Предложены функциональная схема расчетно-теоретических и экспериментальных исследований и комбинированная структурно-энергетическая модель эрозионного изнашивания лопаток компрессоров ГТД. Намечены направления, в которых эта схема и модели изнашивания желательно совершенствовать.

Показано, что для создания апробированного программно-математического обеспечения уточненного прогнозирования эрозионного изнашивания лопаток необходимо дальнейшее пополнение базы опытных и исходных данных, в частности, за счет внедрения разработанного МАИ совместно с ЦИАМ ГОСТа на эрозионные испытания материалов /20/, накопление сведений по эрозионной стойкости лопаток компрессоров в эксплуатации, опирающееся на нормативные материалы по паспортизации эрозионных повреждений.

Библиографический список

1. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.Н. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей.-М.:Машиностроение, 1976.- 214 с.
2. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов.-М.:Машиностроение, 1980.-245 с.
3. Кодрышев В.Б., Перельман Р.Г. Исследование прочности пластичных материалов при импульсных каплеударных нагружениях.-Проблемы прочности, 1980, № 1, с.72-74.
4. Перельман Р.Г., Волкова Л.Ф. Влияние поочередного воздействия жидких и твердых частиц на изнашивание металлов.-Трение и износ, 1983, т.II, № 4, с.691-695.
5. *Proceeding of six ELST Conference. Cambridge, England, 1983.*
6. Перельман Р.Г., Голубев В.К. О проникновении эрозионноопасных жидких частиц в проточную часть компрессора авиационного ГТД.-В сб.: Исследование рабочего процесса в элементах двигателей и энергетических устройств с двухфазным рабочим телом.Л.:МАИ, 1980, с.78.
7. Орехов В.Д. Исследование движения частиц в канале воздухозаборника.-В кн.: Ученые записки ЦАГИ. М., 1980, т.II, № 2, с.137-142.
8. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования.-М.: Высшая школа, 1984.- 439 с.

9. Абразивное изнашивание газопромыслового оборудования/В.И.Бирюков, В.М.Виноградов, М.М.Мартиросян, В.Н.Михайлов.-М.:Недра, 1977. - 207 с.
10. Перельман Р.Г., Денисов Ю.Д. Статистические модели эрозионного износа.- В сб.:Исследование прочности вибрации и конструкции ДЛА. М.:МАИ, 1974, вып. 289, с. 94-104.
11. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин.-М.:Машгиз, 1963.- 140 с.
12. Костецкий Б.И. и др. Поверхностная прочность материалов при трении.-Киев:Техника, 1976. - 192 с.
13. Полежаев Ю.В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении с частицами.-ИФЖ, 1979, XXXVII, № 3, с.389-394.
14. Бодрышев В.В. Удельная энергия разрушения как определяющий параметр эрозионной стойкости материала.-ИВУЗ. Машиностроение, 1978, № 2, с. 133-137.
15. Иванов В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов.-М.:Металлургия, 1975.-356 с.
16. *Erosion Treaties of materials science and technology. Volume Edited by Carolyne Press, Academic Press, New York-San-Francisko-London, 1979.*
17. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения.-М.:Наука, 1974.- 640 с.
18. Перельман Р.Г., Баулин В.И. Волны Релея как один из ведущих факторов в капельно-ударном разрушении деталей.-Проблемы прочности, 1974, № 4, с.70-74.
19. Перельман Р.Г., Фрейшист Н.М. Исследование напряжений при высокоскоростном каплеударном воздействии.-Проблемы прочности, 1979, № 5, с.50-55.
20. ГОСТ 23.219-84. Обеспечение износостойкости изделий. 1985.

УДК 621.01:539.4

В.К.Семенычев

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Для оценки степени усталостного повреждения, внесенного в конструкцию в течение заданного промежутка времени, необходимо знать действительные изменения во времени напряжений или их обобщенные интегральные характеристики, достаточные для расчета надежности конструкций /1,2/.