

9. Jah'jaev, N. Ja. Prognozirovanie rabotosposobnosti sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya po iznosu detalej v uzlah trenija: Dr. diss. (Tech.). Mahachkala: DGTU, 2003.

10. Leontev, L. B., N. P. Shapkin, A. L. Leontev, and A. G. Toklikishvili. "Hardening of the friction surfaces of steel parts tribomodifikatsiey organoneorganicheskimimi materials." *Metalworking* 5(89) (2015): 32–39.

11. Shapkin, N. P., L. B. Leontev, V. N. Makarov, I. G. Khal'chenko, and V. V. Korochentsev. "Vermiculite-Based Organosilicate Antifriction Composites as Coatings on Friction Surfaces of Steel Articles." *Russian journal of applied chemistry* 87.12 (2014): 1727–1734.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонтьев Лев Борисович —
доктор технических наук, профессор.
Дальневосточный федеральный университет
leontyev.l.b@yandex.ru
Леонтьев Андрей Львович —
кандидат технических наук.
Дальневосточный федеральный университет
gfi25leontev@mail.ru
Макаров Василий Николаевич — аспирант.
Научный руководитель:
Леонтьев Лев Борисович.
Дальневосточный федеральный университет
makarov_vasily@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Leontev Lev Borisovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Far Eastern Federal University
leontyev.l.b@yandex.ru
Leontev Andrew Lvovich — PhD.
Far Eastern Federal University
gfi25leontev@mail.ru
Makarov Vasily Nikolaevich — Postgraduate.
Supervisor:
Leontev Lev Borisovich.
Far Eastern Federal University
makarov_vasily@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2015 г.

УДК 678,67.014,67.017,67.019

Е. Н. Белецкий

РАЗЛИЧНЫЕ УРОВНИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ОТДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОТОРЫХ ВЫПОЛНЕННЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассмотрен новый многоуровневый подход к моделированию сложных трибосопряжений судового движительного комплекса, отдельные элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов. Трибосистема в процессе моделирования рассматривается как сложная, зависящая от множества критериев. Представлены различные варианты управления сложной трибосистемой, содержащей элементы композиционных материалов, в частности — активного управления на основе внесения дополнительной энергии и пассивного за счет дифференцированного учета откликов системы на внешнее воздействие, и изменений, возникающих в обратных связях. Предложен новый комплексный подход при моделировании, который включает решение задачи оптимизации и выбор векторного критерия показателей эффективности работы системы. Получены новые зависимости для динамических критериев качества сложной трибосистемы или целевых функций на основе способа линейной свертки.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование трибосопряжений, механическая обработка, граничные условия, критерии оптимизации, вектор состояния, параметры качества.

используемым конструкционным материалам триботехнического назначения. КППМ обладают рядом преимуществ по сравнению с металлами и сплавами. Так, они обладают высокими удельными прочностными и упругими характеристиками, инертны к агрессивным химическим средам, могут адаптироваться к широкому диапазону температур, обладают низкой тепло- и электропроводностью, высокой износостойкостью, способны работать в режиме граничного и сухого трения и т. п.

Однако наряду с преимуществами имеются и существенные ограничения, в первую очередь связанные со слишком широким спектром материалов, предлагаемым современным товарным рынком, а так же с малой изученностью «прикладных» физико-механических характеристик данных материалов и их адаптацией при решении конкретных инженерных задач. В современных конструкторских бюро и технических отделах производственных предприятий порой полностью отсутствуют справочные и нормативные данные, алгоритмы и единые подходы при выборе тех или иных марок КППМ. [1] – [3]. Поэтому весьма актуально на базе накопленного опыта расчетно-экспериментальных работ крупнейших отечественных производителей изделий из композиционных материалов судостроительной отрасли и смежных отраслей создать алгоритмы и информативно-содержательные расчетные модели при проектировании узлов из КППМ, а также модели технологических процессов формообразования из изготовления деталей из композиционных полимерных материалов, в том числе триботехнического назначения.

Задачи моделирования и управления сложными триботехническими системами содержащие элементы КППМ

В трибосопряжениях, входящих в состав судовых энергетических установок, таких как дейдвудные подшипники, торцевые и лабиринтные уплотнения насосов и т. п., происходят сложные физико-химические процессы. Поэтому научиться моделировать и управлять этими процессами еще на этапах проектирования и подготовки производственного цикла изделия — весьма актуальная задача. На сегодняшний день можно рассмотреть два основных существующих способа управления сложными процессами контактного взаимодействия в трибосопряжениях (рис. 1), содержащих КППМ: активное управление и пассивное [4] – [6], причем оба способа основаны на контроле энергетических потоков в рассматриваемой системе. В свою очередь, активное управление предусматривает внесение дополнительной энергии в зону трения или изменения характера потока (интенсивности, цикличности, использования источников комбинированного воздействия и т. п.). Кроме этого на всех этапах «энергетического воздействия» на систему предусматривается система обратных связей, позволяющих оптимизировать процесс и дозированно воздействовать на трибосистему. Все остальные способы воздействия на трибосистему относят к пассивному управлению. На практике для сложных систем, к которым относят и трибосистемы, широко используют структурно-параметрический синтез. Согласно данному подходу, искусственно, на этапах проектирования и расчетов конструкции, фиксируют компоненты системы, например, характер трения и конструктивное исполнение пары: вал — втулка, вал — торцевое уплотнение, направляющая — ползун, а изменяются при этом только параметры системы. К данным параметрам можно отнести: состав и свойства прокачиваемой среды через трибосопряжение (соленость воды, кислотная или щелочная составляющая, наличие абразива и поверхностно-активных веществ и т. п.) [6] – [8].

В зависимости от поставленных задач для пар трения, содержащих детали и отдельные элементы из КППМ, в понятие эффективности работы отдельного узла или агрегата в целом может быть вложен разный смысл. Например, функциональные критерии наименьших материальных и энергозатрат, а следовательно и более упрощенной и дешевой технологии изготовления при наилучшей работоспособности узла трения, с полным обеспечением требуемого эксплуатационного качества в течение всего срока ее эксплуатации. Регламентированные заранее требования (как на этапах проектирования, так и на этапах подготовки производственного цикла) могут вступать в противоречия между собой. Причем противоречия и «непреодолимые ограничения» могут быть как технического, так и организационно-финансового плана. Например, противоречия, связанные с эксплуатационными показателями изделия (такими как сокращенные сроки приработки пар

трения и выход на оптимальный период эксплуатации; достижение наибольшей износостойкости контактирующих деталей пар трения; обеспечение задиростойкости в режимах экстремальных нагрузок и нештатных ситуациях) могут быть непреодолимы из-за отсутствия финишных отделочных технологий, в том числе и механической обработки на действующем производстве, или существенных финансовых затрат на их покупку. Поэтому на этапах проектирования и подготовки производства изделий из КПМ важно решать не только организационно-финансовые задачи, но и задачи оптимизации, в том числе с назначением технически и финансово обоснованных, правильных критериев оптимизации. При моделировании процессов такая задача может быть как *одно-*критериальной (например, по финансовым затратам), так и *многокритериальной*, что усложняет решение. Существенные ограничения связаны с требованиями обеспечения эксплуатационных параметров качества и качества поверхностного слоя отдельных деталей, определяющих работоспособность трибосопряжения (рис. 2). Основные ограничения по показателям качества ответственных деталей, выполненных из КПМ, представлены в табл. 1.

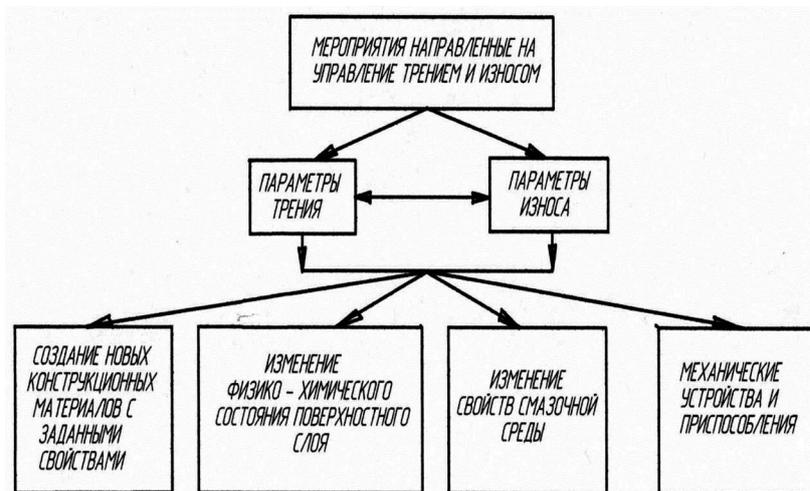


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая мероприятия, направленные на управление процессами в трибосопряжениях, в том числе пар трения, содержащих детали, выполненные из КПМ

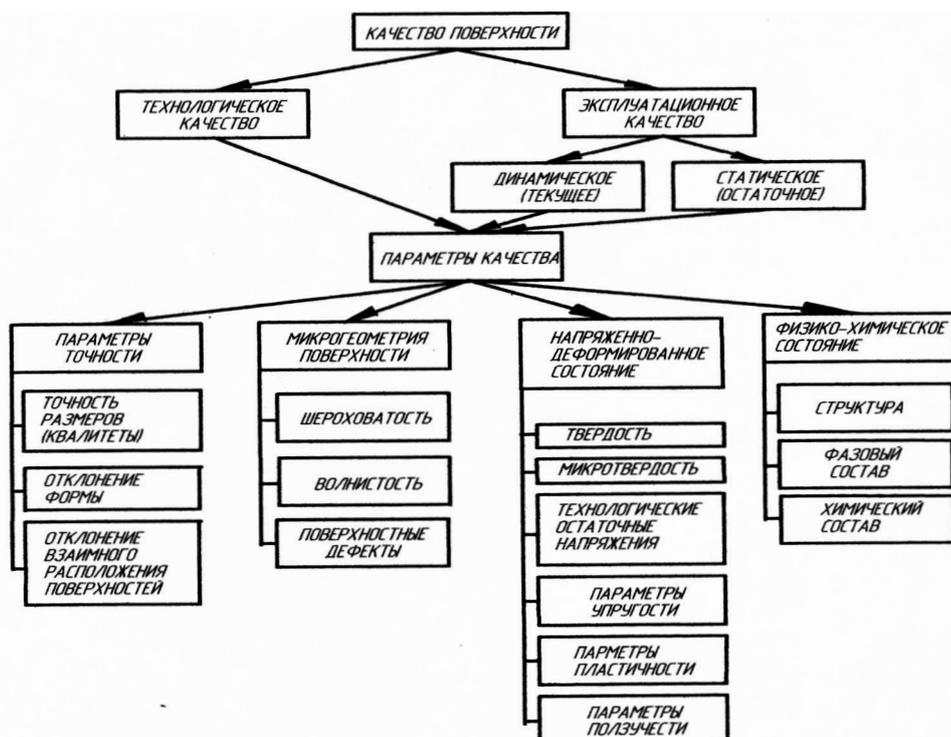


Рис. 2. Параметры качества поверхностного слоя деталей трибосопряжения при нормальном трении

Таблица 1

**Ограничения по показателям качества ответственных деталей пар трения,
 выполненных из КПМ
 (функция состояния эксплуатационных показателей качества изделий)**

№ п/п	Наименование показателя	Вид зависимости	Используемые в зависимостях параметры и показатели
1	Ограничения по шероховатости поверхности	$R_z = R_z(V, S, \dots) \leq R_{zd}$	R_z — величина микронеровностей, мкм; R_{zd} — допустимое значение R_z , диктуемое служебным назначением детали или технологическими соображениями, мкм
2	Ограничения по волнистости поверхности	$W_{max} = W_{max}(V, S, \dots) \leq W_{maxd}$	W_{max} — величина максимальной длины волны, мм; W_{maxd} — допустимое значение W_{max} , диктуемое служебным назначением детали или технологическими соображениями длина волны, мм
3	Погрешность геометрической формы изделия (деформативность системы под действием внешних сил)	$Y = Y(V, S, \dots) \leq Y_d$	Y — величина погрешности обработки, вызванная упругими перемещениями в технологической системе и размерным износом режущего инструмента, мкм; Y_d — допустимое значение деформативности системы, мкм
4	Ограничения по технологическим остаточным напряжениям	$\sigma = \sigma(V, S, \dots) \leq \sigma_d$	σ — величина средних внутренних напряжений, Н/мм ² ; σ_d — допустимое значение напряжений σ , диктуемое служебным назначением детали, Н/мм ²
5	Ограничения по микротвердости функциональной поверхности	$H_v = H_v(V, S, \dots) \leq H_{vd}$	H_v — величина твердости (микротвердости) поверхности, Н/мм ² ; H_{vd} — допустимое значение H_v , диктуемое требованиями чертежа, Н/мм ²

В общем виде постановка задачи оптимизации по техническим показателям, отвечающим за эксплуатационные характеристики системы и параметры установившегося процесса трения, может быть представлена как задача оптимального синтеза трибосопряжения с векторным критерием оптимальности на основе локальных критериев [4], [6], [9], [10]. В общем виде этапы решения задачи оптимизации по техническим параметрам представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные этапы решения задачи оптимизации для трибосистем,
 содержащих элементы КПМ в виде отдельных деталей или элементов конструкций**

№ п/п	Наименование этапа	Характеристика	Основные подходы при моделировании, зависимости, параметры
1	Оценка неопределенностей решения	Неопределенность целевой функции из-за: – неопределенности цели исследования (определение компромисса) – вида используемой модели – неопределенности и непредсказуемости сочетания используемых материалов и их свойств	Содержание компромисса состоит в: – ранжировании целей; – назначении весовых коэффициентов – математическая модель; – физическая модель; – на основе теории подобия и т. п. Любому j -му звену трибосопряжения назначается весовой индекс $a(j)$, величина которого зависит от физико-механических и физико-химических параметров конструкционных материалов, определяющих технологические, стоимостные, надежность и другие показатели j -го звена. Структура целевой функции Z в этом случае примет вид $Z = \sum_{(j)} a(j)$

Таблица 2
(Окончание)

2	Выбор стратегии исследования	Решение задач: 1) обеспечение максимальной эффективности трибосопряжения	$f(x) \rightarrow \max$, где $f(x)$ — функция показателей работоспособности и надежности работы трибосопряжения
		2) обеспечение минимальных затрат	$F(x) \rightarrow \min$; где $F(x)$ — функция показателей затрат на разработку
		3) выбор компромисса	$J(x) = f(x) - F(x)$, где $J(x)$ — функция показателей эффективности
3	Выбор группы критериев при решении многокритериальных задач	1) Анализ дополнительных критериев оценки эффективности работы сопряжения	Определяются и максимальное и минимальное значения функций $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$, точки перегибов, закон изменения, допустимые интервалы
		2) Устранение неопределенности цели, выбор способа действия (вектора параметров — x), максимальное значение функций $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$	$f_1(x) \rightarrow \max$; $f_2(x) \rightarrow \max$; $f_n(x) \rightarrow \max$
4	Использование способа линейной свертки	Приведение частных критериев n к общему критерию f_i	$F(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot f_i(x),$ где c_i — некоторые заданные положительные числа (результат экспертизы и компромисса при назначении критериев), например, $\sum_{i=1}^n c_i = 1$ при $i = 1, \dots, n$
5	Формирование динамического критерия качества применительно к силовой цепи судовой двигательной установки (СДУ) с учетом трибосопряжений с деталями из КПМ	Отыскание структуры и параметров n -мерной динамической модели силовой цепи СДУ	$K_{R,v} = [\xi(\Omega) - C(\Omega, P)] \leq \delta$; $C(\Omega, P) \in G; P \in G_p; \Omega \in R$, где $K_{R,v}$ — m -мерный векторный критерий близости вектор функции $\xi(\Omega)$ и $C(\Omega, P)$; m — характеристика технически реализуемой динамической системы; P — вектор варьируемых параметров синтезируемой системы; δ — допустимая точность моделирования (установленный нормативный вектор близости функций $\xi(\Omega)$ и $C(\Omega, P)$); G — класс, уровень вектор-функции, удовлетворяющий условиям физической реализации процесса; G_p — допустимая область в пространстве варьируемых параметров
6	Формирование целевой функции	Анализ структуры, выбор звеньев и степени сложности силовой цепи СДУ	Обеспечивается минимум целевой функции при ограничениях: число Z динамических звеньев синтезируемой силовой цепи является минимально возможным $K_{R,v}[\xi(\Omega) - C(\Omega, P)] \leq \delta; C(\Omega, P) \in G; P \in G_p; Z = \min$

На практике при моделировании трибосопряжений и решении задач динамического синтеза все проблемы оптимальности сводятся к решению задачи скаляризации вектора эффективности, т. е. вектора $K_{R,v}$. Причем проектировщику приходится выбирать некую схему компромисса, удовлетворяющую основным заданным критериям всех входящих компонент вектора эффективности [4], [8].

Задачу пассивного управления трибосопряжениями с КПМ можно также решать приближенно, с некоторой степенью достоверности результата, используя только динамические модели

процесса трения [4], [6], [8], используя в отдельных случаях не оптимальные критерии, а критерии, удаленные на некоторое расстояние от оптимального. Причем погрешность может вполне удовлетворять инженерному расчету. Тогда используют *квазиоптимальные* модели, а системы трения — как *рациональные* для данного конкретного инженерного решения. Одним из наиболее перспективных подходов решения задач управления трибосопряжениями, содержащими элементы КПМ, является метод *программной модификации*, разработанный в [6], [7].

Заключение

Применительно к сложным трибосистемам, содержащим в своем составе КПМ, метод квазиоптимального моделирования может заключаться в рассмотрении совокупности критериев (параметров или показателей), определяющих наилучшее состояние трибосистемы (например, максимальной надежности или эффективности пары трения, содержащей КПМ). При более детальном рассмотрении критериев производится количественная оценка основных статических и динамических свойств системы с учетом возможной локальной модификации отдельных характеристик или обобщенного параметра качества состояния поверхностного слоя деталей, выполненных из КПМ в целом [6], [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белецкий Е. Н.* Обеспечение заданной точности и качества поверхности на операциях сверления антифрикционных углепластиков на основе результатов моделирования процесса резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Е. Н. Белецкий. — Саратов: СГТУ, 2010. — 134 с.
2. *Белецкий Е. Н.* Изменение физико-механических показателей композиционного углепластика разной структуры при его разрушении резанием / Е. Н. Белецкий, С. Н. Безпальчук, О. А. Иванов, В. М. Петров // *Инструмент и технологии.* — 2007. — № 26–27. — С. 87–91.
3. *Белецкий Е. Н.* Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условий эксплуатации / Е. Н. Белецкий, В. М. Петров, С. Н. Безпальчук // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
4. *Денисов А. А.* Теория больших систем управления / А. А. Денисов, Д. Н. Колесников. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 288 с.
5. *Брайсон А.* Прикладная теория оптимального управления: пер. с англ. / А. Брайсон, Ю-ши Хо. — М.: Мир, 1972. — 544 с.
6. *Петров В. М.* Управление процессами контактного взаимодействия элементов трибосопряжения машин и технологических систем путем применения активных сред: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / В. М. Петров. — СПб.: ПИМАШ, 2004. — 335 с.
7. *Васильков Д. В.* Теория и практика оптимизационного проектирования механической обработки маложестких заготовок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Д. В. Васильков. — СПб.: ГТУ, 1997. — 426 с.
8. *Борисов В. И.* Проблемы векторной оптимизации. В кн.: *Исследование операций. Методологические аспекты* / отв. ред.: А. А. Ляпунов. — М.: Наука, 1972. — С. 72–91.
9. *Петров В. М.* Оценка параметров шероховатости и микротвердости поверхностного слоя образцов после триботехнических испытаний с разными модификаторами трения / В. М. Петров, В. М. Федосов, С. Г. Чулкин [и др.] / *Международная научно-практическая конференция: «Качество поверхностного слоя деталей машин»*, 24 – 26 июня, 2003. — СПб.: ПИМАШ, 2003. — С. 130–137.
10. *Вейц В. Л.* Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания / В. Л. Вейц, А. Е. Кочура. — Л.: Машиностроение, 1976. — 384 с.

DIFFERENT LEVELS OF MODELING OF COMPLEX STRUCTURES MARINE POWER PLANTS, THE INDIVIDUAL ELEMENTS OF WHICH MADE OF COMPOSITE POLYMER MATERIALS

The article describes a new multilevel approach to the modeling of friction units ship dvigatel'no complex, separate elements of which are made from composite polymeric materials. Tribosystem in the modeling process is seen as complex, depending on a variety of criteria.

Presents various options for the management of complex tribosystems containing the elements of the composite materials. In particular, active management by providing extra energy, and passive due to the differential feedback system to external stimuli and changes in feedbacks.

A new integrated approach in modeling, which involves solving the optimization problem and the choice of the vector criterion of the performance of the system.

The obtained new dependences for dynamic quality criteria tribosystem or complex objective functions based on the method of linear convolution.

Keywords: composite materials, modeling of friction units, machining, boundary conditions, optimization criteria, the state vector, parameters of quality.

REFERENCES

1. Beleckij, E. N. Obespechenie zadannoj tochnosti i kachestva poverhnosti na operacijah sverlenija antifrikcionnyh ugleplastikov na osnove rezultatov modelirovanija processa rezanija: abstract of PhD diss. (Tech.). Saratov: SGTU, 2010.

2. Beleckij, E. N., S. N. Bezpал'chuk, O. A. Ivanov, and V. M. Petrov. "Izmenenie fiziko-mehaničeskikh pokazatelej kompozicionnogo ugleplastika raznoj struktury pri ego razrushenii rezaniem." *Instrument i tehnologii* 26–27 (2007): 87–91.

3. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpал'chuk. "The physical-mechanical characteristics of composite plastics influence on the processes of destruction at realization of technological process of machining and extreme conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 66–73.

4. Denisov, A. A., and D. N. Kolesnikov. *Teorija bolshih sistem upravlenija* / A. A. Denisov, — L.: Jenergoizdat, 1982.

5. Brajson, A., and Ju-shi Ho. *Prikladnaja teorija optimalnogo upravlenija*. M.: Mir, 1972.

6. Petrov, V. M. Upravlenie processami kontaktnogo vzaimodejstvija jelementov tribosoprja-zhenija mashin i tehnologičeskikh sistem putem primenenija aktivnyh sred: Dr. diss. (Tech.). SPb.: PIMASH, 2004.

7. Vasilkov, D. V. Teorija i praktika optimizacionnogo proektirovanija mehaničeskoj obrabotki malozhestkih zagotovok: Dr. diss. (Tech.). SPb.: GTU, 1997.

8. Borisov, V. I. "Problemy vektornoj optimizacii." *Issledovanie operacij: metodologičeskie aspekty*. M.: Nauka, 1972. 72–91.

9. Petrov, V. M., V. M. Fedosov, S. G. Chulkin, et al. "Ocenka parametrov sherohovatosti i mikrotverdosti poverhnostnogo sloja obrazcov posle tribotehničeskikh ispytanijs raznymi modifikatorami trenija." *Mezhdunarodnaja nauchno-praktičeskaja konferencija: "Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin", 24-26 ijunja, 2003*. SPb.: PIMASH, 2003: 130–137.

10. Vejc, V. L., and A. E. Kochura. *Dinamika mashinnyh agregatov s dvigateljami vnutrennego sgoranija*. L.: Mashinostroenie, 1976.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белецкий Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, главный технолог.
ОАО «Концерн «НПО» Аврора»
famalien@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Beleckij Evgenij Nikolaevich —
PhD, chief technologist.
Concern Avrora Scientific and Production Association JSC
famalien@mail.ru