УДК 621.89:621.431-729.3

А.В. Надежкин, В.Н. Даничкин
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ И ЭКОНОМИЧНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ СУДОВЫХ КРЕЙЦКОПФНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Разработана методология многокритериальной векторной оптимизации управления технической эксплуатацией цилиндропоршневой группы крейцкопфных судовых малооборотных дизелей путем отыскания эффективных решений на множестве Парето.

Ключевые слова: *судовые крейцкопфные дизели, техническая эксплуатация, изнашивание, цилиндровое масло, оптимизация.*

A.V. Nadezkin, V.N. Danichkin

CONTROL OF SAFE AND ECONOMIC TECHNICAL OPERATION TSILINDRO-PISTON GROUPS SHIP CROSSHEAD DIESEL ENGINES

The methodology of math criteria vector optimization operation by technical operation of cylinder-piston group ccrosshead ship low spied diesel engines by search of effective decisions on set of the Pareto is developed.

Key words: *ship ccrosshead diesel engines, technical operation, wear process, cylinder oil, optimization.*

При эксплуатации судовых крейцкопфных малооборотных дизелей (МОД) основные дефекты, отказы и эксплуатационные затраты приходятся на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [1]. Существующие в настоящее время схемы управления по состояниям основаны на вероятностно-статическом анализе надежности. Постановка задачи достижения оптимального управления строится на предположении, что возможно осуществить оптимальное с точки зрения экономичности и надежности в работе управление. Соответствующее подмножество состояний назовем «оптимальным к управлению».

Предпочтительным является решение задачи оптимизации технической эксплуатации СДВС методом многокритериальной оптимизации как для процесса технического обслуживания (ТО), так и для процесса минимизации затрат при технической эксплуатации.

В реальных задачах выбора наиболее предпочтительного решения, возникающих на практике, как правило, присутствуют несколько критериев оптимальности. Наиболее распространенная задача, которую решают в эксплуатации, – это поиск технических решений, которые бы минимизировали затраты на ТО, сменно-запасные части (СЗЧ) и ГСМ при одновременном увеличении ресурсных показателей СДВС за счет снижения скорости изнашивания основных деталей.

Задачи выбора некоторого решения из множества допустимых решений с учетом нескольких критериев оптимальности получили название многокритериальной задачи оптимизации, которая впервые была сформулирована итальянским экономистом В. Парето [2, 3].

Под многокритериальной задачей мы понимают не собственно вербальное описание задачи, а ее модель, а именно: «многокритериальная задача – математическая модель принятия оптимального решения по нескольким критериям. Эти критерии отражают оценки различных качеств ОД, по поводу которых принимается решение» [2, 3].

Формально многокритериальная задача как модель задается в виде

$$\begin{cases} F(x) \to \max \\ x \in D \end{cases}, \qquad (1)$$

где D – множество допустимых решений; $F(x)$ – векторная функция векторного аргумента x, которую можно представить как $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}$, где $f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)$ – скалярные функции векторного аргумента x, каждая их которых является математическим выражением одного критерия оптимальности. Так как в данной модели используется векторная целевая функция, ее зачастую называют задачей векторной оптимизации. Очевидно, что задача (1) не принадлежит классу задач математического программирования, так как модели этого класса задач содержат всегда только одну целевую функцию векторного аргумента, а здесь представлен их набор. Иначе задачу (1) можно переписать в виде

$$\begin{cases} f_1(x) \to \max \\ f_2(x) \to \max \\ f_k(x) \to \max \\ x \in D. \end{cases} \qquad (2)$$

Сущность поставленной задачи состоит в нахождении такого ее допустимого решения, т.е. $\{x \in D\}$, которое в том или ином смысле максимизирует (минимизирует) значения всех целевых функций $f_i(x)$, $i = 1, k$. Существование решения, буквально максимизирующего все целевые функции, является редким исключением.

Отсюда следует, что принципиальным моментом при решении такого рода задач является предварительная договоренность, а что считать самым предпочтительным решением, т.е. надо договориться об используемом принципе оптимальности. Используемый в задачах математического программирования принцип оптимальности – «хорошо то, что доставляет наибольшее (наименьшее) значение имеющемуся единственному критерию оптимальности» – в многокритериальных задачах очевидно «не работает».

Задача векторной оптимизации в общем случае не имеет строго математического решения. Для получения того или иного ее решения необходимо использовать дополнительную субъективную информацию специалиста в данной предметной области, которого принято называть *лицом, принимающим решение* (ЛПР), в английском языке – decision maker. Это означает, что при решении задачи специалистами с привлечением различных источников информации, скорей всего, будут получены различные ответы.

Задачи векторной оптимизации в настоящее время принято рассматривать в рамках теории принятия решений, основной особенностью задач которой является наличие неопределенности. Эта неопределенность не может быть исключена с помощью различных приемов моделирования и объективных расчетов. В многокритериальных задачах неопределенность состоит в том, что неизвестно, какому критерию отдать предпочтение и в какой степени. Для устранения этой неопределенности необходимо, во-первых, сформулировать специальный принцип оптимальности, а также привлечь дополнительную субъективную информацию ЛПР, основанную на его опыте и интуиции.

Рассмотрим общие подходы к решаемой задачи оптимизации технической эксплуатации СДВС по результатам трибомониторинга. Пусть решается задача (1) и есть $x', x'' \in D$ – допустимые решения данной задачи. Говорят, что x' – *более* предпочтительное решение по сравнению с x'', если $f_i(x') \geq f_i(x'')$ $\forall_i = 1,k$. Другими словами, будем считать, что решение x' более предпочтительно по сравнению с решением x'', если оно не хуже x'' по всем рассматриваемым критериям, причем среди всех критериев есть хотя бы один критерий с номером i_0, для которого решение x' лучше, чем x''.

Некоторое решение $x' \in D$ задачи (1) называется эффективным решением данной задачи, если для него не существует более предпочтительных решений. Иначе можно сказать, что эффективным решением называется такое решение x', которое нельзя улучшить по какому-либо из критериев, не ухудшив при этом значения других критериев.

Множество эффективных решений называется множеством Парето и обозначается $P(D)$. Очевидно, множество Парето является подмножеством множества допустимых решений, которое, в свою очередь, принадлежит n-мерному векторному пространству, т.е. $P(D) \subset D \subset E^n$.

Вектор значений критериев, вычисленных для эффективного решения $F(x')$, называется эффективной оценкой**.** Совокупность всех эффективных оценок, т.е. образ множества Парето в пространстве критериев, называется множеством эффективных оценок и, как правило, обозначается как $F(P)$. Множество эффективных оценок является подмножеством образа множества допустимых решений в пространстве критериев $F(D)$, которое, в свою очередь, является подмножеством k-мерного векторного пространства, т.е. $F(P) \subset F(D) \subset E^k$. Можно сказать, что множеству Парето P, принадлежащему множеству допустимых решений D, с помощью векторной функции F сопоставляется множество эффективных оценок $F(P)$.

Субоптимальное решение (по критерию $f_i(x)$ – оптимальное решение многокритериальной задачи, найденное по какому-либо одному критерию (i-му) без учета остальных критериев.

Принцип Парето: смысл введенного понятия эффективного решения состоит в том, что оптимальное решение следует искать только среди элементов множества Парето – множества $P(D)$. В противном случае всегда найдется точка x, оказывающаяся более предпочтительной независимо от расстановки приоритетов и относительно важности отдельных частных критериев.

Принцип Парето позволяет сузить класс возможных претендентов на окончательное решение и исключить из рассмотрения заведомо не способные на конкуренцию варианты. А окончательный выбор осуществляется на основе дополнительной информации о предпочтении лица, принимающего решения.

Таким образом, эффективное управление технической эксплуатацией деталей ЦПГ крейцкопфных МОД, представленной в целенаправленном виде, будет отображено двумя взаимоисключающими критериями: снижением затрат на цилиндровое масло $f_Э$ и минимизацией скорости изнашивания деталей ЦПГ $f_И$ и, как следствие, уменьшением эксплуатационных расходов на СЗЧ, ТО.

Функции $f_Э$, $f_И$ – неотрицательные, выпуклые, монотонно возрастающие функции, которые могут быть аппроксимированы уравнениями любого вида, в том числе и на отдельных участках.

Данные технической эксплуатации деталей ЦПГ крейцкопфных МОД, представленные ведущим дизелестроительным концерном MAN Diesel [4] (рис. 1, 2), дают возможность осуществить Парето-оптимальное управление на практике. Аналогичные результаты можно получить и в условиях рядовой эксплуатации конкретной судоходной компании.

Из представленных результатов следует, минимум функции $f_Э$ достигается там, где величина скорости изнашивания достаточно высокая, и наоборот. Кроме того, здесь очевидна только взаимосвязь между скоростью изнашивания и затратами на СЗЧ и ТО. Это дают возможность провести конструирование пространства состояний ОД.

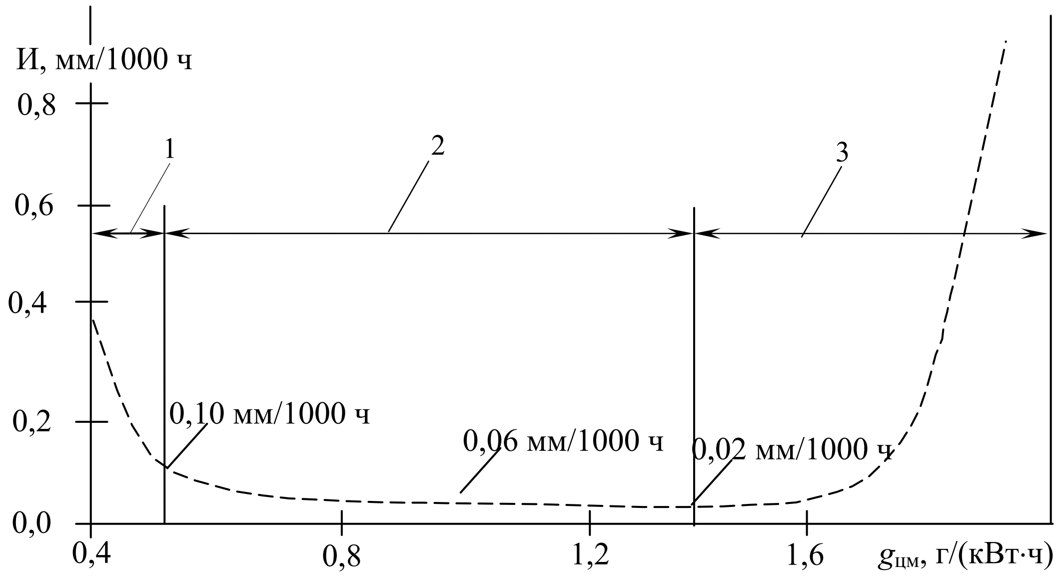

Рис. 1. Износ цилиндровой втулки: 1 – высокий износ из-за масляного голодания; 2 – нормальный износ; 3 – высокий износ из-за полировки зеркала цилиндровой втулки
Fig. 1. Average cylinder wears versus lube oil dosage

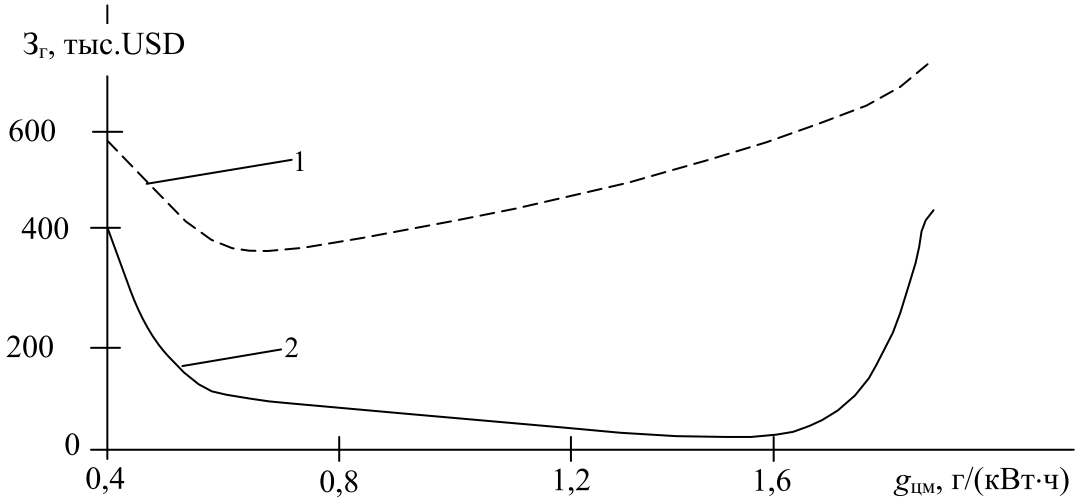

Рис. 2. Эксплуатационные затраты на детали ЦПГ крейцкопфных МОД
Fig. 2. Annual (6.500 hours) running costs of a low speed crosshead diesel engine

Из изложенного следует, что одновременная минимизация критериев $f_Э$, $f_И$ невозможна, так как при этом возникают взаимоисключающие требования. Из чего следует, что задача ресурсосберегающего экономически эффективного управления технической эксплуатацией деталей ЦПГ крейцкопфных МОД классифицируется как задача многокритериальной векторной оптимизации. Для её решения необходимо формализовать целевые функции.

Обработка данных технической эксплуатации деталей ЦПГ крейцкопфных МОД (см. рис. 1, 2) позволила получить целевые функция $f_И$(И) $f_Э(g_e^{ЦМ})$ в виде линейных уравнений:

$$f_И(И) = 101{,}06И + 0{,}0947; \quad f_Э(g_e^{ЦМ}) = 355{,}52\,g_e^{ЦМ} + 6{,}9137, \tag{3}$$

где И – скорость изнашивания ЦВ в верхнем поясе, мм/1000 ч, а $g_e^{ЦМ}$ – удельный эффективный расход цилиндрового масла, г/(кВт·ч). Квадраты коэффициентов множественной корреляции R^2 составили соответственно 0,988 и 0,9989, что свидетельствует о высоком уровне достоверности полученных математических зависимостей.

Дополнительно следует также установить взаимосвязь между величинами И и $g_e^{ЦМ}$. Она описывается полиномом шестой степени следующего вида:

$$И = 0{,}5671\,g_e^{ЦМ}\text{^}6 - 3{,}96\,g_e^{ЦМ}\text{^}5 + 11{,}755\,g_e^{ЦМ}\text{^}4 - 19{,}049\,g_e^{ЦМ}\text{^}3 + 17{,}721\,g_e^{ЦМ}\text{^}2 - 8{,}9448\,g_e^{ЦМ} + 1{,}9639. \tag{4}$$

Квадрат коэффициента множественной корреляции $R^2 = 0{,}9944$, что свидетельствует о хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, формализация задачи многокритериальной векторной оптимизации управления технической эксплуатацией деталей ЦПГ крейцкопфных МОД может быть записана в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} & f_{Э1}(И) \Rightarrow \min; \\ & f_{Э2}(g_e^{ЦМ}) \Rightarrow \min; \\ & И = F(g_e^{ЦМ}); \\ & 0{,}02 < И < 0{,}12; \\ & 0{,}4 < g_e^{ЦМ} < 0{,}18. \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Записанная задача векторной оптимизации имеет равнозначные критерии, так как отсутствует приоритет в каком-либо критерии. Методы решения таких задач основаны на нормализации критериев и принципе гарантированного результата [2, 3].

Нормализация критериев предполагает сведение их к безразмерному виду с помощью специального преобразования. Это преобразование должно удовлетворять, по крайней мере, следующим условиям:

- иметь общее начало отсчета и один порядок изменения значений на всем множестве допустимых решений;

- быть монотонным преобразованием, так как должно сохранять отношение предпочтения на множестве D, т.е. не менять множество Парето;

- учитывать необходимость минимизации отклонения от оптимальных значений по каждой целевой функции.

Для получения такого рода нормализованных критериев $\omega_i(x)$ в качестве таких преобразований $W_i(f_i(x))$ используют следующие:

$$W_i(f_i(x)) = \omega_i(x) = \begin{cases} \left[\dfrac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right]^{\mu} \in [0,1] \\ \left[\dfrac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max}}\right]^{\mu} \in [0,1] \end{cases},$$

где μ = 1,2, как правило, полагают μ = 1; $f_i^{\max}$, $f_i^{\min}$ – наибольшее и наименьшее значения i-го критерия (наибольшая и наименьшая эффективная оценка) соответственно. Причем $\omega_i(x) \to \min$, т.е. минимизируется разность между искомым решением и субоптимальным.

Выполним указанную нормализацию для наших критериев (5):

$$W(f_{Э1}(И)) = \omega(И) = 120946{,}9 - (101{,}06И + 0{,}0947) / \\ / (120946{,}9 - 20000) = 1{,}2 - 10{,}05343И. \tag{6}$$

$$W(f_{Э2}(g_e^{ЦМ})) = \omega(g_e^{ЦМ}) = 683815{,}1 - (355{,}52\, g_e^{ЦМ} + 6{,}9137) / \\ / (683815{,}1 - 176139{,}1) = 1{,}285714 - 0{,}714286 * g_e^{ЦМ}. \tag{7}$$

Выполненные расчеты критериев в наилучшей и наихудшей точках дают после нормализации значения, равные соответственно 1 и 0. Таким образом, мы получили приведенную область множества допустимых решений задачи управления технической эксплуатацией деталей ЦПГ крейцкопфных МОД.

Естественно, следует считать наилучшим такое решение, при котором величина отклонений от оптимальных значений по каждой целевой функции $\Delta f_i(x) = f_i^{\max} - f_i(x)$ $\forall_i = 1, k$ достигает своего минимального значения, т.е. для преобразованных функций – такое решение, при котором $\omega_i \Rightarrow \max$. Но наименьшие значения величин $\Delta f_i(x)$ или наибольшие ω_i, как правило, не достигаются одновременно ни для какого решения из D (т.е. нельзя подобрать $x \in D$, чтобы $f_i \to \min$ или $\omega_i \Rightarrow \max$ $\forall_i = 1, k$).

Поэтому нужны какие-то дополнительные процедуры для отыскания какого-то единственного представителя из множества Парето. Существуют различные способы решения подобных задач: метод ограничений, уступок, свертывания пространства и т.д. Специфика решения таких задач состоит в том, что сам выбор такой процедуры метода нахождения окончательного решения во многом основан на предположениях ЛПР, т.е. на субъективной информации. Поскольку, как отмечалось ранее, в исходной постановке задачи у нас отсутствует приоритет на какой-либо из двух критериев, то в такой ситуации эффективным и продуктивным являетсся метод решения, предложенный профессором Ю.К. Машуниным в работе [3], дающий гарантированный результат задачи многокритериальной векторной оптимизации.

Суть метода заключается в отыскании такого эффективного решения, для которого взвешенные относительные потери (потери в смысле разности возможного наилучшего значения целевой функции и значения этой функции для данного – компромиссного решения) минимальны и равны между собой.

Введем далее для всей области определения параметров функцию

$$\lambda_k(x) = \min(\omega_k(x))\big|_{k=1,2}, \tag{8}$$

которую максимизируем по $x \in D$, в результате получим максиминную задачу с нормализованными критериями:

$$\lambda^0 = \max_{x \in D} \min_{k \in D} \lambda_k(x). \tag{9}$$

Записанная выше задача (9) в соответствии с разработанным в [3] алгоритмом преобразуется в λ-задачу вида:

$$\lambda^{o} = \max\lambda. \tag{10}$$

λ-задача – это стандартная задача выпуклого программирования, и для ее решения используются стандартные алгоритмы оптимизации.

В результате решения λ-задачи получаем точку оптимума $g_e^{\text{ЦМ}}$ = 0.908599 г/(кВт·ч). Она является максимальным нижним уровнем для всех относительных оценок $\lambda_k(x^{o})$ = 0.636715, гарантированным результатом, и в соответствии с [3] полученное значение оптимально по Парето.

Техническая политика в каждой конкретной судоходной компании определяется её управляющим органом – ЛПР. При этом может быть сделан акцент на задачу максимальной экономии средств на техническую эксплуатацию СЭУ, либо, наоборот, во главу угла будет поставлено требование обеспечения максимальной надежности в работе СДВС, т.е. минимизация скорости изнашивания. Рассмотрим вопрос, как в этом случае на множестве Парето распределятся оптимальные решения для судоходной компании. Для этой цели воспользуемся методологией метода ограничений [2].

Метод ограничений предназначен для отыскания так называемого компромиссного решения путем введения весовых коэффициентов для каждого из критериев. Весовые коэффициенты выбираются ЛПР в зависимости от того, какие стратегические цели преследует судоходная компания при технической эксплуатации СЭУ.

Метод ограничений основан на теореме**:** если x^0 – эффективное решение для данного вектора предпочтений ρ, то ему соответствует наименьшее значение δ, при котором система равенств

$$\rho_i\omega_i(x_0) = \delta \text{ выполняется для всех } i = 1,k. \tag{11}$$

При этом под вектором предпочтений ρ = {ρ} понимается некоторый вектор весовых коэффициентов. Как правило, на него накладываются ограничения $\rho_i \geq 0, \Sigma\rho_i = 1$. С помощью весовых коэффициентов задаются определенные ЛПР предпочтения целевых критериев друг перед другом, выраженные в количественной шкале.

Тогда в качестве решения задачи можно принять компромиссное решение с заданным вектором предпочтений. Очевидно, что компромиссное решение – это такое эффективное решение x^0, которое обеспечивает одинаковые минимальные значения параметра ρ, при котором система (5) совместна.

Таким образом, компромиссное решение может быть найдено как единственное решение системы неравенств вида

$$\omega_i\left(x_0\right) \leq \delta \quad \forall_i = 1,k$$

для минимального значения параметра δ, при котором эта система совместна.

Как уже говорилось, метод отыскания эффективного решения, основанный на этом положении, называется методом ограничений**.** Этот метод предполагает необходимость решения вспомогательной минимаксной задачи:

$$\begin{cases} \max\limits_{j} \rho_i \omega_i (x) \to \min, \\ x \in D. \end{cases} \qquad (12)$$

Рассмотрим решение сформулированной выше задачи (12) для различных комбинаций весовых коэффициентов в векторе предпочтений. Подобная задача является задачей нелинейного программирования, для которой разработано большое количество численных методов. Наиболее эффективно подобного рода задачи решаются в программном комплексе МАТЕМАТЕСА. В таблице сведены в месте все варианты рассматриваемой задачи оптимизации технической эксплуатации деталей ЦПГ крейцкопфных МОД:

Значения весовых коэффициентов, %		Удельный эффективный расход ЦМ, г/(кВт·ч)	Значение оптимального по Парето критерия	Расходы на ЦМ, тыс. USD	Расходы на СЗЧ И ТО, тыс. USD	Скорость изнашивания, мм/1000 ч
Расходы на ЦМ	Затраты на СЗЧ и ТО					
80	20	0,647	0,722	243,1	88,1	0,089
50	50	0,824	0,645	308	73,3	0,0694
20	80	1,606	0,815	580,1	19,6	0,02
Равнозначные критерии		0,909	0,637	337,8	65,5	0,062

Полученные результаты необходимы ЛПР для принятия грамотных научно обоснованных решений при планировании деятельности судоходной компании.

Список литературы

1. Щукин Г.С., Кучеров В.Н. Эксплуатация цилиндропоршневой группы судовых дизелей. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. – 60 с.

2. Машунин Ю.К., Левицкий В.Л. Методы векторной оптимизации в анализе и синтезе технических систем. – Владивосток: ДВГАЭУ, 1996. – 131 с.

3. Машунин Ю.К. Информационные технологии моделирования технических систем на базе методов векторной оптимизации // Информационные технологии. – 2001. – № 9. – С. 123-141.

4. Innovative piston rings promise improved cylinder running conditions. – Marine Propulsion & auxiliary machinery. – Vol. 20. – Issue 2. – 2007. – 65 p.

Сведения об авторах: Надежкин Андрей Вениаминович, кандидат технических наук, доцент, e-mail: nadezkin@mail.ru;

Даничкин Виталий Николаевич, старший преподаватель, e-mail: nadezkin@mail.ru.