УДК 629.1

© А. И. Беляев, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: aibelyaev@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-135-141

© A. I. Belyaev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: aibelyaev@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЫБОР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

TECHNOLOGICAL COEFFICIENTS OF ISOTROPY OF ROAD-BUILDING MACHINERY PART SURFACE PROPERTIES AND THEIR INFLUENCE ON SELECTING OF THE RESTORATION SEQUENCE

Проанализированы критерии качества деталей дорожно-строительных машин с точки зрения эффективности их по качеству поверхности. Установлены взаимосвязи между критериями качества и функциональностью детали. Для разрабатываемой модели выбора оптимальной технологии восстановления деталей дорожно-строительных машин предложены новые параметры в виде коэффициентов изотропии, описывающие шероховатость, твердость и наклеп детали.

Ключевые слова: дорожно-строительная машина, коэффициент изотропии твердости, коэффициент технологической изотропии шероховатости, коэффициент интенсивности твердости.

The article analyzes the quality criteria of road building machinery parts from the point of view of their efficiency in the surface quality. There have been established relationships between the quality criteria and the functionality of the part. Some new parameters are proposed in the form of isotropy coefficients describing the roughness, hardness, and cold deformation. The purpose of introducing these coefficients is consistent with the developed model for selecting the optimal technology for restoration of road construction machinery parts.

Keywords: road building machine, isotropy coefficient of hardness, technological isotropy coefficient of roughness, cold deformation coefficient.

Исследования и опыт эксплуатации дорожно-строительных машин (ДСМ) показали очень важное влияние **параметров состояния поверхностного слоя (ПСПС)** на надежность, долговечность и безопасность эксплуатации деталей и, соответственно, машины в целом. Связано это в первую очередь с увеличением нагрузок, скоростей, температур, агрессивности сред и других факторов эксплуатации ДСМ, список которых исчисляется десятками. Исследования работоспособности ДСМ, а точнее, их реального ресурса, говорят, что даже качественное, но формальное исполнение технологии инженерно-техническими работниками: точности, шероховатости и твердости поверхности, заданной на чертежах, не гарантирует надежной и долговечной работы детали или соединения. Необходимо глубокое понимание физических явлений,

происходящих в процессе обработки, и умение путем проектирования оптимальных маршрутных и операционных технологических процессов обеспечивать **требуемые эксплуатационные показатели изделия**, что и определяет повышенные требования к современным методам восстановления деталей ДСМ.

По исследованиям, до 85 % ДСМ выходит из строя из-за износа деталей. Расходы на ремонт и восстановление ДСМ сопоставимы с затратами на изготовление новых изделий и зачастую превышают их, а трудоемкость ремонта, восстановления и обслуживания строительных и дорожных машин в период их жизненного цикла превышает трудоемкость их изготовления примерно в 10–15 раз, что привело к тому, что в этой сфере деятельности в России задействовано несколько миллионов человек. Кроме того, из-за износа

ДСМ теряют порядка 40 % своего моторесурса, что снижает их жизненный цикл от проектного.

Правильное использование возможностей технологии при формировании твердости поверхности деталей ДСМ позволяет экономически целесообразно «управлять» процессом ремонта и восстановления. Например, создание более «мягкой», но легко заменяемой и более дешевой детали в паре трения позволяет сохранить более дорогую деталь. Классическим примером такого подхода являются детали цилиндро-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания: комплект поршневых колец — втулка блока цилиндров.

Напряжения первого рода в поверхности детали ДСМ, независимо от величины и знака, в период приработки поверхностей трения релаксируют под действием эксплуатационных нагрузок и температур, и дальнейшая работа пары трения формирует на контактирующих поверхностях остаточные напряжения сжатия, величина которых зависит от действующих нагрузок, температур и напряжений текучести материалов и не зависит от технологических напряжений.

Следует отметить, что влияние ПСПС на сопротивление усталости деталей ДСМ существенно отличается от влияния этих параметров на износостойкость, что связано с тем, что высотные параметры шероховатости не влияют на сопротивление усталости, в отличие от другого параметра — радиуса впадины микрорельефа. Объясняется это тем, что при знакопеременных нагрузках именно впадина является концентратором напряжений, и уровень концентрации напряжений зависит от радиуса впадины. Чем меньше этот радиус, тем больше концентратор, а возможность зарождения усталостной трещины выше. Шаговый параметр шероховатости имеет влияние на стойкость детали ДСМ в условиях циклического нагружения. Благоприятнее для поверхности детали, в этом случае, микрорельеф с большим (свыше 10) соотношением шагов неровностей к их высоте, что обеспечивается методами финишной обработки поверхностей и дает повышенное сопротивление усталости. Усталостная прочность деталей зависит от глубины и степени наклепа поверхностного слоя, например предел выносливости образцов из конструкционной стали (со степенью наклепа 115–120 %) по-

вышается на 15–20 %, при этом, если полировать поверхность, — то на 20–25 %. Зарождение усталостной трещины происходит не на поверхности детали, а в ее глубине. Если у детали есть более твердый поверхностный слой, то требуются существенные действующие напряжения при обработке детали для перерастания макротрещины в макротрещину, приводящую к разрушению детали в наиболее нагруженном сечении. Полирование такой поверхности практически исключает наличие концентраторов напряжений из-за больших радиусов впадин микронеровностей, характерных для полированных поверхностей. С другой стороны, слишком большой наклеп поверхности, измеряемый степенью наклепа, может дать отрицательный результат. Например, в поверхности деталей после поверхностного пластического деформирования (накатывание или алмазное выглаживание) со степенью наклепа 160–180 % предел выносливости может быть меньше, чем после рядовой механической обработки. Это объясняется наличием очень мелкого зерна в поверхностном слое и высокой плотностью дислокаций, близкой к критическим значениям. Это значит, что металл не имеет резервов по пластичности и может перейти в хрупкое разрушение. Ранее этот эффект называли перенаклепом. Технолог должен тщательно анализировать выбор упрочняющих методов обработки.

Влияние технологических остаточных напряжений на предел выносливости конструкционных материалов хорошо исследовано: для сталей повышенной твердости увеличение предела усталости образцов с поверхностными сжимающими напряжениями достигает 50 %, а снижение под действием растягивающих — на 30 %.

Рассмотрим **долговечность** машины (свойство машины иметь одну и ту же работоспособность некоторое время) с точки зрения свойств детали. При известных условиях эксплуатации можно определить работоспособность [1]. А в условиях трения, где износ является следствием работы сил трения, долговечность определяется сопротивлением изнашиванию, что характеризуется износостойкостью.

Постепенное развитие износа приводит к снижению показателей дорожно-строительных и горных машин (ДСГМ) в целом: уменьшению точности выполнения операций, снижению

КПД, повышению потребления энергоносителей и снижению полезной отдачи [1]. Важным при уменьшении износа является микрорельеф поверхности и правильные смазочные материалы. Износостойкость детали определяется ее материалом, прочностными свойствами поверхности, микрорельефом, зависящим от способа получения, а также свойствами сопрягаемой детали. Поэтому существуют способы изменения износостойкости воздействием на поверхность детали, в том числе нанесением специальных покрытий. Другое направление заключается в улучшении антифрикционных свойств поверхностей, что может охарактеризовать смазочные качества поверхности. Из-за износа поверхностей трения в 80 % происходит потеря характеристик работоспособности деталей ДСГМ.

Таким образом, долговечность ДСГМ в первую очередь проявляется в виде функции конкретной детали — изнашиваемости. *Здесь устанавливается связь между износостойкостью и долговечностью.*

Рассмотрим **надежность** (свойство детали, сохраняя свои характеристики, выполнять заданные функции) ДСМ с точки зрения непосредственно свойств детали [1]. Надежность определяется безотказностью детали, ее долговечностью, а главное — сохраняемостью. Надежность — это свойство машины, следовательно, конкретная деталь обеспечивает надежность ДСГМ в целом. При этом основной фактор, определяющий надежность машины, — это износ трущихся поверхностей деталей.

Прочность детали при современных технологиях может быть достаточно большой. Значит, в ненагруженных машинах можно совершенно устранить поломки, чего нельзя сказать о нагруженных машинах вроде горных или дорожно-строительных. Можно сделать вывод об очевидности связи между долговечностью и сохраняемостью машины в целом. *Здесь устанавливается связь сохраняемости и надежности.*

Рассмотрим **безопасность эксплуатации** ДСГМ с точки зрения свойств детали.

В жизненном цикле машины деталь не только изнашивается, но подвергается разрушениям и повреждениям разной природы: механическим, электрохимическим и другим. Механические разрушения проявляются в виде трещин, дефор-

маций или поломок. Трещины проходят стадии микродефекта, макродефекта и микротрещины и возникают при длительных нагрузках [1].

Безопасность машины — это эксплуатационное свойство, которое исключает или максимально снижает последствия аварий или близких к ним ситуаций на всем жизненном цикле машины. Если показатели безопасности не соответствуют требованиям, это может привести к катастрофическим последствиям, проявляющимся в области жизни, здоровья людей, экологии и экономических факторах, и в конечном итоге сводит эффективность работы машины к минимуму. *Здесь устанавливается связь между ломкостью детали и безопасностью машины [1].*

Для решения задачи разработки методов повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации машин и исходя из общего представления о типовом технологическом процессе (ТТП) восстановления детали ДСГМ была разработана многокритериальная динамическая модель выбора наилучшего варианта технологического процесса восстановления детали в зависимости от расставленных заранее приоритетов.

При разработке многокритериальной динамической модели выбора наилучшего варианта технологического процесса восстановления детали основные трудности связаны с определением критериев непосредственного качества по операциям технологического процесса. В качестве критериев, определяющих качество ДСГМ в целом, были выбраны наиболее значимые с точки зрения достижения целей восстановления — долговечность, надежность и безопасность эксплуатации, в том числе: шероховатость поверхности детали, твердость и глубина твердости.

У поверхностного слоя детали есть важные характеристики: шероховатость, твердость (в виде наклепа или термической обработки) и, как результат, остаточные напряжения. Они оказывают влияние на эксплуатационные свойства деталей ДСГМ, к которым относятся износостойкость, статическая, длительная и усталостная прочность, коррозионная стойкость, прочность соединений с натягом.

Шероховатость. Шероховатость — очень важный и многообразный критерий качества. На эксплуатацию ДСГМ через шероховатость

влияют износостойкость (приработка, маслоемкость), стабильность посадок деталей, коррозионная стойкость, усталостная прочность, адгезионность к покрытиям [1]. Качественные характеристики поверхности детали определяют ее эксплуатационные свойства и свойства, связанные с технологией восстановления. На эти качественные характеристики влияют как физико-механические свойства материала детали, так и способы формирования в виде конкретных способов обработки, как, например, механическая обработка, поверхностное пластическое деформирование и термическая обработка. В случае многих способов формообразования поверхности детали поверхностный слой не только деформируется, но и насыщается нежелательными химическими элементами.

Поскольку процесс формообразования поверхности имеет многофакторное влияние, но описать это необходимо наиболее обобщающим показателем, возникла необходимость описать изменение шероховатости в процессе совершения технологической операции. Эта неоднозначность, сложность и многообразие взаимосвязей приводят к необходимости введения нового параметра, описывающего шероховатость.

Предложен новый параметр под названием **коэффициент технологической изотропии шероховатости** формоизменения поверхности детали $K_{\text{тиш}}$.

Чтобы определить сущность этого коэффициента, введем обозначение: шероховатость поверхности детали RT (от англ. слова roughness). Следовательно, коэффициент технологической изотропии шероховатости $K_{\text{тиш}}$ определяется отношением шероховатости до технологической операции к значению шероховатости после операции:

$$K_{\text{тиш}} = \frac{RT_{\text{перед}}}{RT_{\text{после}}},$$

где $RT_{\text{перед}}$ — параметр шероховатости перед операцией; $RT_{\text{после}}$ — параметр шероховатости после операции.

Параметр RT может быть любым, в зависимости от необходимости, определяемой технологом-разработчиком технологического процесса, и в соответствии с ГОСТ 2.309–73 ЕСКД.

Анализ показывает, что $K_{\text{тиш}} = 1$ для технологических операций, при выполнении которых шероховатость не претерпела изменений. К числу таких операций можно отнести операции, в которых ни размеры, ни свойства поверхности детали не меняются. Если используются технологические операции, при выполнении которых параметр RT растет, то коэффициент технологической изотропии шероховатости будет меньше единицы: $K_{\text{тиш}} < 1$. В этом случае изменение параметра RT может быть целью, например при разных операциях лезвийной обработки, или может быть сопутствующим явлением, как при термической обработке или при наплавке. Технологическая операция может давать коэффициент $K_{\text{тиш}} > 1$, что означает уменьшение параметров шероховатости в процессе операции.

Предлагаемый коэффициент может быть использован в различных исследованиях технологических процессов, в зависимости от целей исследователя, для отдельной операции, или части техпроцесса, или для всего технологического процесса.

Твердость. В процессе изготовления или восстановления детали ДСМ хорошо контролируемым параметром считается твердость детали, как поверхности, так и глубинных слоев. Твердость характеризует многие важные критерии качества детали. Высокая твердость главным образом дает высокую износостойкость поверхности детали, но может, в связи с хрупкостью, снизить долговечность детали и машины в целом.

Для более целостного описания влияния твердости детали на эксплуатационные характеристики используем новый **коэффициент изотропии твердости** детали и обозначим его $K_{\text{итд}}$.

Общепринято обозначение твердости буквой H (от англ. слова hardness). Коэффициент изотропии твердости $K_{\text{итд}}$ определим, как отношение твердости поверхности детали $H_{\text{пов}}$ к твердости срединных слоев детали (сердцевины) $H_{\text{сред}}$:

$$K_{\text{итд}} = \frac{H_{\text{пов}}}{H_{\text{сред}}}.$$

$K_{\text{итд}}$ будет равен 1 в том случае, если деталь имеет одинаковую твердость в любом единичном объеме тела детали, например в деталях без термообработки или при объемной закалке. $K_{\text{итд}}$ будет больше 1 для технологий поверхностной закалки или для технологий, следствием кото-

рых является поверхностная пластическая деформация (лезвийная обработка, или ППД). $K_{ИТД}$ меньше 1 в подавляющем большинстве случаев не имеет смысла, поскольку добиваться повышенной твердости сердцевины детали, оставляя «мягкой» поверхность, нецелесообразно и не дает преимуществ детали с точки зрения эксплуатационных свойств.

Глубина твердости (наклеп). В какой-то степени глубина твердости является производной от понятия твердости, однако физическая сущность применения этого понятия несколько иная. Прежде всего следует отметить, что глубина твердости может измеряться совсем незначительными относительно размеров самой детали величинами. Изменение твердости поверхности детали может осуществляться: термической обработкой, химико-термической обработкой, различными методами и приемами поверхностного пластического деформирования, лезвийной механической обработкой и различными сочетаниями всех названных видов обработки. Эксплуатационные свойства детали ДСМ определяются твердостью детали на самой поверхности детали, и при этом остальная деталь во многих случаях не должна быть твердой. Регулирование этих свойств возможно только через управление глубиной твердости непосредственно. Например, может быть важна устойчивость детали против поломки, при условии вязкой сердцевины детали и сравнительно высокой твердости поверхности.

Термические и химико-термические методы обработки, ППД применяют для повышения твердости поверхности детали. При видах обработки, где процесс упрочнения поверхности происходит как сопутствующий (например лезвийная обработка), он менее управляем, но достаточно предсказуем.

В частности, результатом пластического деформирования поверхности детали при лезвийной обработке или при ППД без целенаправленного термического воздействия может быть явление под названием «наклеп». С точки зрения свойств детали наклеп влияет на сопротивление деформации, пластичность и твердость. Во время лезвийной обработки в зоне деформации присутствуют силы резания порядка 200–300 кгс/мм², которые и формируют наклеп. Аналогичный эффект получают методами ППД.

При ППД глубина наклепа составляет обычно $0,02R \leq a \leq 0,1R$, где R — радиус поперечного сечения упрочняемой детали [1].

При рассмотрении твердости поверхности детали ДСМ возникает вопрос — как оценить данную величину в безразмерных величинах. Можно ввести **коэффициент интенсивности твердости** для детали $K_{ИТ}$

Обозначим его через I — интенсивность, от английского intensity. Соответственно, интенсивность твердости — $ИТ$. Это сравнение комплексного параметра, в котором есть изменение твердости по глубине детали и величина глубины твердости (наклепа):

$$K_{ИТ} = ИТ \cdot h_n (\text{мкм});$$

$$ИТ = K_{ИТД} = \frac{H_{\text{пов}}}{H_{\text{сред}}}$$

или

$$ИТ = \frac{HV_{\text{пов}}}{HV_{\text{сред}}}$$

Для определения интенсивности наклепа относим максимальную микротвердость наклепанного слоя к микротвердости ненаклепанного металла (в процентах). Для твердости это $K_{ИТД} = H_{\text{пов}} / H_{\text{сред}}$.

Повышение интенсивности наклепа увеличивает сопротивление усталостному разрушению. Но можно использовать само значение глубины твердости или наклепа в абсолютных значениях.

Проведя анализ различных показателей глубины твердости или наклепа, пришли к выводу, что оценивать глубину твердого слоя при термической или химико-термической обработке, при лезвийной обработке или при ППД предпочтительнее в миллиметрах.

В целом, предложенные показатели: коэффициент технологической изотропии шероховатости, коэффициент изотропии твердости и коэффициент интенсивности твердости, можно обобщенно назвать интегральными показателями качества. Для примера применения предложенных интегральных показателей качества по операциям приведем таблицу [1].

Описанные выше и предложенные к рассмотрению интегральные показатели качества применяются в процессе расчета и моделирования технологического процесса восстановления детали ДСМ с точки зрения оптимизации процесса по критерию наилучшего качества. Получение

Значения коэффициентов качества

Название операции	$K_{\text{тиш}}$	$K_{\text{итд}}$	$K_{\text{ит}}$ (мм)
Наплавка восстанавливаемых цилиндрических поверхностей	0,15–0,75	2–4	0,8–4,0
Термообработка (нормализация)	0,15–0,3	1,3–1,4	Как в предшествующей операции
Лезвийная обработка (точение)	4–80	1,1–1,2	0,2–0,4
Термообработка (закалка ТВЧ)	0,15–0,3	2–4	1,8–2,2
Лезвийная обработка (шлифование)	4–80	1,1–1,2	0,2–0,4
Дробеметная обработка (ППД)	0,1–0,5	1,5–2	0,2–0,4

наилучшей эффективности в процессе разработки (проектирования) технологического процесса восстановления функционально важных деталей ДСМ по необходимым критериям, в частности по долговечности, надежности и безопасности, становится возможным при использовании метода районирования с применением важного положения о соотношении вероятностей различных состояний области исследования в процессе решения задачи динамического программирования [2–12]. Само по себе применение формализованных критериев качества дает существенные преимущества при применении численных и программных методов вычисления.

Выводы

Введенные в данной работе принципиально новые показатели качества: коэффициент технологической изотропии шероховатости, коэффициент изотропии твердости и коэффициент интенсивности твердости, названные интегральными показателями качества, позволяют формализовать многие важные значения параметров качества. Эти показатели качества важны для дальнейшего использования при разработке математической модели оптимизации технологии восстановления деталей дорожно-строительных машин в первую очередь тем, что при полноценности показателя качественной характеристики параметра они даются в виде безразмерных величин.

Библиографический список

1. Пушкарев А. Е., Беляев А. И. Формализация критериев качества восстановления деталей дорожно-строительных и горных машин / Известия Тульского гос. ун-та. Сер. «Науки о земле». 2018. № 2. С. 86–94.
2. Беляев А. И. Оптимизация восстановления деталей дорожно-строительных машин с использованием метода районирования // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 228–232.
3. Беляев А. И., Терентьев А. В., Пушкарев А. Е. Оценка методов восстановления деталей дорожно-строительных машин в многокритериальной постановке // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 1 (66). С. 123–127.
4. Терентьев А. В. Методы решения автотранспортных задач // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 2. URL: <http://www.science-education.ru/125-19863>
5. Терентьев А. В., Прудовский Б. Д. Методы принятия решений в условиях неопределенного состояния «внешней среды» // Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (26–27 мая 2016 г.) СПбГАСУ. СПб., 2016. С. 145–149.
6. Терентьев А. В., Прудовский Б. Д. Методы определения множества Парето в некоторых задачах линейного программирования // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 86–90.
7. Терентьев А. В. Развитие метода районирования // Материалы 4-й междунар. науч.-практ. конф. «Инновации на транспорте и в машиностроении». СПб.: Национальный минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2016. С. 127–130.
8. Prudovskiy B. D., Terentiev A. V. Investigation methods for «current repairs labour-intensiveness» factor for a vehicle // Life Science Journal. 2014. Vol. 11, Special Issue 10. Pp. 307–310.
9. Евтюков С. А., Терентьев А. В., Гинзбург Г. Методология управления рациональным сроком службы автомобиля // Мир транспорта и технологических машин. 2017. № 1 (56). С. 3–10.
10. Терентьев А. В., Ефименко Д. Б., Карелина М. Ю. Методы районирования как методы оптимизации автотранспортных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 291–294.

11. Терентьев А. В. Многокритериальный показатель качества автомобиля // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 1 (48). С. 201–204.

12. Терентьев А. В. Алгоритм управления жизненным циклом автомобиля на стадии его эксплуатации / Материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. «Инновации на транспорте и в машиностроении». СПб.: Национальный минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2015. С. 117–120.

References

1. Pushkarev A. E., Belyaev A. I. *Formalizatsiya kriteriev kachestva vosstanovleniya detaley dorozhno-stroitel'nykh i gornykh mashin* [Formalization of quality criteria of restoring the parts of construction and mining machines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Nauki o zemle» – Bulletin of the Tula State University. Ser. “Earth science”*, 2018, no. 2, pp. 86–94.

2. Belyaev A. I. *Optimizatsiya vosstanovleniya detaley dorozhno-stroitel'nykh mashin s ispol'zovaniem metoda rayonirovaniya* [Optimization of the repair of mechanical parts of road-building machines using the zoning method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 228–232.

3. Belyaev A. I., Terent'ev A. V., Pushkarev A. E. *Otsenka metodov vosstanovleniya detaley dorozhno-stroitel'nykh mashin v mnogokriterial'noy postanovke* [Evaluation of the methods for restoring the components of roadbuilding machines in a multi-criteria setting]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 1 (66), pp. 123–127.

4. Terent'ev A. V. *Metody resheniya avtotransportnykh zadach* [Methods of solving the motor transport problems]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, pt. 2. Available at: <http://www.science-education.ru/125-19863>.

5. Terent'ev A. V., Prudovskiy B. D. *Metody prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennogo sostoyaniya «vneshney sredy»* [Methods of coming up to solutions in an uncertain state of “external environment”]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (26–27 maya 2016 g.) «Transportnoe planirovanie i modelirovanie»* [Proc. of

the Int. sci.-pract. conf. (May 26–27, 2016) “Transport planning and modeling”]. St. Petersburg, SPSUACE publ., 2016, pp. 145–149.

6. Terent'ev A. V., Prudovskiy B. D. *Metody opredeleniya mnozhestva Pareto v nekotorykh zadachakh lineynogo programmirovaniya* [Methods for determining the Pareto set in some linear programming problems]. *Zapiski Gornogo Instituta – Proceedings of the Mining Institute*, 2015, vol. 211, pp. 86–90.

7. Terent'ev A. V. *Razvitie metoda rayonirovaniya* [Development of the zoning method]. *Trudy 4-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Innovatsii na transporte i v mashinostroenii»* [Proc. of the 4-th Int. sci.-pract. conf. “Innovations in transport and mechanical engineering”]. St. Petersburg, Natsional'nyy mineral'no-syr'evoy un-t «Gornyy» Publ., 2016, pp. 127–130.

8. Prudovskiy B. D., Terent'ev A. V. Investigation methods for «current repairs labour-intensiveness» factor for a vehicle. *Life Science Journal*, 2014, vol. 11, Special Issue 10, pp. 307–310.

9. Evtyukov S. A., Terent'ev A. V., Ginzburg G. *Metodologiya upravleniya ratsional'nyim srokom sluzhby avtomobilya* [Methodology of managing the rational lifetime of the vehicle]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin – World of transport and technological machines*, 2017, no. 1 (56), pp. 3–10.

10. Terent'ev A. V., Efimenko D. B., Karelina M. Yu. *Metody rayonirovaniya kak metody optimizatsii avtotransportnykh protsessov* [Methods of zoning as methods of transportation processes optimization]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 291–294.

11. Terent'ev A. V. *Mnogokriterial'nyy pokazatel' kachestva avtomobilya* [Multicriteria index of a vehicle's quality]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 1 (48), pp. 201–204.

12. Terent'ev A. V. *Algoritm upravleniya zhiznennym tsiklom avtomobilya na stadii ego ehkspluatatsii* [Algorithm of managing the life cycle of the vehicle under operation]. *Trudy 3-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Innovatsii na transporte i v mashinostroenii»* [Proc. of the 3-rd Int. sci.-pract. conf. “Innovations in transport and mechanical engineering”]. St. Petersburg, Natsional'nyy mineral'no-syr'evoy un-t «Gornyy» Publ., 2015, pp. 117–120.