

YARIM OCHIQ VAGON KONSTRUKSIYASINI STATIK VA DINAMIK KUCHLAR TA'SIRIDA BAHOLASH ORQALI QOLDIQ RESURSINI ANIQLASH

Muminov Shaxriyor Djamolovich

Toshkent davlat transport universiteti tayanch doktoranti

muminovshaxriyor25081998@gmail.com

Amonov Akbar O'ktam o'g'li

Toshkent davlat transport universiteti tayanch doktoranti

Raximov Rustam Vyacheslavovich

Toshkent Davlat Transport Universiteti texnika fanlari doktori, professor

Annotatsiya: *Temir yo'l transportida yuk tashish hajmi ortib borishi natijasida mavjud yuk vagonlari parkidan samarali foydalanishni va ularning xizmat muddatini ilmiy asoslar orqali uzaytirishni taqozo etmoqda. Ayniqsa, yarim ochiq vagonlarning asosiy qismi ko'p yillar davomida to'xtovsiz foydalanilishi natijasida yuk ko'taruvchi konstruksiyalarida metalning charchoqligi, korroziya, qoldiq deformatsiyalar hamda payvand birikmalarida mikroyoriqlar shakllanadi. Ushbu omillar konstruksiyaning yuk ko'tarish qobiliyatiga, ishonchliligiga va qoldiq resursiga to'g'ridan-to'g'ri ta'sir ko'rsatadi. Ushbu ishda yarim ochiq vagon konstruksiyasining statik va dinamik yuklanishlar ta'sirida kuchlanish-deformatsiya holatini kompleks baholash yondashuvi taklif etilgan. Tadqiqot metodikasi putur yetkazmasdan nazorat qilish usullari, eksperimental tenzometrik sinovlar va chekli elementlar usuli asosidagi sonli modellashtirishni o'zaro bog'lashga asoslanadi. Ushbu yondashuv konstruksiyaning eng ko'p yuklanadigan elementlarini aniqlash, ularning texnik holatini baholash hamda xizmat muddatini uzaytirish bo'yicha asoslangan qaror qabul qilish imkonini beradi.*

Kalit so'zlar: *yarim ochiq vagon, qoldiq resurs, statik sinov, dinamik sinov, ANSYS Workbench, chekli elementlar usuli, putur yetkazmasdan nazorat, tenzometriya, mustahkamlik.*

1. KIRISH

Temir yo'l transporti mamlakat iqtisodiyotining strategik tarmoqlaridan biri bo'lib, sanoat korxonalari, tog'-kon majmualari va qishloq xo'jaligi mahsulotlarini tashishda asosiy transport vositasi hisoblanadi. So'nggi yillarda yuk tashish hajmining barqaror ortishi mavjud yuk vagonlari parkidan foydalanish samaradorligini oshirishni talab qilmoqda. Shu bilan birga, ekspluatatsiyada bo'lgan yarim ochiq vagonlarning sezilarli qismi ishlab chiqaruvchi tomonidan belgilangan xizmat muddatiga yaqinlashgan yoki undan oshgan. Bunday sharoitda yangi vagonlarni xarid qilish katta iqtisodiy xarajatlarni talab qilishi sababli mavjud vagonlarning texnik holatini ilmiy

asosda baholash va ularning qoldiq resursini aniqlash dolzarb ilmiy-amaliy vazifaga aylanmoqda [1]. Amaliyot shuni ko'rsatadiki, xizmat muddati yakuniga yetgan barcha vagonlarni ekspluatatsiyadan chiqarish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emas. Ayrim hollarda konstruksiyaning yuk ko'taruvchi elementlari yetarli mustahkamlik zaxirasini saqlab qoladi va zarur diagnostika hamda ta'mirlash ishlari bajarilgandan so'ng ulardan yana bir necha yil xavfsiz foydalanish mumkin. Boshqa tomondan, tashqi ko'rinishidan soz bo'lgan ayrim vagonlarda ichki darzlar yoki metal qalinligining kamayishi tufayli xavfli holatlar yuzaga kelgan bo'lishi mumkin. Shu sababli qoldiq resursni baholash faqat ekspluatatsiya muddati yoki kapital ta'mirlash sanasiga asoslanmasligi, balki konstruksiyaning haqiqiy texnik holatini aks ettiruvchi diagnostika va hisoblash natijalari bilan asoslanishi zarur [2].

Yarim ochiq vagon konstruksiyasi ekspluatatsiya davomida murakkab yuklanishlar ta'sirida ishlaydi. Kuzovga ortilgan yuk massasi vertikal statik yuklarni hosil qilsa, harakat jarayonida rels yo'lining notekisligi, strelkali o'tkazgichlar, tormozlash, tezlanish va manyovr zarbalari qo'shimcha dinamik yuklanishlarni yuzaga keltiradi. Mazkur yuklar xrebetli balka, shkvorenli balkalar, ko'ndalang balkalar va yon ustunlar birikmalarida kuchlanishlar konsentratsiyasining ortishiga sabab bo'ladi. Aynan ushbu hududlarda metalning charchashi va mikroyoriqlarning rivojlanishi ko'proq kuzatiladi [3].

Shu munosabat bilan qoldiq resursni baholashda faqat vizual ko'rik bilan cheklanib qolish yetarli emas. Zamonaviy diagnostika usullarini qo'llash, putur yetkazmasdan nazorat qilish, tenzometrik sinovlar hamda chekli elementlar usuli asosidagi sonli modellash tirishni o'zaro uyg'unlashtirish konstruksiyaning haqiqiy yuklanish holatini baholash imkonini beradi. Ushbu yondashuv xizmat muddatini uzaytirish bo'yicha qabul qilinadigan texnik qarorlarning ishonchliligini sezilarli darajada oshiradi [4].

Ushbu tadqiqot ishining maqsadi yarim ochiq vagon konstruksiyasining statik va dinamik yuklanishlar ostidagi kuchlanish-deformatsiya holatini kompleks baholash, diagnostika natijalarini sonli modellash tirish bilan integratsiyalash hamda qoldiq resursni aniqlashning ilmiy asoslangan metodikasini ishlab chiqishdan iborat.

2. MAVZU BO'YICHA ADABIYOTLAR SHARHI

Yuk vagonlari konstruksiyalarining mustahkamligini baholash bo'yicha ilmiy tadqiqotlar XX asrning ikkinchi yarmidan boshlab jadal rivojlana boshlagan. Dastlabki ishlarda asosiy e'tibor statik yuklanishlar ostida kuzov va rama elementlarining mustahkamligini tekshirishga qaratilgan bo'lsa, keyinchalik dinamik yuklanishlarning ta'sirini hisobga oluvchi metodikalar ishlab chiqildi [5]. Yevropa mamlakatlarida yuk vagonlari konstruksiyalariga qo'yiladigan asosiy talablar EN 12663-2 standartida belgilangan. Mazkur hujjatda yuk ko'taruvchi konstruksiyalarni statik va ekspluatatsion yuklanishlar ostida baholash tamoyillari, hisoblash sxemalari hamda sinov talablariga alohida e'tibor qaratilgan [1]. Rossiya va MDH davlatlarida

esa yuk vagonlarining texnik holatini baholash **FOCT 33211-2014** va **FOCT 33788-2016** standartlari asosida amalga oshiriladi. Ushbu hujjatlar xizmat muddati uzaytiriladigan vagonlarni diagnostika qilish hamda mustahkamligini tekshirishning umumiy tartibini belgilaydi [2,3,4]. Zamonaviy ilmiy ishlarda chekli elementlar usulidan foydalanish yuk vagonlari konstruksiyasidagi kuchlanishlarning taqsimlanishini yuqori aniqlik bilan baholash imkonini berishi qayd etilgan. Ayniqsa, ANSYS Workbench, Abaqus va Nastran dasturlari asosida bajarilgan modellashtirish ishlari xrebetli balka, shkvorenli balka va yon ustunlarning tugunlarida kuchlanish konsentratsiyasi yuqori ekanligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, hisoblash modelining ishonchiligi eksperimental sinovlar orqali tasdiqlanishi zarurligi ko'plab tadqiqotchilar tomonidan ta'kidlangan.

Putur yetkazmasdan nazorat qilish usullari qoldiq resursni baholashda alohida o'rin tutadi. Ultratovushli nazorat, magnit-kukunli nazorat va vizual-o'lchov tekshiruvlari yordamida metal ichidagi va sirtidagi nuqsonlar aniqlanadi. Diagnostika natijalarini chekli elementlar modeli bilan bog'lash orqali konstruksiyaning haqiqiy texnik holatini baholash imkoniyati sezilarli darajada oshadi. Tahlil qilingan adabiyotlar shuni ko'rsatadiki, mavjud tadqiqotlarning ko'pchiligida statik va dinamik sinovlar alohida ko'rib chiqilgan. Biroq ularni putur yetkazmasdan nazorat qilish natijalari hamda chekli elementlar usuli bilan yagona metodika doirasida integratsiyalash masalasi yetarli darajada yoritilmagan. Mazkur tadqiqot aynan ushbu ilmiy bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan bo'lib, yarim ochiq vagonlarning qoldiq resursini baholashda kompleks yondashuvni taklif etadi.

3. TADQIQOT METODIKASI

Yarim ochiq vagon konstruksiyasining statik va dinamik yuklanishlar ostidagi texnik holatini baholash kompleks metodika asosida amalga oshirildi. Tadqiqotning umumiy algoritmi to'rtta asosiy bosqichdan iborat bo'lib, ular o'zaro uzviy bog'langan holda bajarilishi nazarda tutiladi. Birinchi bosqichda vagon konstruksiyasining geometrik modeli shakllantiriladi va nazorat qilinadigan elementlar tanlanadi. Ikkinchi bosqichda statik hamda dinamik yuklanishlarni ifodalovchi hisoblash sxemalari ishlab chiqiladi. Uchinchi bosqichda chekli elementlar modeli tuziladi va kuchlanish-deformatsiya holati baholanadi. Yakuniy bosqichda esa sonli modellashtirish natijalari putur yetkazmasdan nazorat qilish usullari orqali olingan ma'lumotlar bilan taqqoslanadi va qoldiq resurs baholanadi.

Tadqiqot obyekti sifatida 12-9922 modelidagi yarim ochiq yuk vagoni tanlandi. Mazkur model vagon parkimizda keng ekspluatatsiya qilinishi, yuk ko'tarish qobiliyatining yuqoriligi hamda yuk ko'taruvchi konstruksiyasining murakkabligi bilan ajralib turadi. Vagonning asosiy yuk ko'taruvchi elementlari sifatida xrebetli balka, shkvorenli balkalar, ko'ndalang balkalar, pastki bog'lovchi elementlar hamda yon ustunlar qabul qilindi. Aynan ushbu elementlar ekspluatatsiya davomida eng katta

kuchlanishlarni qabul qilishi va charchash jarayoniga ko'proq uchrashi sababli tadqiqotning asosiy nazorat obyekti sifatida tanlandi.

Material sifatida yuk vagonlari ishlab chiqarishda keng qo'llaniladigan 09G2S markali past legirlangan konstruksion po'lat qabul qilindi. Ushbu po'latning yuqori mustahkamlik ko'rsatkichlari, zarbiy qovushoqligi hamda payvandlanuvchanligi uni yuk vagonlari ishlab chiqarishda qo'llash uchun qulay materialga aylantiradi. Hisoblashlarda materialning elastik xossalari me'yoriy hujjatlarda keltirilgan qiymatlar asosida qabul qilinadi [6].

3.1. Statik sinov metodikasi

Statik sinovlarning asosiy maqsadi konstruksiyaning me'yoriy ekspluatatsion yuk ostidagi kuchlanish-deformatsiya holatini aniqlashdan iborat. Sinovlar davomida vagon maxsus tayanchlarga o'rnatilib, kuzovga bosqichma-bosqich vertikal yuk berilishi nazarda tutiladi. Har bir yuklash bosqichida deformatsiyalar qayd etilib, elastik ish rejimidan og'ishlar kuzatiladi.

Nazorat nuqtalari sifatida quyidagi hududlar tanlanadi:

- xrebetli balka markaziy qismi;
- shkvorenli balka va xrebetli balka tutashgan tugun;
- yon ustunlarning pastki bog'lovchi element bilan birikish joyi;
- ko'ndalang balkalarning markaziy qismi;
- payvand birikmalarining eng mas'ul zonalari.

Mazkur hududlarda elektr qarshilikli tenzorezistorlar o'rnatilib, deformatsiyalar ko'p kanalli tenzometrik stansiya orqali uzluksiz qayd etiladi. Olingan deformatsiyalar Huk qonuni asosida kuchlanish qiymatlariga o'tkaziladi va sonli modellashtirish natijalari bilan taqqoslanadi.

Statik sinov yakunida yuk olib tashlangandan so'ng konstruksiyada qoldiq deformatsiya mavjud yoki mavjud emasligi ham baholanadi. Qoldiq deformatsiyaning aniqlanishi materialning elastik chegaradan chiqib ketganligini ko'rsatishi mumkin va bunday hududlar keyingi diagnostika bosqichida alohida nazorat qilinadi.

3.2. Dinamik sinov metodikasi

Yarim ochiq vagon ekspluatatsiyasi davomida asosiy yuklanishlarning katta qismi dinamik xarakterga ega bo'ladi. Shu sababli qoldiq resursni baholashda dinamik sinovlar alohida ahamiyat kasb etadi.

Dinamik sinovlar quyidagi ekspluatatsion holatlarni modellashtirishni nazarda tutadi:

- yuklangan vagonning to'g'ri uchastkada harakati;
- bo'sh vagon harakati;
- xizmat tormozlanishi;
- favqulodda tormozlanish;
- tezlanish;
- strelkali o'tkazgichlardan o'tish;

- kichik radiusli egri uchastkalar;
- manyovr zarbalari.

Mazkur sinovlar davomida vertikal va gorizonta1 tezlanishlar, tebranish amplitudalari hamda kuchlanishlarning vaqt bo'yicha o'zgarishi qayd etiladi. Dinamik yuklanishlar ta'sirida yuzaga keladigan maksimal kuchlanishlar keyinchalik statik yuklanish natijalari bilan taqqoslanadi. Bu esa konstruksiyaning qaysi elementlari charchoq va yemirilishga ko'proq moyilligini aniqlash imkonini beradi [7].

3.3. Tenzometrik o'lchashlarni tashkil etish

Eksperimental ma'lumotlarning ishonchliligini oshirish maqsadida tenzodatchiklar yuk ko'taruvchi elementlarning eng mas'ul tugunlariga joylashtiriladi. Datchiklarning joylashuvi sonli modellashtirish natijalari asosida aniqlangan yuqori kuchlanish zonalariga mos tanlanadi.

Tenzodatchiklarni quyidagi elementlarga o'rnatish tavsiya etiladi:

- xrebetli balka;
- shkvorenli balka;
- ko'ndalang balka;
- yon ustunlarning pastki qismi;
- payvand choklari yaqinidagi tugunlar.

O'lchash natijalari ko'p kanalli raqamli tenzostansiyada qayd etilib, keyinchalik ANSYS Workbench dasturida olingan hisoblash natijalari bilan solishtiriladi. Bunday yondashuv hisoblash modelining muvofiq1ligini baholash imkonini beradi.

3.4. ANSYS Workbench asosida sonli modellashtirish

Hisoblash modeli ANSYS Workbench dasturida uch o'lchamli chekli elementlar usuli asosida yaratiladi. Modelni shakllantirishda vagonning haqiqiy geometrik o'lchamlari, material xossalari va ekspluatatsion yuklanishlari hisobga olinadi.

To'r hosil qilish jarayonida elementlar o'lchami yuqori kuchlanishlar yuzaga kelishi kutiladigan hududlarda maydalashtiriladi. Ayniqsa, xrebetli balka va shkvorenli balka tutashgan tugun, yon ustunlarning pastki bog'lovchi element bilan birikish zonalari hamda payvand choklari atrofida lokal to'r zichligi oshiriladi.

Hisoblash jarayonida quyidagi yuklanish holatlari ketma-ket modellashtiriladi:

- nominal yuk;
- maksimal ekspluatatsion yuk;
- bo'ylama siqilish;
- tortish kuchi;
- tormozlash kuchlari;
- nosimmetrik yuklanish.

Natijada ekvivalent kuchlanishlar, umumiy deformatsiyalar, siljishlar va xavfsizlik zaxirasi aniqlanadi. Mazkur natijalar eksperimental sinovlar bilan taqqoslanib, qoldiq resursni baholash uchun asos sifatida foydalaniladi.

4. HISOBLASH NATIJALARINING TAHLILI VA MUHOKAMASI

4.1. Kuchlanish-deformatsiya holatini tahlil qilish

Chekli elementlar usuli asosida yaratilgan hisoblash modeli yarim ochiq vagon konstruksiyasining statik va dinamik yuklanishlar ostidagi ish rejimini kompleks baholash imkonini beradi.

Hisoblash natijalari tahlili shuni ko'rsatadiki, konstruksiya elementlarida kuchlanishlar bir tekis taqsimlanmaydi. Yuklarning rama bo'ylab uzatilishi jarayonida ayrim tugunlarda kuchlanishlar konsentratsiyasi yuzaga keladi. Bu holat elementlarning geometrik shakli, kesimning o'zgarishi va payvand birikmalarining mavjudligi bilan izohlanadi.

Statik yuklanish sharoitida asosiy yuk xrebetli balka orqali uzatiladi. Bunda yukning ma'lum qismi shkvorenli balkalar, ko'ndalang balkalar va yon ustunlar orqali qayta taqsimlanadi. Hisoblash natijalari shuni ko'rsatadiki, eng yuqori kuchlanishlar xrebetli balka va shkvorenli balka tutashgan zonada, shuningdek yon ustunlarning pastki bog'lovchi element bilan birikish qismida yuzaga kelishi kutiladi. Mazkur hududlar ekspluatatsiya davomida charchash darzlari rivojlanishi ehtimoli yuqori bo'lgan zonalar sifatida baholanadi.

Dinamik yuklanishlar ta'sirida konstruksiyaning ish rejimi yanada murakkablashadi. Tormozlash, tezlanish va manyovr zarbalari vaqtida hosil bo'ladigan qo'shimcha inertsia kuchlari ayrim elementlarda statik holatga nisbatan yuqoriroq kuchlanish amplitudalarini yuzaga keltirishi mumkin. Ayniqsa, rels yo'lining notekisligi va strelkali o'tkazgichlardan o'tish jarayonida qisqa muddatli, ammo yuqori intensiv yuklanishlar kuzatiladi. Shu sababli qoldiq resursni baholashda faqat statik hisoblash natijalariga tayanish yetarli emas [8].

4.2. Diagnostika va sonli modellashtirish natijalarini solishtirish

Putur yetkazmasdan nazorat qilish usullari orqali aniqlangan nuqsonlar hisoblash modeli bilan taqqoslanganda, kuchlanish konsentratsiyasi yuqori bo'lgan hududlar va nuqsonlarning joylashuvi o'rtasida mantiqiy bog'liqlik kuzatilishi kutiladi. Bu esa sonli modellashtirish natijalarining diagnostika ma'lumotlari bilan o'zaro mosligini tekshirish imkonini beradi.

Vizual-o'lchov nazorati deformatsiyalangan zonalarini aniqlashga xizmat qilsa, ultratovushli nazorat ichki darzlar va qatlamlanishlarni aniqlash imkonini beradi. Magnit-kukunli nazorat esa payvand choklari va ularga yaqin hududlarda yuzaga kelgan sirt yoriqlarini aniqlashda samarali hisoblanadi. Ushbu ma'lumotlarning hisoblash modeli bilan uyg'un tahlili texnik holatni ancha ishonchli baholashga yordam beradi [9].

4.3. Konstruksiyaning mahalliy kuchaytirish imkoniyatlari

Hisoblash va diagnostika natijalarini kompleks tahlil qilish yuqori yuklanadigan hududlarda mahalliy kuchaytirish choralarini qo'llash maqsadga muvofiqligini ko'rsatadi. Tadqiqot doirasida ko'rib chiqilgan konstruktiv yechimlardan biri yon

ustunlarning pastki tugunlari hamda yuqori kuchlanish kuzatiladigan ayrim birikmalarda qo'shimcha mustahkamlovchi nakladkalardan foydalanishdir.

Mahalliy kuchaytirishning asosiy maqsadi konstruksiya qattiqligini keskin oshirish emas, balki kuchlanishlarni kengroq maydonga qayta taqsimlash va konsentratsiyani kamaytirishdan iborat. Bunday yondashuv payvand birikmalarida charchash darzlari rivojlanish ehtimolini pasaytirishi va konstruksiyaning ekspluatatsion ishonchliligini oshirishi mumkin. Yakuniy samaradorlik esa chekli elementlar hisoblari va eksperimental sinovlar asosida baholanishi lozim.

4.4. Tadqiqotning ilmiy va amaliy ahamiyati

Taklif etilgan metodika qoldiq resursni baholashni faqat umumiy xizmat muddati yoki tashqi ko'rik natijalari bilan cheklab qo'ymaydi. Diagnostika ma'lumotlari, sonli modellashtirish va eksperimental sinovlarni yagona tizimda qo'llash individual texnik holatni baholash imkonini beradi.

Mazkur yondashuvning amaliy ahamiyati quyidagilardan iborat:

- xizmat muddati uzaytiriladigan yarim ochiq vagonlarni ilmiy asosda saralash;
- ta'mirlash ishlarini eng zarur tugunlarga yo'naltirish;
- ortiqcha ta'mirlash xarajatlarini kamaytirish;
- ekspluatatsiya xavfsizligini oshirish;
- mavjud vagon parkidan foydalanish samaradorligini yaxshilash.

5. Ilmiy yangilik

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagi jihatlar bilan tavsiflanadi:

- yarim ochiq vagonlarning qoldiq resursini baholash uchun statik va dinamik sinovlar, putur yetkazmasdan nazorat hamda chekli elementlar usulini birlashtiruvchi kompleks metodik yondashuv taklif etildi;
- yuqori yuklanish kuzatiladigan konstruktiv tugunlarni aniqlash mezonlari tizimlashtirildi;
- diagnostika natijalarini sonli modellashtirish bilan integratsiyalash orqali texnik holatni baholashning ishonchliligini oshirishga qaratilgan yondashuv asoslandi;
- mahalliy mustahkamlovchi elementlardan foydalanish qoldiq resursni oshirishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida ko'rsatildi.

6. Xulosa

Yarim ochiq vagonlarning qoldiq resursini aniqlash ko'p omilli ilmiy masala bo'lib, u konstruksiyaning haqiqiy texnik holatini kompleks baholashni talab qiladi. Statik va dinamik sinovlar, putur yetkazmasdan nazorat hamda chekli elementlar usuliga asoslangan sonli modellashtirishni uyg'un qo'llash konstruksiyaning yuklanish xususiyatlarini chuqur tahlil qilish imkonini beradi.

Taklif etilgan metodika ekspluatatsiya davomida yuqori yuklanadigan tugunlarni aniqlash, ta'mirlash hajmini asoslash va xizmat muddatini uzaytirish bo'yicha texnik qarorlarning ishonchliligini oshirishga xizmat qiladi. Keyingi tadqiqotlarda ushbu

metodikani real eksperimental sinovlar va ANSYS Workbench hisoblash natijalari bilan to'ldirish uning amaliy qo'llanish imkoniyatlarini yanada kengaytiradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. EN 12663-2:2010. Railway Applications-Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies-Part 2: Freight Wagons. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
2. EN 13749:2021. Railway Applications- Wheelsets and Bogies- Method of Specifying the Structural Requirements of Bogie Frames. Brussels: CEN.
3. ГОСТ 33211-2014. **Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.** Москва: Стандартинформ, 2015.
4. ГОСТ 33788-2016. **Вагоны грузовые. Методы оценки технического состояния.** Москва: Стандартинформ, 2017.
5. РД 32 ЦВ 058-97. **Методика определения остаточного ресурса грузовых вагонов.** Москва: МПС России, 1997.
6. Третьяков, А.В. Продление срока службы подвижного состава: Монография. М.: Издательство МБА. – 2011. – 304 с.
7. Хромова, Г.А. Стендовые динамические испытания с определением прочности элементов подвижного состава / Г.А. Хромова, С.А. Хромов, Д.О. Раджибаев // Научные труды республиканской научно-технической конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – Т.: ТашИИТ. – 2018. – С. 69- 71.
8. Стародубцева, С.А., Прогнозирование остаточного ресурса конструкции деталей машин / С.А. Стародубцева, Гусев А.С. // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2012.– № 2. – С. 355-360.
9. Смирнов, В.А. Оценка остаточного ресурса узлов и деталей подвижного состава по результатам неразрушающего контроля / В.А. Смирнов, В.Ф. Кузнецов // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 1 (39). – С. 76-78.