

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 2, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 2

JUNE, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 2 JUNE, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Improving the wear resistance of internal surfaces of slurry pumps in the flotation

M.Z. Ubaydullaev¹, E.I. Ruklinskaya¹, U.D. Kosimov², N.N. Yodgorov¹, N.I. Khavasova¹

¹ Branch of the National University of Science and Technology MISIS in the city of Almalyk, Almalyk, Uzbekistan

²Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract:

The paper addresses the wear of the internal surfaces of the flow-path parts of slurry pumps operated in the flotation process at the Almalyk Mining and Metallurgical Combine (JSC «AGMK»). A comparative analysis of three chemical-thermal treatment (CTT) methods — nitriding, carbonitriding and boriding — was carried out for hardening of structural steels 45 and 30KhGSA. The structure, microhardness and wear resistance of the diffusion layers were studied. It was established that boriding provides the maximum surface microhardness (up to 20000–22000 MPa) while forming a thin (~70 µm) brittle two-phase layer prone to spalling under impact loading. Low-temperature carbonitriding in a salt melt at 570 °C forms a ~200 µm layer with a microhardness of 5000–8000 MPa that combines increased hardness with toughness, corrosion resistance and a smooth transition to the core. It is shown that carbonitriding provides uniform treatment of the internal cavities of geometrically complex parts that are inaccessible to line-of-sight methods, with minimal distortion. Carbonitriding is justified as the principal hardening method and boriding as a supplementary one for zones of tangential abrasive wear. The expected increase in service life of the parts is 2.4–3.6 times, with a payback period of less than one year.

Keywords:

chemical-thermal treatment, carbonitriding, boriding, nitriding, wear resistance, slurry pump, flotation, microhardness, hydroabrasive wear, diffusion layer

Повышение износостойкости внутренних поверхностей грунтовых насосов флотационного передела методами химико-термической обработки

Убайдуллаев М.З.¹, Руклинская Е.И.¹, Косимов У.Д.², Ёдгоров Н.Н.¹, Хавасова Н.И.¹

¹АФ НИТУ «МИСИС» в г. Алмалык, Алмалык, Узбекистан

²Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация:

Рассмотрена проблема износа внутренних поверхностей деталей проточной части грунтовых насосов, эксплуатируемых на флотационном переделе АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат». Выполнен сравнительный анализ трёх методов химико-термической обработки (ХТО) — азотирования, карбонитрации и борирования — применительно к упрочнению конструкционных сталей 45 и 30ХГСА. Исследованы строение, микротвёрдость и износостойкость диффузионных слоёв. Установлено, что борирование обеспечивает максимальную поверхностную микротвёрдость (до 20000–22000 МПа) при тонком (~70 мкм) хрупком двухфазном слое, склонном к выкрашиванию при ударном воздействии. Низкотемпературная карбонитрация в расплаве солей при 570 °C формирует слой толщиной ~200 мкм с микротвёрдостью 5000–8000 МПа, сочетающий повышенную твёрдость с вязкостью, коррозионной стойкостью и плавным переходом к сердцевине. Показано, что карбонитрация обеспечивает равномерную обработку внутренних полостей деталей сложной формы, недоступных для методов прямой видимости, при минимальных деформациях. Обоснован выбор карбонитрации в качестве основного метода упрочнения, а борирования — как дополнительного для зон касательного абразивного изнашивания. Ожидаемое увеличение ресурса деталей составляет 2,4–3,6 раза при сроке окупаемости затрат менее одного года.

Ключевые слова:

химико-термическая обработка, карбонитрация, борирование, азотирование, износостойкость, грунтовый насос, флотация, микротвёрдость, гидроабразивное изнашивание, диффузионный слой

1. Введение

Грунтовые (пульповые) насосы являются ключевым оборудованием обогатительных фабрик, обеспечивая межоперационный транспорт абразивной пульпы на всех стадиях измельчения и флотации. Надёжность насосного оборудования напрямую определяет

производительность передела, поскольку выход из строя одного насоса в технологической цепочке приводит к остановке участка. Основной причиной выхода насосов из строя является интенсивное гидроабразивное и эрозионное изнашивание внутренних поверхностей деталей проточной части — рабочих колёс, бродисков и корпуса-улитки,



контактирующих с потоком пульпы, содержащей твёрдые минеральные частицы [1, 2].

Интенсивность изнашивания деталей возрастает с увеличением скорости потока (приблизительно пропорционально третьей степени скорости), концентрации и крупности твёрдой фазы. Эрозионное разрушение зависит также от угла атаки частиц: для пластичных материалов максимум износа приходится на средние углы (около 30°), для хрупких — на нормальный удар [2, 3]. Перерабатываемые на фабриках АО «Алмалыкский ГМК» медно-молибденовые и полиметаллические руды содержат значительное количество кварца, что обуславливает высокую абразивность пульпы и малый ресурс деталей.

Традиционные способы борьбы с износом имеют существенные ограничения. Объёмно-упрочнённые материалы (высокохромистые и никельхромистые чугуны) обладают высокой абразивной стойкостью, но хрупки, плохо обрабатываются и чувствительны к ударным нагрузкам [1]. Эластомерные футеровки эффективны лишь на тонкодисперсных пульпах и непригодны при наличии крупного абразива. Наплавка и газотермическое напыление (HVOF) формируют толстые износостойкие слои, однако работают по принципу прямой видимости и не позволяют качественно обрабатывать внутренние полости и узкие каналы деталей сложной формы; кроме того, покрытиям свойственны остаточная пористость и риск отслаивания [4].

Химико-термическая обработка (ХТО) — диффузионное насыщение поверхностного слоя металла азотом, углеродом или бором — лишена указанного недостатка. Упрочнённый слой формируется в самом металле детали, прочно связан с основой и не склонен к отслаиванию [5, 6]. При проведении процесса в расплаве солей насыщение происходит одновременно на всех смоченных поверхностях детали независимо от их доступности, что обеспечивает равномерное упрочнение внутренних полостей. Целью настоящей работы является сравнительная оценка методов ХТО (азотирования, карбонитрации и борирования) и обоснование рационального способа повышения износостойкости внутренних поверхностей грунтовых насосов.

2. Методика исследования

Объектом исследования служили образцы из углеродистой стали 45 и легированной стали 30ХГСА, моделирующие материал деталей проточной части насосов. Химический состав сталей приведён в таблице 1. Сталь 30ХГСА перед химико-термической обработкой подвергали предварительной термообработке — закалке с высоким отпуском на структуру зернистого сорбита, обеспечивающую прочную и вязкую сердцевину.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей, % (масс.)

Марка стали		C	Cr	Mn	Si / прочие
Сталь 45		0,42–0,50	≤0,25	0,50–0,80	0,17–0,37; Fe — осн.
30ХГСА		0,28–0,34	0,80–1,10	0,80–1,10	0,90–1,20; Fe — осн.

Сравнивали три вида химико-термической обработки. Газовое азотирование проводили при температуре 500–520 °С. Низкотемпературную карбонитрацию выполняли в расплаве солей при 570 °С в течение 1,5–2,5 ч с последующим охлаждением на воздухе или в масле; в качестве основы расплава использовали цианат и карбонат калия, а в более безопасном варианте — карбамид в сочетании с карбонатом калия. Жидкостное безэлектrolитное борирование проводили при 950 °С в течение 4 ч с охлаждением на воздухе.

Строение упрочнённых слоёв изучали металлографически на оптическом микроскопе при увеличении 200 крат после травления в 3–4-процентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микротвёрдость измеряли методом восстановленного отпечатка по Виккерсу при нагрузке 0,98–1,96 Н с построением профилей распределения по толщине слоя. Износостойкость оценивали по результатам испытаний на гидроабразивное изнашивание в суспензии кварцевого песка при различных углах атаки потока; мерой служила относительная износостойкость — отношение потери массы неупрочнённого образца к потере массы упрочнённого. Результаты обрабатывали методами математической статистики при доверительной вероятности 0,95.

3. Результаты и обсуждения

Металлографическими исследованиями установлено, что азотирование и карбонитрация формируют диффузионные слои толщиной 200–300 мкм с тонким верхним слоем химических соединений и протяжённой диффузионной подзоной, обеспечивающей плавное снижение твёрдости к сердцевине. Борирование создаёт характерный двухфазный боридный слой игольчатого строения общей толщиной около 70 мкм, состоящий из поверхностной зоны боридов FeB (~35 мкм) и подслоя Fe₂B (~30 мкм). Переходная диффузионная зона практически отсутствует, вследствие чего твёрдость резко снижается до значений твёрдости сердцевины. Различие коэффициентов термического расширения боридов и растягивающие остаточные напряжения в фазе FeB обуславливают повышенную хрупкость боридного слоя и его склонность к выкрашиванию [7, 8].



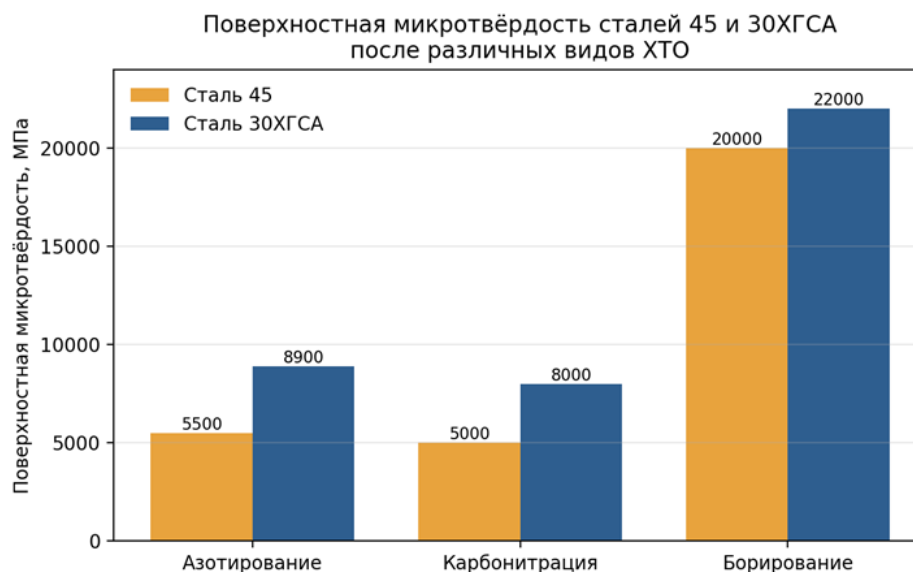


Рис. 1. Поверхностная микротвёрдость сталей 45 и 30ХГСА после различных видов ХТО

Результаты измерения поверхностной микротвёрдости приведены на рисунке 1. Борирование обеспечивает наивысшую твёрдость — до 20000 МПа для стали 45 и до 22000 МПа для стали 30ХГСА. Азотирование и карбонитрация дают умеренно высокую твёрдость: 5500 и 5000 МПа для стали 45 и 8900 и 8000 МПа для стали 30ХГСА соответственно. Прирост

твёрдости при переходе от углеродистой стали к легированной составляет около 60 % и объясняется образованием дисперсных специальных нитридов и карбонитридов хрома, марганца и кремния, обладающих более высокой твёрдостью и термической стабильностью, чем соединения железа [5].

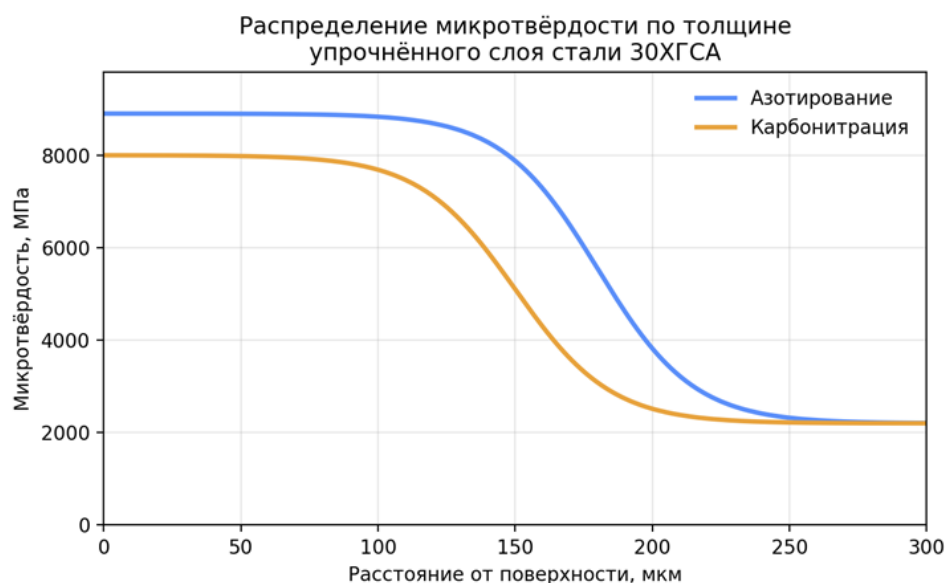


Рис. 2. Распределение микротвёрдости по толщине упрочнённого слоя стали 30ХГСА

Профили распределения микротвёрдости по толщине слоя (рисунок 2) подтверждают принципиальное различие методов: азотирование и карбонитрация формируют плавный переход твёрдости от поверхности к сердцевине на глубине 200–250 мкм, что обеспечивает хорошую несущую способность слоя и сопротивление выкрашиванию, тогда как боридный

слой характеризуется резкой границей. Поверхностный карбонитридный слой представлен преимущественно ϵ -карбонитридом железа $Fe_{2-3}(N,C)$, обладающим повышенной коррозионной стойкостью, что важно в условиях коррозионно-эрозионного воздействия пульпы [9].

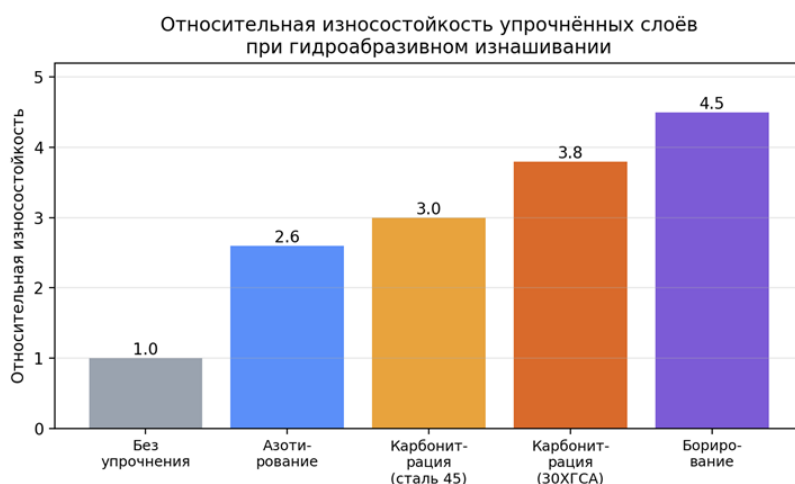


Рис. 3. Относительная износостойкость упрочнённых слоёв при гидроабразивном изнашивании

Результаты испытаний на гидроабразивное изнашивание (рисунок 3) показали, что наибольшую относительную износостойкость при касательном абразивном воздействии обеспечивает боридный слой (4,5). Однако для боридного слоя максимум интенсивности изнашивания смещён в область прямого удара ($\approx 90^\circ$), где хрупкий слой выкрашивается, и его

преимущество нивелируется [10]. Карбонитрированные слои, особенно на легированной стали 30ХГСА (3,8), обеспечивают высокую и стабильную износостойкость во всём диапазоне углов атаки без признаков хрупкого разрушения. Обобщённые характеристики упрочнённых слоёв приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики методов ХТО исследуемых сталей

Метод	Температура, °С	Толщина слоя, мкм	HV пов., МПа (45 / 30ХГСА)	Характеристика слоя
Азотирование	500–520	200–300	5500 / 8900	вязкий, плавный переход; длительный процесс
Карбонитрация	570	≈ 200	5000 / 8000	вязкий, коррозионно-стойкий; малые деформации; обработка внутренних полостей
Борирование	950	≈ 70	до 20000 / до 22000	сверхтвёрдый, хрупкий; разупрочнение сердцевины

Для упрочнения внутренних поверхностей деталей сложной формы решающее значение имеет совокупность технологических и эксплуатационных свойств. Низкотемпературная карбонитрация в расплаве солей уникально сочетает достаточную твёрдость с вязкостью и плавным переходом к сердцевине, повышенную коррозионную стойкость, малые деформации (вследствие низкой температуры процесса 570°C) и принципиальную возможность равномерной обработки глухих внутренних полостей рабочего колеса и улитки. Борирование, несмотря на максимальную твёрдость, протекает при 950°C , вызывает разупрочнение сердцевины и коробление, а хрупкий слой выкрашивается под ударами частиц, что ограничивает область его применения [7, 8, 10].

На основании полученных данных в качестве основного метода упрочнения внутренних поверхностей грунтовых насосов обоснована карбонитрация, а борирование рекомендовано как дополнительный метод для зон касательного абразивного изнашивания при малых ударных нагрузках. Целесообразен дифференцированный (зональный) подход, при котором

в каждой зоне детали реализуются сильные стороны соответствующего метода ХТО. Ожидаемое увеличение ресурса деталей при карбонитрации составляет около 2,4 раза, а при карбонитрации с одновременной закалкой сердцевины — до 3,6 раза, что сопоставимо с уровнем высокохромистого чугуна при существенно меньшей стоимости и большей технологичности. Технико-экономическая оценка показывает, что капитальные затраты на организацию участка упрочнения окупаются менее чем за один год эксплуатации.

4. Заключение

— Основной причиной выхода из строя деталей проточной части грунтовых насосов флотационного передела является гидроабразивно-эрозионное изнашивание внутренних поверхностей, что определяет необходимость их поверхностного упрочнения.

— Борирование обеспечивает максимальную поверхностную микротвёрдость (до 22000 МПа), но формирует тонкий (~ 70 мкм) хрупкий двухфазный слой



без переходной зоны, склонный к выкрашиванию при ударном воздействии и сопровождающийся разупрочнением сердцевины.

— Низкотемпературная карбонитрация формирует слой толщиной ~200 мкм с микротвёрдостью 5000–8000 МПа, сочетающий твёрдость с вязкостью, коррозионной стойкостью и плавным переходом к сердцевине; эффект упрочнения легированной стали 30ХГСА примерно на 60 % выше, чем углеродистой стали 45.

— В качестве основного метода упрочнения внутренних поверхностей деталей грунтовых насосов обоснована карбонитрация, обеспечивающая равномерную обработку внутренних полостей при минимальных деформациях; борирование рекомендовано как дополнительный метод для зон касательного абразивного изнашивания.

— Применение карбонитрации позволяет увеличить ресурс деталей в 2,4–3,6 раза при сроке окупаемости затрат менее одного года, что подтверждает эффективность предлагаемого решения для условий АО «Алмалыкский ГМК».

Использованная литература / References

- [1] Abulnaga B. E. Slurry Systems Handbook. — New York: McGraw-Hill, 2002. — 800 p.
- [2] Животовский Л. С., Смойловская Л. А. Лопастные насосы для абразивных гидросмесей. — М.: Машиностроение, 1978. — 223 с.
- [3] Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970. — 252 с.
- [4] Holmberg K., Matthews A. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering. — Amsterdam: Elsevier, 2009. — 560 p.
- [5] Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 256 с.
- [6] Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. — М.: Машиностроение, 1965. — 491 с.
- [7] Kulka M. Current Trends in Boriding: Techniques. — Cham: Springer, 2019. — 287 p.
- [8] García-León R. A., Martínez-Trinidad J., Campos-Silva I. Historical review on the boriding process using bibliometric analysis // Transactions of the Indian Institute of Metals. — 2021. — Vol. 74. — P. 541–557.
- [9] Чудина О. В., Постнова Е. А. Сравнительный анализ методов химико-термической обработки для

упрочнения деталей машин // Сборник научных трудов МАДИ. — М., 2024.

[10] Ulutan M., Yildirim M. M., Çelik O. N., Buytoz S. Tribological properties of borided AISI 4140 steel with the powder pack-boriding method // Tribology Letters. — 2010. — Vol. 38, No. 3. — P. 231–239.

[11] Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. — М.: Машиностроение, 1966. — 331 с.

[12] Виноградов В. Н., Сорокин Г. М. Износостойкость сталей и сплавов. — М.: Нефть и газ, 1994. — 417 с.

Информация об авторах/ Information about the authors

Убайдуллаев Музаффар Зайнулла угли / Muzaffar Ubaydullaev	Ассистент кафедры «Металлургия», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», г. Алмалык Тел.: +998 93 391 49 79 E-mail: muzaubaydullaev@gmail.com
Руклинская Елена Игоревна / Elena Ruklinskaya	Ассистент кафедры «Металлургия», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», г. Алмалык Тел.: +998939190281 E-mail: ruklinskayaelena97@yandex.ru
Косимов Умидбек Дилшод угли / Umidbek Kosimov	Ассистент кафедры «Авиационный инжиниринг» Ташкентского государственного транспортного университета Тел.: +99897 761 99 16 E-mail: umidbek.k@yandex.ru
Ёдгоров Нусратилла Нигмат угли / Nusratilla Yodgorov	Студент кафедры «Металлургия», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», г. Алмалык Тел.: +998772759030 E-mail: nusret.yodgorovich@gmail.com
Хавасова Нихола / Nikhola Khavasova	Студент кафедры «Металлургия», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», г. Алмалык E-mail: xavasovanihola@gmail.com



Z. Ergasheva*Simulation model of railway terminal operation.....248***M. Ubaydullaev, E. Ruklinskaya, U. Kosimov,
N. Yodgorov, N. Khavasova***Secondary use of worn BelAZ tires for lining mining dump truck
bodies to prevent adhesion of rock mass.....253***M. Ubaydullaev, E. Ruklinskaya, U. Kosimov,
N. Yodgorov, N. Khavasova***Improving the wear resistance of internal surfaces of slurry pumps
in the flotation257***N. Tursunov, N. Kodirova, Z. Rakhmatova,
M. Abdulazizov***Investigation of the mechanism and factors influencing the process
of dephosphorization during the smelting of 20GL steel.....262*