

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ГУСЕНИЧНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ – КОРПУС – КАБИНА – СИДЕНЬЕ – ОПЕРАТОР»

К. Дж. Мухиддинзода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

Для решения задачи расчетной оценки уровня вибраций на месте водителя, вызванных взаимодействием опорных катков со звенчатой гусеницей в опорной ветви, необходимо использовать математическую модель, описывающую динамику системы «грунт – гусеница – тележки – корпус – кабина – виброзащитное сиденье – оператор».

Ключевые слова: микропрофиль, кресло, водитель, грунт, гусеница, тележки, виброзащитное сиденье – оператор, тележка трактора.

МОДЕЛИ МАТЕМАТИКИ ВА СИСТЕМАИ ДИНАМИКИИ ҲАРАКАТИ ТАСМАЧАРХ ТАНА-КАБИНА - НИШАСТГОҶИ РОНАНДА

К. Ҷ. Мухиддинзода

Барои ҳалли масъалаи баҳодихии сатҳи ларзиш дар ҷои ронанда, ки аз ҳамкориҳои каткаҳои таҷағоҳ бо тасмачархи пайванддор дар шохаи таҷағоҳ ба вуҷуд омадааст, модели математикӣ истифода бурдан лозим аст, ки динамикаи системаи хок тасмачархи ароба тана кабина курсии ларзиши ронанда – ро тасвир мекунад.

Калидвожаҳо: микропрофил, курсӣ, ронанда, хок, тасмачарх, ароба, курсии ларзиш – ронанда, аробаи трактор.

MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMIC SYSTEM "CATERPILLAR PROPULSION – BODY – CABIN – SEAT – OPERATOR" BY

K.J. Muhiddinzoda

To solve the problem of calculating the level of vibrations in the driver's seat caused by the interaction of support rollers with a link track in the support branch, it is necessary to use a mathematical model describing the dynamics of the "ground – track – bogies – body – cabin – vibration-proof seat – operator" system.

Keywords: micro profile, armchair, driver, ground, track, trolleys, vibration-proof operator seat, tractor trolley.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили пакеты программ, предназначенные для моделирования динамики различных объектов (ADAMS [7], Ansys Motion [6]). В этих пакетах имеются встроенные средства для построения различных объектов, в т.ч. автомобилей и гусеничных машин. Модель динамической системы промышленного трактора может быть полностью построена в таком пакете. Подобные модели можно использовать для расчета непродолжительных процессов (например, переезда одиночной неровности). При моделировании движения по протяженному участку трассы время расчета оказывается неприемлемо большим.

Как показал предварительный анализ, динамические составляющие нагрузок, вызванные колебаниями трактора при движении, существенно меньше статической нагрузки. Это позволяет рассмотреть подсистему «грунт – тележка трактора» отдельно, считая, что она нагружена статическим весом корпуса [1]. При этом может быть использована модель, подробно описывающая тележку, опорные катки, ведущее и направляющее колеса, разработанная в пакете программ Ansys Motion.

По результатам расчета движения по заданному грунту с определенной скоростью могут быть получены процессы изменения вертикального перемещения оси ведущего колеса ($Z_T(t)$) и угол поворота тележки относительно горизонтали ($\varphi_T(t)$) (рисунок 1) [1].

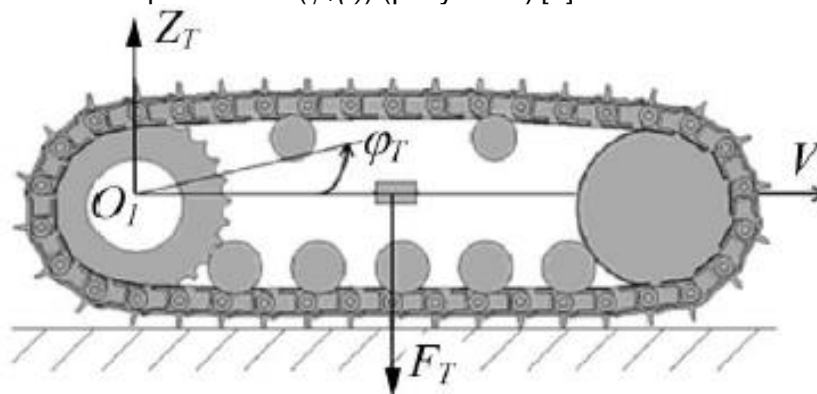


Рисунок 1 – Расчетная схема математической модели тележки трактора

Таким образом, при разработке математической модели трактора с полужесткой подвеской приняты следующие допущения:

- Рассматриваются только вертикальные и продольно-угловые колебания, вызванные движением трактора по звенчатой гусенице.
- Рассматривается движение трактора со скоростью, изменяющейся по случайному закону.
- Грунт моделируется упругопластической средой. В стандарте [4] предписывается проводить натурные испытания по определению вибраций на участке, полученном в результате выполнения технологической операции (например, бульдозирования), при этом микропрофиль трассы не регламентируется. В связи с этим в данном исследовании моделирование движения проводится для ровного участка трассы.
- Предполагается, что колебания корпуса трактора не оказывают влияние на колебания тележек, вызванные движением по звенчатой гусенице, лежащей на грунте.
- Считается, что колебания тележек происходят синфазно и синхронно (наихудший случай).
- Динамическая система рассматривается как линейная, при этом инерционные, упругие и демпфирующие характеристики подсистемы «кресло – водитель» корректируются в зависимости от массы водителя.

Предлагаемая математическая модель позволяет исследовать низкочастотные колебания на месте оператора-водителя промышленного трактора, вызванные движением опорных катков по звенчатой гусенице.

При использовании подробной модели гусеничной тележки, включающей гусеничную ленту, опорные катки, направляющие и ведущие колеса, появляется возможность исследовать влияние свойств грунта, расстановки опорных катков и формы башмаков гусеницы на вибрационную нагруженность рабочего места оператора [3]. По результатам испытаний при случайной нагрузке определены сертификационные характеристики сиденья. Полученные характеристики в дальнейшем будут использованы для создания математической модели виброизолирующего сиденья. С помощью математической модели будут проведены расчеты по оптимизации характеристик виброизолирующего сиденья [2]. Эти изменения обеспечивают снижение виброускорений до уровней, не превышающих санитарные нормы. Изменения могут быть осуществлены за счет использования гидроопор кабины с другими характеристиками и изменения характеристик гидравлического амортизатора системы подрессоривания сиденья [8-12].

Тестовые расчеты и проверка адекватности модели

Моделирование движения гусеничного движителя по грунту включало следующие этапы:

- погружение гусеничного движителя в грунт под действием силы, равной весу половины трактора;
- движение системы с постоянным ускорением и в дальнейшем с постоянной скоростью.

После проведения расчетов были получены процессы изменения во времени координат различных элементов движителя. На рисунке 2 в качестве примера представлены просадки движителя в различные виды грунта. Горизонтальная линия отображает нулевой уровень почвы. Хорошо видно, что в самый жесткий грунт погрузились только концы грунтозацепов; в грунт со средней жесткостью грунтозацепы погрузились почти полностью и в самый мягкий грунт погрузились не только грунтозацепы, но и частично башмаки траков.

С помощью разработанной модели была выполнена серия тестовых расчетов движения по рассматриваемым грунтам. В результате расчета получают процессы вертикального перемещения оси ведущего колеса $Z_T(t)$ и углового перемещения тележки и $\varphi_T(t)$. Поскольку тележка двигалась с постоянной скоростью, $Z_T(t)$ и $\varphi_T(t)$ являются периодическими процессами с одинаковой частотой, соответствующей частоте следования траков гусеницы (рисунок 3).

Угловые и вертикальные перемещения оказались наибольшими при движении по жесткому грунту, в который грунтозацепы траков практически не погружались. На мягком грунте, с которым траки контактировали всей опорной поверхностью, перемещения оказались наименьшими.

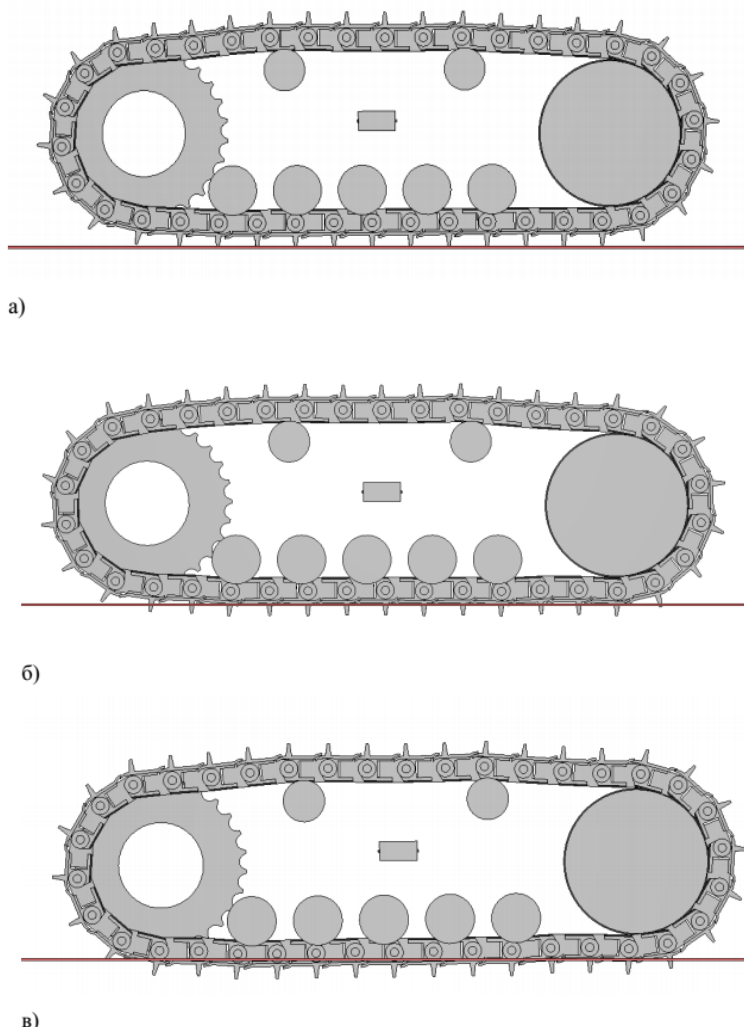


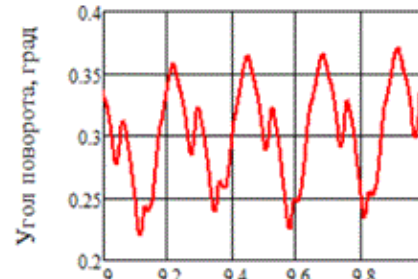
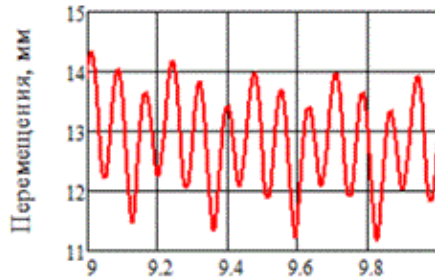
Рисунок 2 – Погружение гусеницы в грунт: а) глина; б) суглинок; в) супесь

Для проверки адекватности модели были использованы результаты экспериментальных исследований, проводившихся в 2002г. [5]. Во время проведения эксперимента трактор двигался по трассам с различным грунтом, свойства трех видов грунта, используемого в расчетных исследованиях, близки к свойствам грунтов, на которых проводился эксперимент.

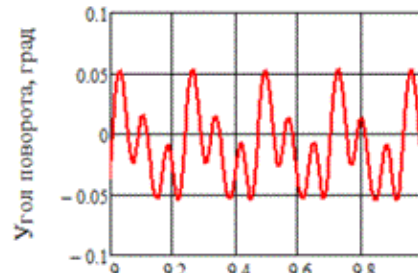
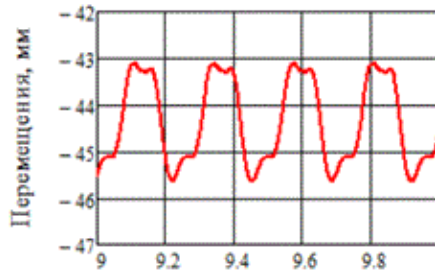
На корпусе и тележке трактора были установлены акселерометры и регистрировались виброускорения при движении по различным грунтам с различными скоростями; также производилась видеосъемка.

Для определения относительных углов поворота траков использованы результаты видеосъемки. При проведении эксперимента камера была установлена неподвижно. Фрагмент видеозаписи движения катков по опорной ветви гусеницы был разбит на отдельные кадры и были выбраны кадры, соответствующие максимальному (φ_1) и минимальному (φ_2) углам относительного поворота средних траков. Размах угла относительно поворотов определялся как разность этих значений: $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ (рисунок 4).

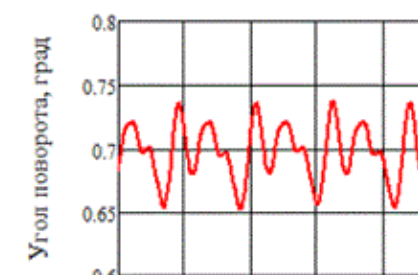
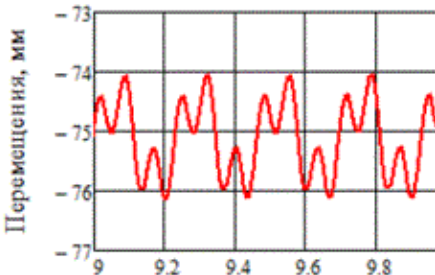
Глина



Суглинок



Супесь



Время, сек

Время, сек

Время, сек

Время, сек

Рисунок 3 – Процессы изменения вертикального перемещения и углов поворота тележки гусеничного движителя для различных видов грунта

Для каждого вида грунта была проведена серия измерений (по различным кадрам видеозаписи), результаты осреднены. Размахи относительных углов поворота траков также были получены при моделировании движения тележки.

Результаты расчета и экспериментальные данные представлены на рисунке 5. Как показывает анализ результатов, углы относительного поворота траков не превышают 3,5 градусов. При этом наибольшие углы соответствуют движению по суглинку. Отличие экспериментальных и расчетных данных не превышает 10%. Следует отметить, что при небольших углах поворота использованный метод экспериментального определения углов по результатам видеосъемки имеет невысокую точность.

В процессе проведения испытаний регистрировались виброускорения тележки в вертикальном направлении в зонах ведущего и направляющего колес. В результате обработки этих данных были получены значения среднеквадратических ускорений в низкочастотной области (до 20 Гц). Аналогичные данные были получены и при моделировании движения тележки. Расчетные и экспериментальные результаты представлены на рисунке 6.



Рисунок 4 – Пример определения относительного угла поворота траков [5]

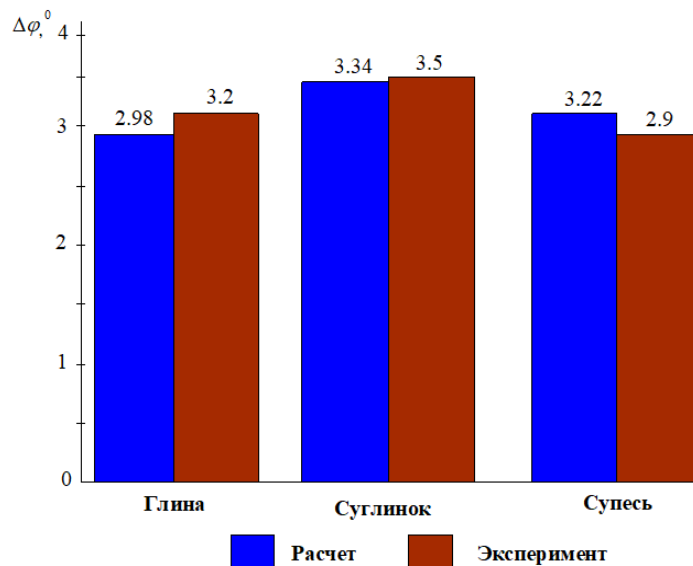


Рисунок 5 – Размах относительных углов поворота траков в опорной ветви при движении по различным грунтам (расчет и эксперимент)

Анализ представленных данных показывает, что во всех экспериментах и расчетах вибрации в зоне направляющего колеса оказались больше, чем в зоне ведущего. Наибольшие виброускорения зарегистрированы при движении по жесткому грунту (глина). Наименьшим виброускорениям в зоне направляющего колеса соответствует движение по грунту средней жесткости (суглинок).

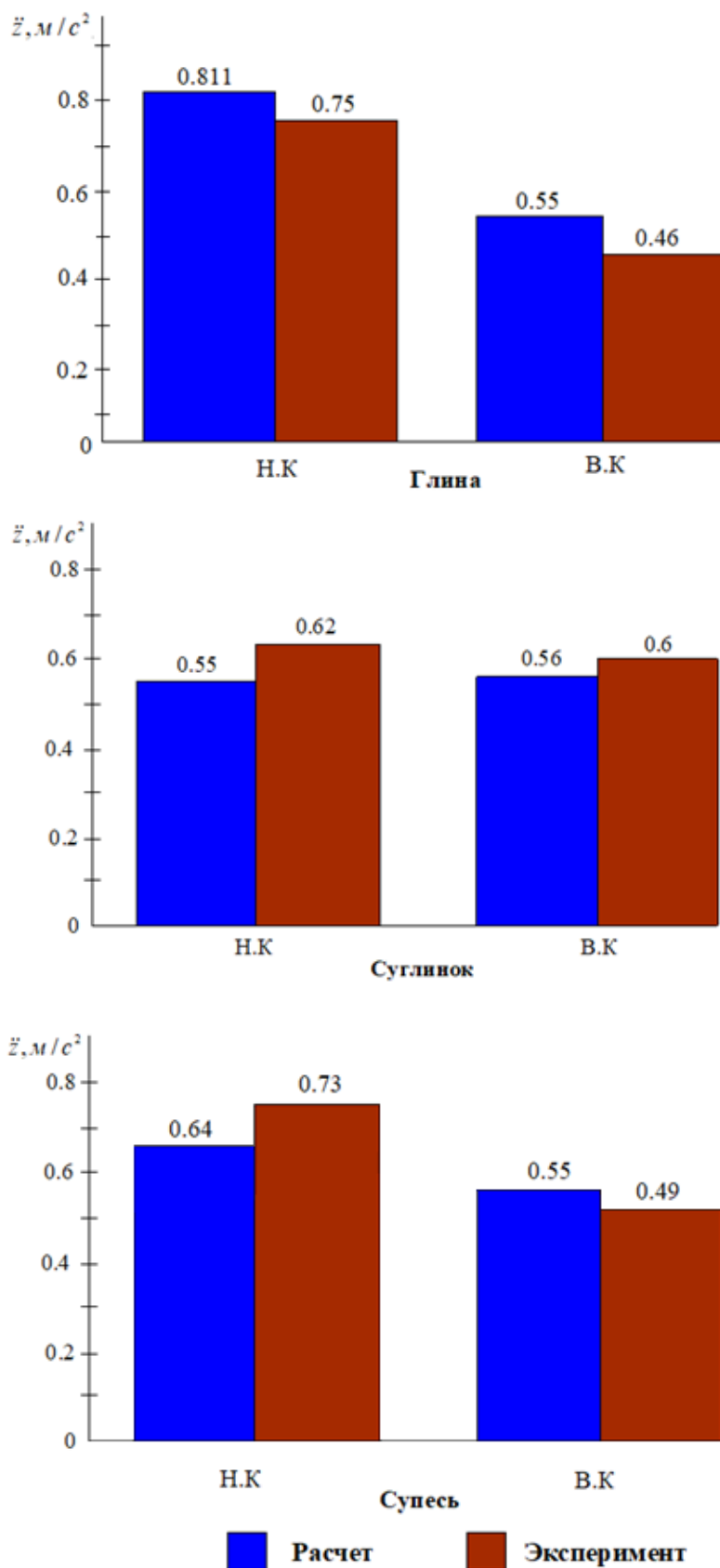


Рисунок 6 – Среднеквадратичные значения виброускорений тележки в зонах ведущего и направляющего колес [5]

Вибрации в зоне ведущего колеса мало зависят от характеристик грунта. Различие экспериментальных и расчетных результатов не превышает 15%. Следует отметить, что на экспериментальные данные оказывали влияние вибрации со стороны двигателя трактора, не учитываемые в расчете.

Очевидно, что на колебания тележки трактора при движении существенное влияние будет оказывать расстановка опорных катков. Так, например, в случае, если расстояние между опорными катками кратно шагу гусеницы, они одновременно будут наезжать на середины траков и одновременно попадать в область шарниров гусеницы. При этом будут преобладать вертикальные колебания тележки. Если же расстояние между катками кратно полуторному шагу гусеницы – следует ожидать увеличения амплитуды угловых колебаний тележки.

Для исследования влияния расстановки опорных катков на колебания тележки были проведены дополнительные расчеты.

Выводы

Разработанная математическая модель динамической системы трактора с полужесткой подвеской, в отличие от ранее разработанных, использует подробную модель гусеничного движителя и его взаимодействия с грунтом. Это позволяет при моделировании динамики учесть влияние нелинейных упругих характеристик грунта, реальную форму опорной поверхности траков, натяжение гусеницы, расстановку опорных катков и ряд других факторов.

Проверка адекватности модели выполнена на основе сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными Д.В. Хрипунова. Различие экспериментальных и расчетных среднеквадратических значений виброускорений в двух зонах гусеничной тележки не превышает 15%. Расчетные и зарегистрированные экспериментально размахи взаимных углов поворота траков не превышают 10%.

Исследовано влияние расстановки траков на колебания тележки трактора. Показано, что при расстановке катков с переменным шагом размах угловых колебаний уменьшился на 25% при увеличении вертикальных на 9%.

Рецензент: Туломзода Қ.Х. — к.т.н., доцент, заместитель директора Государственного учреждения «Автомобильный транспорт и логистическое обслуживание»

Литература

1. Абызов, А.А. Моделирование динамики промышленного трактора при низкочастотном вибровозбуждении со стороны гусеничного движителя / А.А. Абызов, К.Дж. Мухиддинзода, С.Г. Некрасов // Вестник ЮУрГУ. Серия "Машиностроение". - 2023. - Т. 23, № 1. - С. 63-72. DOI: [10.14529/engin230106](https://doi.org/10.14529/engin230106)
2. Абызов, А.А. Экспериментальные исследования и идентификация модели динамической системы "виброзащитное кресло - оператор" мобильной машины / А.А. Абызов, К.Дж. Мухиддинзода // Вестник Южно-Уральского государственного университета. серия: Машиностроение. - 2023. - т. 23. - №. 4. - с. 69-79.
3. Abyzov A.A., Pronina Y.O., Muhiddinzoda K.J. Experimental Study of the Dynamic Characteristics of the Anti-vibration Industrial Tractor Operator's Seat // International Conference on Industrial Engineering. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 421-430.
4. ГОСТ 12.2.122–2013 Система стандартов безопасности труда тракторы промышленные методы контроля безопасности М: Стандартинформ, 2014. – 18 с.
5. Хрипунов, Д.В. Методы оценки вибронагруженности промышленного трактора со стороны гусеничного движителя: автореферат дис. канд. техн. наук / Д.В. Хрипунов. – Челябинск, 2002. – 22с.
6. Ansys Motion Multibody Dynamics Simulation Software. – <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-motion> (date of access:10.01.2023)
7. Yin H. B., Dynamic performance simulation of a tracked vehicle with ADAMS tracked vehicle toolkit software/ Yin H. B., Shao P. L. //Asian Simulation Conference. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. – С. 553-558.

8. Абызов, А.А., Мухиддинзода К.Дж. Расчетные исследования и рекомендации по снижению вибронгруженности рабочего места оператора промышленного гусеничного трактора / А.А. Абызов, КДж. Мухиддинзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – №1. 69. С.72-78.

9. Хакдод, М. М. Моделирование процесса шумообразования при соударение деталей машин и методика исследования акустодемпфирующих свойств материалов / М. М. Хакдод, Б. Н. Одиназода, Ш. А. Бозоров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 2(62). – С. 100-105. – EDN YKIOGJ.

10. Бозоров, Ш.А., Одиназода Б.Н., Саидаи Д. [и др.] Вероятностная математическая модель поверхностного дефектообразования металлас учётом влияния факторов режима обжатий / Вестник Педагогического университета. Естественные науки. - 2020. - № 1-2(5-6). - С. 120-127. EDN: EOPBVD.

11. Бозоров, Ш. А. Моделирование закономерностей изменения показателей процесса пластического течения металла при прокатке высоких полос в скрещенных валках / Ш. А. Бозоров, Б. Н. Одиназода, М. Х. Саидов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - 2020. - №2(50). - С. 66-73. EDN: WYNBXJ.

12. Султонов, Х. Н. Повышение эффективности работы гусеничного движителя строительных машин / Х. Н. Султонов, Д. А. Шарифов, К. Д. Мухиддинзода // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2024. – № 2(6). – С. 4-8. – EDN CLQSAE.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ - INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Мухиддинзода Камолиддини Чамолиддн	Мухиддинзода Камолиддини Джамолиддин	Mukhiddinzoda Kamoliddin Jamoliddin
н.и.т. ассистент	к.т.н. ассистент	candidate of technical sciences, assistant
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik technical university named after academician M.S. Osimi
E-mail: kamoliddin.mukhiddinov@bk.ru		
ORCID: 0009-0000-8326-1801		