

ТЕХНОЛОГИЯИ МОШИНСОЗӢ – ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЕ – TECHNOLOGY OF MECHANICAL ENGINEERING

УДК: 624.04 (075)

DOI: 10.65599/TS2446

СТАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДОРОЖНО–СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА РАБОЧИХ ПЛОЩАДКАХ

К.З. Тиллоев, Б.Н. Акрамов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В материале рассматривается оценка статической устойчивости дорожно-строительных машин на наклонных рабочих площадках в условиях, отличных от обычной горизонтальной постановки. Для этого вводится в рассмотрение понятие продольной и поперечной устойчивости на основе нормальных реакций на колесах машин. Проанализированы условия статической устойчивости машины с учетом продольного и поперечного уклонов площадки. Получены расчетные зависимости для определения нормальных реакций на всех 4-х колесах машины, а также получены выражения для определения предельных углов продольной и боковой устойчивости. Показано влияние положения центра масс машины и углов наклона поверхности рабочей площадки на перераспределение нагрузок и условия опрокидывания. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации дорожно-строительных машин для обеспечения их безопасной работы на наклонных рабочих площадках.

Ключевые слова: устойчивость машины, условия опрокидывания, нормальные реакции, угол продольной устойчивости, угол боковой устойчивости, центр масс, опорный контур, условия предельной устойчивости.

БАҶОДИҶИИ СТАТИКӢ УСТУВОРИИ МАШИНОӢИ СОХТМОНИӢ РОҶСОЗӢ ДАР МАЙДОНҶОИ КОРӢ

Қ.З. Тиллоев, Б.Н.Акрамов

Дар мавод баҳодиҳии устувори статикии мошинҳои роҳсозии сохтмонӣ дар майдонҳои кори нишеб, дар шароити аз ҷойгиркунии маъмулии уфуқӣ фарқ мекунад, баррасӣ мешавад. Бо ин мақсад мафҳумҳои устувори дарозӣ ва уфуқӣ (пахлӯӣ) дар асоси реаксияҳои нормалӣ дар чархҳои мошин ба баррасӣ ворид карда мешавад. Шароити устувори статикии мошин бо дарназардошти нишебҳои дарозӣ ва паҳлӯии майдон таҳлил гардидааст. Вобастагиҳои ҳисобӣ барои муайян намудани реаксияҳои нормалӣ дар ҳамаи 4 чархи мошин ба даст оварда шудаанд, инчунин ифодаҳои барои муайян кардани кунҷҳои ҳадди устувори дарозӣ ва паҳлӯӣ ҳосил карда шудаанд. Таъсири мавқеи маркази массаи мошин ва кунҷҳои нишеби сатҳи майдони корӣ ба бозтақсимшавии борҳо ва шароити чаппашавӣ нишон дода шудааст. Натиҷаҳои бадастомада метавонанд ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодаи мошинҳои роҳсозии сохтмонӣ барои таъмини кори бехатари онҳо дар майдонҳои кори нишеб мавриди истифода қарор гиранд.

Калидвожаҳо: устувори мошин, шароити чаппашавӣ, реаксияҳои нормалӣ, кунҷи устувори дарозӣ, кунҷи устувори паҳлӯӣ, маркази вазнинӣ, контури таъягоҳ, шароити устувори ҳаддӣ

STATIC ASSESSMENT OF THE STABILITY OF ROAD CONSTRUCTION VEHICLES ON WORKING PLATFORMS

K.Z. Tilloev, B.N. Akramov

The material discusses the assessment of the static stability of road construction machinery on inclined working surfaces under conditions different from the usual horizontal setup. For this purpose, the concepts of longitudinal and transverse stability are introduced, based on the normal reactions at the machine's wheels. The conditions for the static stability of the machine, taking into account both longitudinal and transverse slopes of the working surface, have been analyzed. Analytical relationships have been derived for determining the normal reactions at all four wheels of the machine, as well as expressions for calculating the limiting angles of longitudinal and lateral stability. The influence of the machine's center of mass position and the inclination angles of the working surface on load redistribution and tipping conditions is demonstrated. The results obtained can be applied in the design and operation of road construction machinery to ensure safe operation on inclined working surfaces.

Keywords: machine stability, tipping conditions, normal reactions, longitudinal stability angle, lateral stability angle, center of mass, support base, limiting stability conditions.

Введение

Эксплуатация дорожно-строительных машин при работе уклонных местностей представляет определенный риск и осложняет работу персонала. Прежде всего, это риск опрокидывания машины при воздействии внешних нагрузок, что может привести к низкой производительности работы. Устойчивость машины на крутых склонах определяется главным образом двумя факторами - такими параметрами машины как опорная база в продольном и поперечном сечениях. Расположение центра тяжести всей конструкции (машина плюс рабочее оборудование). Но здесь большую роль играет и умение оператора машины обеспечить надлежащую установку машинного агрегата на рабочей площадке. Ему необходимо так установить машину с установленным на ней оборудованием, чтобы центр тяжести сечения располагался внутри опорной базы машины. Разумеется ему надо знать и

параметры устойчивости машины и характерные особенности рабочей площадки – уклоны, неровности, особенности грунта и т.д. Важно дать ему и помощь в данном вопросе – умение оценить эти параметры [1- 3].

В данной работе рассматривается только статическая устойчивость на опрокидывание, а динамическая устойчивость оставлена вне рамок исследования. Состояние статической устойчивости предполагает, что имеет место статическое равновесие системы, т.е. внешние нагрузки, действующие на машину, постоянны как по величине, так и по направлению. Это позволяет составить уравнения статического равновесия. Нарушение этих условий может привести к мгновенному опрокидыванию машины, т.е. к потере ею статического равновесия.

Особую ценность имеет предельная устойчивость на опрокидывание, т.е. такое состояние положения равновесия, когда система находится на грани опрокидывания. Под опрокидыванием мы здесь будем понимать поворот корпуса машины вокруг некоторой воображаемой неподвижной оси - оси опрокидывания. Очевидно, что в состоянии статического равновесия положение мгновенных возможных осей опрокидывания не должно быть переменным, потому что оно зависит исключительно от параметров и конструкции ходовой части машины, а также расположения центра тяжести машины [4- 6].

Естественно, что в зависимости от конфигурации площадки (горизонтальная, наклонная в одном или в нескольких направлениях и т.д.) возможно опрокидывание относительно продольной оси машины, или же вокруг ее боковой линии. Можно сказать, что возможные линии опрокидывания образуют замкнутый контур, который назовем опорным контуром машины. Конфигурация и размеры опорного контура зависят, следовательно, от положения осей опрокидывания, а также от размеров базы и колеи ходовой части машины [7].

В настоящей работе рассматривается статический случай, при котором силы, действующие на машину (стоящую на рабочей площадке), постоянны по величине и направлению. В условиях статического равновесия суммарный момент всех сил (как опрокидывающих, так и удерживающих) относительно возможной оси опрокидывания должен быть равен нулю. Нарушение этого равновесия приводит к мгновенному переходу машины в неустойчивое состояние.

Теоретическая часть

Рассмотрим вначале общий случай постановки дорожно-строительной машины колесного типа (особенности расчета для машины на гусеничном ходу будут рассмотрены позднее). Рабочая площадка представляет собой наклонную плоскость, моделируемую 2-мя уклонами в продольном α_0 и поперечном α_s направлениях (рис. 1). Их связь с параметрами площадки и установки машины на площадке (α - угол наклона площадки к горизонту и ψ - положение машины на ней) имеет вид [8]:

$$\sin \alpha_0 = \sin \alpha \cdot \sin \psi ; \sin \alpha_s = \sin \alpha \cdot \cos \psi$$

Вес машины и установленного на ней оборудования (с грузом) G (внешняя нагрузка), приложен в точке C с координатами l_1 и h_c (центр масс конструкции). Этот вес представим в виде 3-х компонент — нормальной $G_N = G \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s$, продольной $G_t = G \sin \alpha_0$ и поперечной $G_s = G \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s$. Их связь с G :

$$G = \sqrt{G_N^2 + G_s^2 + G_t^2}$$

От внешней нагрузки в опорной площадке возникнут реактивные силы: нормальные на задних колесах $R_{A,B} = R_{\kappa 1}$ и $R_{B,\Gamma} = R_{\kappa 2}$, боковые на левых и правых колесах $S_{A,B}$ и $S_{B,\Gamma}$ и касательные T_1 и T_2 . Их связь с компонентами G определяется третьим законом Ньютона.

В данном случае вполне правомерно рассматривать действующие силы как плоскую систему сил, имеющую три уравнения равновесия. Из этих уравнений равновесия получаются следующие окончательные выражения для нормальных реакций на колесах A и B (передних), B и Γ (задних);

$$R_A = \frac{1}{2} G \xi_A ; R_B = \frac{1}{2} G \xi_B ; R_B = \frac{1}{2} G \xi_B ; R_\Gamma = \frac{1}{2} G \xi_\Gamma ,$$

здесь ξ_i ($i=A,B,B,\Gamma$) – коэффициенты, определяющие распределение нормальных реакций между опорами машины:

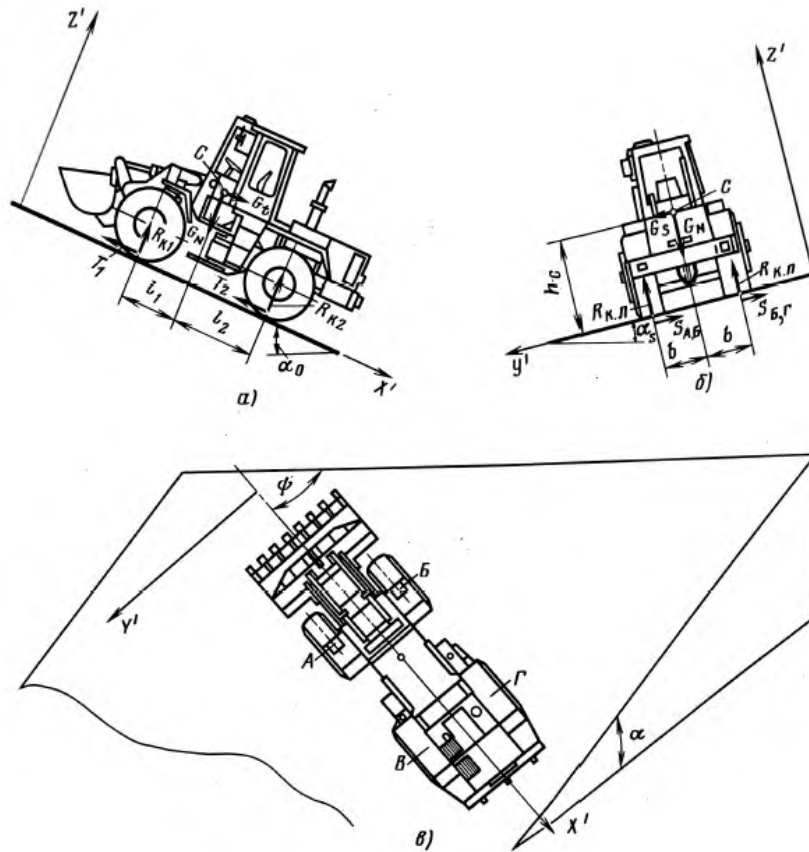


Рисунок 1 – Схема взаимодействия машины с рабочей площадкой

$$\xi_A = \frac{l_2}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s \pm \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 + \frac{l_2}{L} \cdot \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s \quad (1)$$

$$\xi_B = \frac{l_2}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s \pm \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 - \frac{l_2}{L} \cdot \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s \quad (2)$$

$$\xi_B = \frac{l_1}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s \mp \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 + \frac{l_1}{L} \cdot \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s \quad (3)$$

$$\xi_\Gamma = \frac{l_1}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s \mp \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 - \frac{l_1}{L} \cdot \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s \quad (4)$$

Эти выражения носят общий характер, поэтому используем их для проверки правильности полученных выражений. Для установки машины на горизонтальной плоскости имеем $\alpha_0 = \alpha_s = 0$ и получаем:

$$\xi_A = \xi_B = l_2 / L; \quad \xi_B = \xi_\Gamma = l_1 / L.$$

По полученным коэффициентам распределения нагрузки между опорами ξ_i (для каждого колеса) найдем суммарные нормальные реакции на передних и задних колесах машины $R_{к1}$ и $R_{к2}$ и на ее левых и правых колесах $R_{к.л}$ и $R_{к.п}$:

$$R_{к1} = R_A + R_B = \frac{1}{2} G(\xi_A + \xi_B) = \frac{1}{2} G\xi_1;$$

$$R_{к2} = R_B + R_\Gamma = \frac{1}{2} G(\xi_B + \xi_\Gamma) = \frac{1}{2} G\xi_2;$$

$$R_{к.л} = R_A + R_B = \frac{1}{2} G(\xi_A + \xi_B) = \frac{1}{2} G\xi_l;$$

$$R_{к.п} = R_B + R_\Gamma = \frac{1}{2} G(\xi_B + \xi_\Gamma) = \frac{1}{2} G\xi_{п},$$

где

$$\xi_1 = 2 \left(\frac{l_2}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s \pm \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 \right); \quad (5)$$

$$\xi_2 = 2 \left(\frac{l_1}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s \mp \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 \right); \quad (6)$$

$$\xi_n = \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s + \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s; \quad (7)$$

$$\xi_n = \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s - \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s. \quad (8)$$

В выражениях (5) и (6) верхние знаки используем при установке машины вниз по уклону, а нижние знаки относятся к случаю установки машины вверх по уклону (см. рис. 1, а).

Результаты анализа

Очевидно, что при опрокидывании реакции в опорах будут равны нулю и таким образом потеря контакта с основанием означает потерю устойчивости. Поэтому, приравняв их нулю, найдем условия, определяющие предельную устойчивость машины.

Условием продольного опрокидывания (рис. 1, а) является условие:

$$R_{x1} = \frac{1}{2} G \xi_1 = 0 \text{ или, что-то же } \xi_1 = 0.$$

С учетом (5)

$$\frac{l_2}{L} \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s - \frac{h_c}{L} \sin \alpha_0 = 0$$

При $l_1 = l_c$ находим угол продольной устойчивости $\alpha_{0\max} = \alpha_{ycm}$ - критическое значение угла наклона машины, превышение которого приведет к опрокидыванию:

$$\tan \alpha_0 = \tan \alpha_{0\max} = \frac{l_c}{h_c} \cos \alpha_s,$$

$$\tan \alpha_{ycm} = \frac{h_c}{L} \cos \alpha_s. \quad (9)$$

Из этой зависимости видна обратная связь α_{ycm} от α_s - увеличение α_s ведет к уменьшению. При горизонтальной площадке ($\alpha_s = 0$):

$$\tan \alpha_{ycm} = \frac{l_c}{h_c}. \quad (10)$$

Прделаем тоже самое для поперечной устойчивости. Потеря боковой устойчивости (рис. 1, б) наступит при потере контакта с площадкой колес на верхней части склона, т.е. при условии

$$R_{x,n} = \frac{1}{2} G \xi_n = 0 \text{ или } \xi_n = 0.$$

Отсюда получим:

$$\cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s - \frac{h_c}{b} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_s = 0.$$

Приняв $b = b_c$ (поперечная координата ЦМ) и разделив обе части уравнения на $\cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_s$ получим:

$$\tan \alpha_{ycm} = \frac{b_c}{h_c}, \quad (11)$$

здесь α_{ycm} - угол боковой устойчивости машины.

Из этих выражений видна следующая возможность. Если машина установлена на уклоне, углы которого α_0 и α_s меньше, чем α_{ycm} в продольном и поперечном направлениях, то разность этих величин определяет так называемый запас угла устойчивости:

$$\alpha_{зан} = \alpha_{ycm} - \alpha_0 \text{ или } \alpha_{зан} = \alpha_{ycm} - \alpha_s \quad (12)$$

Эти углы являются удобной оценкой устойчивости расположения машины на рабочей площадке. Для дорожно - строительных машин на гусеничном ходу все указанное выше имеет место только с учетом небольших изменений [9-15]. Рассмотрим их. Зависимость (11) применим к x_0 - центру давления гусеничного хода. Приравняв x_0 нулю (условие опрокидывания - центр давления выходит за пределы опорного контура машины), получим:

$$l_c - h_c \cdot \tan \alpha = 0, \\ \tan \alpha_{max} = \tan \alpha_{ycm} = l_c / h_c$$

Для реальных условий машина должна иметь запас устойчивости. Для гусеничных машин он определяется предельным положением x_0 , при котором машина еще может работать: $x_0 = \frac{1}{6}L$, где L – опорная длина гусениц. Запас прочности составит:

$$\tan \alpha_{зан} \geq \frac{l_c - L/6}{h_c}. \quad (13)$$

Возможен также дополнительный наклон (крен) на угол α_n , обусловленный деформацией опор машины (неравномерность распределения нормальных нагрузок между колесами из-за рельефа рабочей площадки или из-за неодинакового давления воздуха в шинах машины):

$$\alpha_n = \frac{G \cos \alpha - L/6}{c_1 L} - \frac{M_{зан}}{L^2} \cdot \frac{c_1 + c_2}{c_1 \cdot c_2}, \quad (14)$$

здесь $M_{зан}$ – момент запаса устойчивости машины; c_1 и c_2 – приведенные жесткости площадки и опор машины; L – либо база ходовой части машины (для продольного крена), либо колея ходовой части (для поперечного крена).

Для $\alpha = 0$, $c_1 = c_2 = c$ и $M_{зан} = M_{ycm} = GL/2$ угол крена $\alpha_n = 0$.

Таким образом, окончательно имеем общий запас устойчивости машины на наклонной площадке:

$$\alpha_{зан} = \alpha_{ycm} - \alpha - \alpha_n \quad (15)$$

Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что устойчивость машины против опрокидывания определяется величинами нормальных реакций на опорах (колесах или гусеницах) дорожно-строительной машины, и она зависит от конструктивных параметров ходовой части, положения центра масс, а также от продольного и поперечного уклонов рабочей площадки. Критическим условием потери устойчивости является равенство нулю нормальной реакции на колесах, расположенных со стороны, противоположной оси опрокидывания, что свидетельствует о потере контакта с опорной поверхностью или выход положения центра давления за пределы опорной поверхности гусениц.

Получены выражения для определения предельных углов продольной и боковой устойчивости, позволяющие количественно оценивать запас устойчивости машины при работе на уклонах. Установлено, что увеличение бокового наклона снижает продольную устойчивость, что необходимо учитывать при эксплуатации техники в сложных рельефных условиях.

Практическое значение работы заключается в возможности использования представленных зависимостей для расчета устойчивости при проектировании машин, а также при разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации техники на наклонных площадках.

Рецензент: Мирзоалиев И. — к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» ЛПИУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Шарифов Д.А. Механизация и автоматизация в строительстве. Учебное пособие для студентов строительных специальностей. / Д.А. Шарифов, К.З. Тиллоев. Вторая часть – Душанбе ТТУ имени академика М.С. Осими, 2023 – 116 срт.
2. Баловнев В.И. Машины для земляных работ. Контракция. Расчет. Потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 2. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины: ученое пособие для вузов / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов и др.; под общ. Ред. В.И. Баловнева. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 464 с.

3. Артемьев К.А. Дорожные машины: учебник для вузов: в 2 ч. Ч.2. Машины для устройства дорожных покрытий / К. А. Артемьев, Т. В. Алексеева, В. Г. Белокрылов. - М.: Машиностроение, 1982. - 397с.
4. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. (2020) Promising Machine for Compacting Road-Building Materials. Proceedings of the 5th International /E.I. Kromsky, S.V. Kondakov, K.Z. Tilloev// Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol. 1. – P. 21–28. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_3.
5. Баловнев В.И. Машины для земляных работ: конструкция, расчет, потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 1 Экскаваторы и землеройно-транспортные машины: учеб. пособие для вузов / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов [и др.]. – Белгород: Изд-во Белгород. гос. техн. ун-та, 2011 – 401 с.
6. Тиллоев, К.З. Методика расчета устойчивости экскаватора, оборудованного конусным раскатчиком / К. З. Тиллоев, С.В. Кондаков // Грузовик. – 2021. – № 7. – С. 41-44. – EDN ZITTHV.
7. Тиллоев, К.З. Эффективность комбинационного воздействия статических и динамических сил на дисперсионный материал / К.З. Тиллоев // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 4(12). – С. 9-14. – DOI 10.65599/VILT2001. – EDN GJWHSC.
8. Семенов А.В., Вахрушев С.И. Исследование устойчивости одноковшовых экскаваторов / А.В. Семенов, С.И. Вахрушев // Master`s Journal. – 2016. – №2. – С. 424-434.
9. Гоберман Л.А. Основы теории расчета и проектирования строительных и дорожных машин: Учебник для техникумов. / Л.А. Гоберман – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.: ил.
10. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет/ Хархута Н.Я., Капустин М.И., Семенов В.П., Эвентов Й.М. Изд-во «Машиностроение» 1976-472с.
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. Классификация системы ВАДС / А.М. Умирзоков, К.Т. Мамбеталин, С.С. Сайдуллозода [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1(45). – С. 187-193. – EDN CXUEPR.
13. Тиллоев, К.З. Методика проведения экспериментальных исследований для определения бокового усилия конусного раскатчика при внедрении в грунт / К.З. Тиллоев // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2024. – № 4(8). – С. 4-8. – EDN VEMJUC.
14. Бабаева, А.Х. О явлении пульсирования массы и вращения слоев сырьевых валика при механике движения хлопка / А.Х. Бабаева // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2024. – № 1(5). – С. 4-8. – EDN KSKSXF.
15. Акрамов, Б.Н. Развитие технологии приготовления топливных брикетов из биомассы за счет использования специального конвейера с волновым приводом / Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаатов // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 4(12). – С. 4-8. – DOI 10.65599/RDLI1167. – EDN MJTHJB.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич	Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич	Tilloev Kudratullo Zuvaidulloevich
н.и.т., муал. калон	к.т.н., ст. преподаватель	candidate of technical sciences, senior lecturer
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: kudratullo.tiloev@bk.ru		
ORCID ID: 0000-0001-7186-3012		
TJ	RU	EN
Акрамов Баҳром Ниёзович	Акрамов Баҳром Ниязович	Akramov Bahrom Niyazovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	candidate of Technical Sciences, associate Professor
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: akramov57@bk.ru		
ORCID ID: 0000-0002-0049-0463		