

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_2_1

XFTAP 55.57.33

ҮЙІНДІ ЖҰМЫС ЖАБДЫҚТАРЫН ТЕОРИЯЛЫҚ ТАЛДАУ ЖӘНЕ ЖЕТІЛДІРУ ЖОЛДАРЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОТВАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

THEORETICAL ANALYSIS AND WAYS TO IMPROVE BLADE WORKING EQUIPMENT

Б.Қ. Ауқенова ¹, А.К. Айтказина ^{2*}, Д.С. Кабдуллина ³,
Г.Б. Жексембинова ⁴, Т.Т. Leśniewski ⁵

⁵

^{1,2,3,4} Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

⁵ Люблин технологиялық университеті, Люблин қ., Польша

*Жауапты автор: Айтказина Аяжан Калелхановна, e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

пышақ, бульдозер,
топырақты кесу,
топырақты кесуге кедергі
күші, пышақты
тереңдету, пышақтың
пішіні, сызу призмасы,
үйінді бетінің қисықтық
радиусы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бульдозерлердің және басқа да жер қазу-көлік машиналарының үйінді жұмыс органдарының топырақты кесу саласындағы белгілі әлемдік зерттеулерге шолу және талдау бульдозерлердің жаңа жұмыс органдарын жаңғыртуды немесе әзірлеуді негіздеуге, мүмкін дәстүрлі емес нысанда және олардың жұмыс процесінің тиімділігін растауға бағытталған. Шолуды талдаудан топырақты кесудің бүкіл процесінің өнімділігі мен тиімділігі бульдозерлердің немесе автогрейдерлердің үйінді жұмыс органдарының дизайнына немесе жағдайына байланысты екені белгілі болады. Пышақты орнату бұрышын және оның бетінің қисықтық радиусын өзгерту, пышақтың қазу кедергісі мен тереңдеуіне әсер етеді, процестің өнімділігі мен жұмыс тиімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Әлемдік зерттеушілер қазірдің өзінде көптеген мәселелерді қарастырды және осы шолу мақаласында келтірілген олардың жұмысын талдау зерттеулердің, модельдеудің және эксперименттік тәжірибелердің дұрыс бағытын таңдауға мүмкіндік береді. Эксперименттік жұмыстардың нәтижелері және соңғы элементтерді модельдеу әсіресе құнды. Талданатын көздерден топырақты кесуді зерттеумен және жаңа жұмыс жабдықтары мен эксперименттік стендтердің конструкцияларын әзірлеумен айналысатын ғылыми зертханалар туралы мәліметтер алынды.

Ключевые слова:

отвал, бульдозер, резание
грунтов, сила
сопротивления резанию
грунтов, заглубление
отвала, форма отвала,

АННОТАЦИЯ

Данный обзор и анализ известных мировых исследований в области резания грунтов отвальными рабочими органами бульдозеров и других землеройно-транспортных машин направлен на обоснование модернизации или разработки новых рабочих органов бульдозеров, возможно нетрадиционной формы и подтверждение



© 2026 Б.Қ. Ауқенова, А.К. Айтказина, Д.С. Кабдуллина,

Г.Б. Жексембинова, Т.Т. Leśniewski

Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы

(CC BY 4.0) бойынша таратылады.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

призма волочения,
радиус кривизны
отвальной поверхности.

эффективности их рабочего процесса. Из анализа обзора становится понятным, что от конструкции или положения отвальных рабочих органов бульдозеров или автогрейдеров зависит производительность и эффективность всего процесса резания грунта. Изменение угла установки отвала и радиуса кривизны его поверхности, влияя на сопротивление копанию и заглубление отвала, оказывают существенное воздействие на производительность процесса и эффективность работы. Многие вопросы уже рассмотрены мировыми исследователями и приведенный в данной обзорной статье анализ их работ дает возможность выбора правильного направления исследований, моделирования и проведения экспериментальных опытов. Особенно ценными являются результаты экспериментальных работ и моделирования методом конечных элементов. Из анализируемых источников получены сведения о научных лабораториях, занимающихся исследованиями резания грунтов и разработкой конструкций нового рабочего оборудования и экспериментальных стендов.

Keywords:

ploughshare, bulldozer,
soil cutting, soil cutting
resistance force,
ploughshare depth,
ploughshare shape, drag
prism, radius of curvature
of the ploughshare surface.

ABSTRACT

This review and analysis of well-known global research in the field of soil cutting with bulldozer blades and other earthmoving and transport machines is aimed at justifying the modernisation or development of new bulldozer blades, possibly of an unconventional shape, and confirming the effectiveness of their working process. The analysis of the review makes it clear that the design or position of the blade working bodies of bulldozers or motor graders determines the productivity and efficiency of the entire soil cutting process. Changes in the angle of the blade and the radius of curvature of its surface, affecting the resistance to digging and the depth of the blade, have a significant impact on the productivity of the process and the efficiency of the work. Many issues have already been addressed by researchers around the world, and the analysis of their work presented in this review article makes it possible to choose the right direction for research, modelling and experimental work. The results of experimental work and finite element modelling are particularly valuable. The analysed sources provide information on scientific laboratories engaged in research on soil cutting and the development of new working equipment and experimental stands.

КІРІСПЕ

Жер қазу-көлік машиналарының үйінді жұмыс жабдықтарының негізгі параметрлерін таңдау және есептеу үшін негізгі тәуелділіктер мен ережелер отандық және шетелдік авторлардың көптеген зерттеулерінде алынған. Жұмыс жабдығының топырақпен өзара әрекеттесу процесінің жалпы физикалық көрінісі де, жеке параметрлер мен режимдердің қазу процесінің күштік және динамикалық сипаттамаларына әсері де зерттелді. Зерттеулер алғашқы кезеңдерінде эксперименттік сипатта болды.

Кесу бұрышының α кесу күшінің P шамасына әсерін көптеген зерттеушілер жүргізді. Бұл топырақты кесу теориясында орталық сұрақ болған жоқ, бірақ оның ұзақ тарихы бар. Бұл ретте зерттеулер топырақты кесуге кедергінің көлденең құрамдас бөлігін барынша азайту қамтамасыз етілетін осындай іс жүзінде мүмкін болатын кесу бұрыштарын табу мақсатында жүргізілді. Соқа пышақтарының кесу бұрышын 20-дан 50 градусқа дейін ұлғайту орташа саздақты топырақтың кесуге төзімділігін сызықтық заңға сәйкес арттыратынын анықтады (Н. W. Chandler, 1984). Бұл процестің энергия сыйымдылығына ең көп әсер етеді. Зерттеулерде алынған эмпирикалық және теориялық формулалар мен

тәуелділіктер, әдетте, кесу (қазу) күшінің кесу тереңдігіне, топырақтың механикалық беріктігіне тәуелділігінде сыналды.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Зерттеулерде процестің физикалық мәні туралы сұрақтар қаралды, сонымен қатар кесу күші мен энергия сыйымдылығының бірқатар геометриялық факторлар мен бұзылу жағдайларына тәуелділігі зерттелді.

Еріген топырақтарды зерттеу топырақтың жіктелуін әзірлеуге, және сонымен бірге кесу күшінің топырақтың осы параметріне тікелей пропорционалды тәуелділігін көрсетуге мүмкіндік берді (Ганюков А.А., Алтынбаев А.Ж., 2022).

Жүргізілген эксперименттік зерттеулер негізінде жер қазу – көлік машинасының жұмыс органында (оның компоненттерінің суперпозиция принципіне сүйене отырып) жиынтық тарту күшін анықтау формуласы ұсынылды:

$$P_k = P_p + P_T + P_{ст} + P_{пр} \quad (1)$$

мұндағы:

P_p – кесу күші;

P_T – жұмыс жабдығының салмағын жеңуге арналған күш;

$P_{ст}$ – пышаққа кірген кездегі жоңқаның кедергісі;

$P_{пр}$ – топырақ сүйреу призмасының қозғалысқа кедергісі.

Профиль енінің l , кесу бұрышының α , қайрау бұрышының β , тереңдіктің h әсерін ескере отырып, кесетін жалпақ пышақ үшін кесу күші келесі эмпирикалық формуламен көрсетіледі:

$$P = Ch^{1,35} \cdot (1 + 2,6l) \cdot (1 + 0,0075\alpha) \cdot z \quad (2)$$

мұндағы z – кесу жиегінде тістердің болуын ескеретін коэффициент.

Формуладан кесу күші кесу тереңдігінің тез өсетін функциясы және кесу енінің сызықтық функциясы болып табылады. Соққы саны мен кесу күші арасында тікелей пропорционалды байланыс орнатылған топтарға ғана қолдануға болады (Asset Altynbayev, 2024) Ауытқулар мүмкін болатын топырақтарға шөгінді топырақтары, қосындылары бар қатты саздар және басқа да гетерогенді топырақтар жатады. Кейінгі зерттеулер кесу тереңдігінің көрсеткіші топырақтың түріне және жұмыс органының биіктігі мен қазу тереңдігінің арақатынасына байланысты және айтарлықтай шектерде өзгеруі мүмкін деген қорытындыға келді.

Берілген формуладағы кесу бұрышының әсерін есепке алу $(1 + 0,0075\alpha)$ фактормен жүзеге асырылады. $20 - 30^\circ$ кесу бұрыштарынан тыс кесу күші сызықтық тәуелділікте артады және оны төмендегідей көрсетуге болады:

$$P = P_{20} \cdot (1 + 0,0075\alpha) \quad (3)$$

мұндағы: $P_{20} - \alpha = 20^\circ$ болғандағы кесу күші.

Д.И. Федоров көлемді салмағы $1,4 \text{ г/см}^3$ болатын қопсытылған сазды тұрақты көтеру бетінің биіктігі бар түрлі кесу жиектерімен кесу кезінде $P = f(\alpha)$ тәуелділігін зерттеді. Ол сондай-ақ ауыр саздақта зерттеулер жүргізді, бұл кесу бұрышының 1° -қа артуы топырақтың кесуге кедергісін шамамен 25 %-ға арттыратынын көрсетті (А.Н. Зеленин бойынша 1-2 %). Осыған байланысты кесу бұрышының әсерін a коэффициентімен ескеруді ұсынылды (Dong Y, 2025):

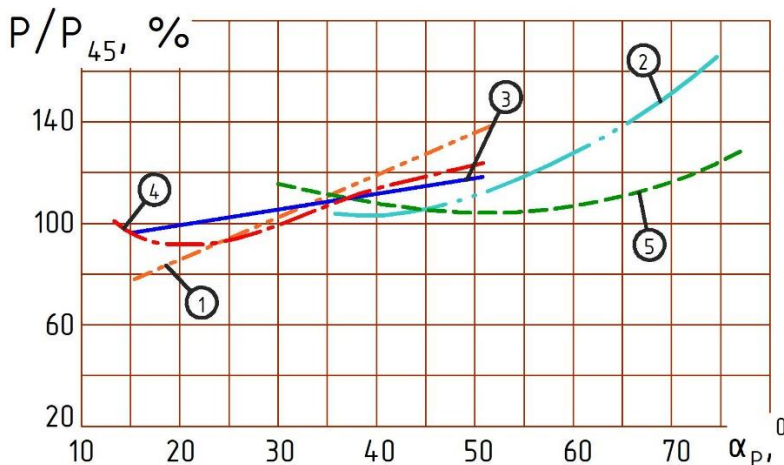
$$a = 1 + (0,01 \div 0,025) \cdot (\alpha - 7^\circ) \quad (4)$$

Топырақты кесу процестерін зерттеу бойынша жүргізілген эксперименттік жұмыстардың негізгі тұжырымдары (Ветров Ю.А., 2019):

1) Жоңқаның қалыңдығына байланысты кесу күші жалпы $P = Ah^n$ дәрежелі тәуелділікпен көрсетілуі мүмкін;

- 2) Кесу күші кескіш профильдің еніне сызықтық байланысты;
- 3) Көрсеткіш $1 \leq n \leq 2$ және профильдің еніне байланысты;
- 4) Кесу жиегінің тозуы мен күңгірттенуі күшті айтарлықтай арттырады.

Әр авторлардың эксперименттік деректері бойынша 1-суретте көрсетілген $P/P_{45} = f(\alpha)$ тәуелділіктер кесу бұрышының кесу күшіне P әсер ету сипаты топырақ жағдайларымен, жұмыс жабдықтарының түрлерімен және параметрлерімен анықталатынын көрсетеді (Miedema, S.A., 2011; Е.И. Берестов, 2012; R. Kozbagarov, 2023).



1-сурет. P/P_{45} кесу күшінің кесу бұрышына α_p тәуелділігі:

1 – құмды саз; 2 – құм; 3 және 4 – орташа және ауыр саздар; 5 – аргиллиттер

Ескерту – авторлармен құралған

Көптеген зерттеушілер $20 - 30^\circ$ кесу бұрыштары аймағында ең аз кесу күші бар екенін көрсетеді. $\alpha < 20^\circ$ бұрыштары аймағындағы тәуелділіктер негізінен теориялық қызығушылық тудырады.

Топырақты кесу бойынша жинақталған эксперименттік материал жұмыс органдарының топырақпен өзара әрекеттесуін аналитикалық талдауға көшуге мүмкіндік берді.

3D-модельдеу және FEM-талдау арқылы кесу күштерін анықтаудың алғашқы әрекеттеріне О. В. Алуко, Д. А. Сеиг, Б. К. Аукунова, М.В. Дудкин, Б. А. Молдаханов, А.И. Ким және т.б. жұмыстарын, сондай-ақ В.И. Баловнев, И.А. Недорезов, А.С. Кадыров, З.А. Мулдағалиев, Р.А. Кабашев және т.б. классикалық жұмыстарын жатқызуға болады. Олардың көпшілігінде топыраққа қатысты сол кездегі дамыған топырақ механикасының позициялары қолданылды. Тегіс, ұзын жұмыс органымен кесу процесінің физика-механикалық аналогы ретінде топырақтың тірек қабырғасымен өзара әрекеттесуі қабылданды. Қабырғаның топырақпен өзара әрекеттесуі сырғанау бетінің пайда болуымен бірге жүреді, Кулон заңы орындалады (Dong Y, 2025):

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi + C_0 \quad (5)$$

мұндағы: τ – жанасу керуі;

σ_n – жылжу бетіндегі қалыпты кернеу;

φ – топырақтың ішкі үйкеліс бұрышы;

C_0 – меншікті ілінісу.

Статикалық теңдеулерді зерттеу ықтимал ығысу жағдайларына байланысты бірқатар есептік тәуелділіктерді алуға мүмкіндік берді [Ветров Ю.А., 2019; Үң, J. 2022]. Бұл жағдайда тапсырма жалпақ пышақтардың топырақпен өзара әрекеттесуінің үш жағдайына бөлінді:

1) жағдай тік бұрышты $\beta \geq \beta^*$ құрайтын "жұмсақ қырлардың" шарттарына сәйкес келеді (кішкене кесу бұрыштары);

2) «аралық қырлар» $\beta_0 \leq \beta \leq \beta^*$ (кесу бұрышы $22 - 70^\circ$);

3) «тік қырлар» $\beta \leq \beta_0$ (кесу бұрышы $70 - 90^\circ$)

мұндағы β^* мен $\beta_0 - \beta$ бұрышының өтпелі (шектік) мәндері.

Үйкеліс бұрышы α мен β бұрышы $\alpha = \pi/2 - \beta$ байланысқа тәуелді.

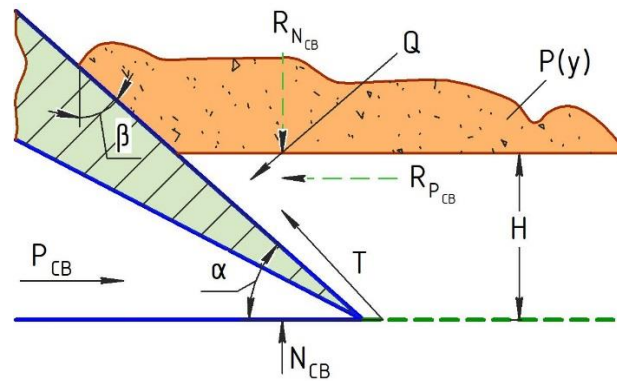
Тіреу қабырғасының артқы жағындағы реактивті қысымдарды есептеу үшін теңдеулерді және пышақтың алдыңғы жағындағы күштердің өзара әрекеттесуінің жеңілдетілген схемасын (2-сурет) қолдана отырып, Ю. А. Ветров кесу күштерінің құрамдас бөліктерін анықтау үшін теңдеулер жүйесін алды (тік R_{NCB} және бойлық R_{PCB}) (Asset Altynbayev, 2024; Ветров Ю.А., 2019):

$$R_{NCB}/l = \theta \cdot \sin \alpha + T \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

$$R_{PCB}/l = \theta \cdot \cos \alpha + T \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

мұндағы, θ мен T – салмақсыз орта үшін q реактивті қысымының компоненттері:

$$\theta = \frac{h \cdot q}{\sin \alpha}; \quad T = \frac{h \cdot \tau}{\sin \alpha} \quad (8)$$



2-сурет. Ұзын жазық орғанда кесуге төзімділік күштерінің өзара әрекеттесу схемасы

Ескерту – авторлармен құралған

Алынған өрнектердің негізінде кесу күштері мен эксперименттік күштердің есептік шамаларының сәйкестігін тексеруге, сондай-ақ топырақтың физикалық-механикалық қасиеттерінің және жұмыс органының геометриясының кесу күштерінің есептік шамаларына әсерін талдауға болады. Осы тексерудің нәтижесінде келесі қорытындылар алынды:

1) Кесу күші іс жүзінде адгезияға пропорционалды және ішкі үйкеліс бұрышына φ аз тәуелді (нақты өзгеріс φ диапазонында өзгеріс 10-15%);

2) Кесу күші пышақ бойымен топырақтың үйкеліс бұрышына δ айтарлықтай тәуелді;

3) Кесу күші кесу тереңдігіне пропорционалды;

4) Кесу күші кесу бұрышына байланысты өзгереді, $\alpha = 30 - 35^\circ$ болғанда минималды мәндерге ие;

5) Кесу күшіне жұмыс органының күңгірттенуі айтарлықтай әсер етеді. Тозу алаңындағы қарсылық заңдылықтары кесу күштерінің аталған факторларға тәуелділігінен ерекшеленеді;

6) Есептелген және эксперименттік шамаларды салыстыру тәжірибелік шамалардың теориялық тұрғыдан екі есе жоғары екенін көрсетті, бірақ топырақтың беріктігінің, үйкеліс бұрыштарының және пышақтың геометриялық параметрлерінің әсерінен негізгі эксперименттік позицияларды сапалы түрде дұрыс көрсетеді.

Бұл тұжырымдар кесу процесін аналитикалық сипаттау бойынша қосымша зерттеулерді белсенді қарастыруға түрткі болады.

Эксперименттік зерттеулер негізінде жер қазу машиналарының әртүрлі жұмыс органдары үшін есептеу схемаларын құра отырып және шекті тепе-теңдік теориясының әдістері мен теңдеулерін қолдана отырып, В.И. Баловнев топырақты кесуге төзімділікті анықтау үшін бірқатар теңдеулер шығарды. Үйінді жұмыс органдарының жұмысына жақын кесу процесінің ең жалпы схемасы келесідей сипатталады:

$$P = \iint dP(x, y) \quad (9)$$

Қазіргі уақытта кесу теориясы А. Наерия, D. Tremblaya, K. Skonieczny, Г.Н. Карасев, А.И. Доценко, Н.Т. Сурашов және басқа да зерттеушілердің еңбектерінде өз дамуын тапты. Бұл еңбектер кесу күштерін есептеудің аналитикалық әдістерін дамытудағы үрдістерді белгілі бір деңгейде көрсетіп қана қоймай, сонымен бірге олардың барлығын біріктіретін ортақ ғылыми көзқарасты да ұсынады.

А.А. Ганюков пен А.Ж. Алтынбаев әлемдік ғалымдар бұрын шығарған топырақтың кесу күшін горизонталь режимде есептеуге арналған теңдеулерді тәжірибелік және теориялық тұрғыда растады.

$$P_s = \gamma \cdot (\alpha + q/\gamma)^2 \cdot W \cdot N_{sy} + C_0 \cdot W \cdot \alpha \cdot N_{sc} \quad (10)$$

мұндағы: N_{sc} және N_{sy} – графикалық функциялар түрінде берілетін өлшемсіз параметрлер.

Зерттеушілер D.A. Seig, T. Gao және D. Holzb кесу күшін құрастыру үшін кесу бұрышының кесу күші шамасына әсерін ескеру үшін K_α – еңіс коэффициентін қолданудың дұрыстығын растады:

$$P_{гор} = P_f \cdot \sin(\alpha + \delta) + P_s \cdot \sin \alpha + C_0 \cdot z \cdot ctg \alpha \quad (11)$$

$$P_{верт} = P_f \cdot \cos(\alpha + \delta) + P_s \cdot \cos \alpha + C_0 \cdot z \quad (12)$$

мұндағы: P_f және P_s шамалары да өлшемсіз N_f және N_s параметрлерінің көмегімен анықталады.

Топырақтың кесуге төзімділігін анықтау үшін аналитикалық есептеулердің негізі топырақ механикасының маңызды ережелері болып табылады:

- А) топырақ еріген, ығысу кернеулерінен бұзылады;
- Б) бұзылу процесі пышақтың күш өрісі алдында толық шекті тепе-теңдік жағдайы қалыптасқанда жүзеге асады;
- В) ұзын (кең) және жалпақ пышақтың механикалық аналогы ретінде «пассивті қысым» жағдайындағы тіреу қабырғасы алынады.

Кесу бұрышының қазу кедергісінің тік (қалыпты) құраушысына әсерін анықтау бойынша эксперименттік зерттеулерге келетін болсақ, олар көлденең құраушының зерттеумен салыстырғанда әлдеқайда аз көлемде жүргізілді. Бұл эксперименттегі жүктемені өлшеудегі үлкен қиындықтармен түсіндіріледі. Қалыпты (тік) кесу күші әлі күнге дейін эмпирикалық коэффициенттерді қолдана отырып есептеледі. Мысалы, экскаваторларды жобалау кезінде классикалық формулалар қолданылады, олар бойынша қалыпты қазу күші $N = P \cdot \Psi$ жанамасының үлесі ретінде анықталады.

Бұл ретте ол топырақ массивінің бос бетіне бағытталған және драглайн шөміштері үшін 0,19-0,25 жанама күшіне және жоңғыларды бөлудің қалыпты режимінде тік күректер үшін 0,34-0,38-ге тең деп саналады. Сонымен қатар, зерттеулерде N күші (терең ішіне) массивке (жұмыс органын қатайту) және бос бетке (жұмыс органын итеру) бағытталуы мүмкін екендігі бұрыннан байқалған.

Өткір сынаның топырақпен өзара әрекеттесуінің қарапайым сұлбаларына сүйене отырып және алынған топырақтың қарсыласу күшінің нәтижелік күші пышақтың алдыңғы

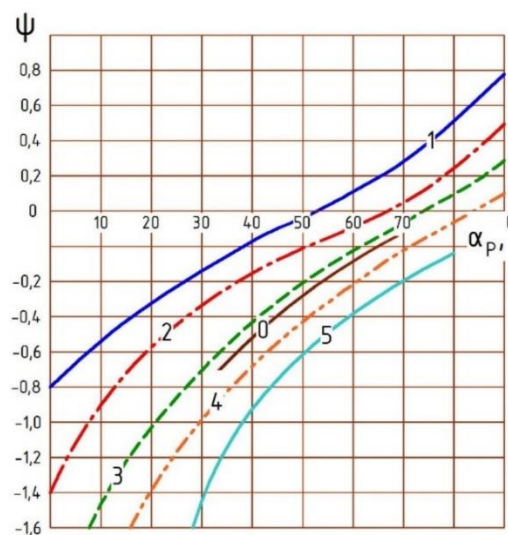
бетіне перпендикуляр бағыттан үйкеліс бұрышына φ қарай ауытқиды деп қабылдай отырып, зерттеушілер N және P күштері арасындағы келесі тәуелділіктерді алды:

$$N = P \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) \quad (13)$$

CJ. Coetzee жүргізген тәжірибелік тексеріс бұл тәуелділіктің шынайылыққа сәйкес келетінін растады, өткір пышақтар үшін (доғалдануды есепке алмағанда) нормаль күшіне арналған жеке заңдылықтарды құрудың қажеті жоқ, өйткені олар көлденең кесу күші үшін алынған тәуелділіктермен бірдей.

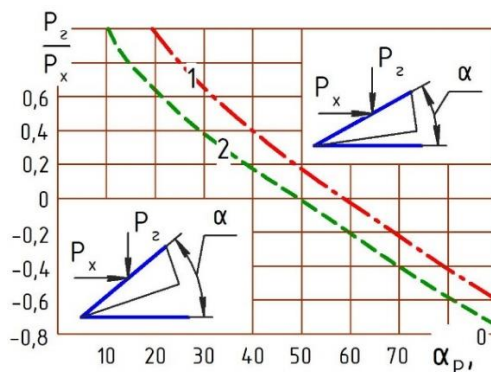
Қалыпты күштің кесу бұрышынан өзгеруі $\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi)$ өзгерістеріне ұқсас, егер $\alpha < \pi/2 - \varphi$ болса, өткір пышақтар топыраққа тартылады, ал $\alpha > \pi/2 - \varphi$ кезінде олар топырақтан итеріледі (3 және 4-суреттер).

Кесу бұрышынан кесуге төзімділіктің тік құраушының өзгеруінің ұқсас сипаты A. Naeria, D. Tremblaya және т.б. зерттеулерінде кескіш пышақтың физикалық моделінде екі түрлі әдіспен модельдеу кезінде алынған (5-сурет). Мұнда $P_2 = f(\alpha)$ тәуелділігінің сипатына сыртқы үйкелістің әсер ету фактісі қызықты: 1-ші қисық – пышақтың болат бетіндегі жағдайға сәйкес келеді; 2-ші қисық – пышақтың шыны бетіндегі жағдайға сәйкес келеді. Тік құраушы пышақтың шыны бетінде 81° және болат бетінде 75° кесу бұрышында нөлге тең. Бұл графиктің деректері 7, 8-суреттердегі тәуелділіктерді растайды. Бұл эксперименттерде көлденең және тік құраушылардың топырақ тығыздығына тәуелділігі 6-суретте көрсетілген. Тәжірибелердегі тығыздық $1,57 \text{ г/см}^3$ -ден $1,75 \text{ г/см}^3$ -ке дейін өзгерді. Тығыздықтың жоғарылауымен қисықтардың өсуінің әртүрлі қарқындылығына байланысты тік және көлденең құраушылардың қатынасы, демек, нәтиженің көлбеу бұрышы тығыздықтың жоғарылауымен өзгереді деген қорытынды жасауға болады. Тығыздықтың артуымен қисықтардың өсу қарқындарының әртүрлілігіне байланысты, вертикаль және горизонталь құрамдастардың қатынасы, демек, теңәрекетті күштің көлбеу бұрышы тығыздық артқан сайын өзгереді туралы қорытынды жасауға болады.



3-сурет. Теориялық және тәжірибелік (0-сызық) тәуелділіктер ($N/P = f(\alpha_p)$): 1 – $\mu = 40^\circ$; 2 – $\mu = 30^\circ$; 3 – $\mu = 20^\circ$; 4 – $\mu = 10^\circ$; 5 – $\mu = 0^\circ$; μ – топырақтың пышаққа қатысты үйкеліс бұрышы
Ескерту – авторлармен құралған

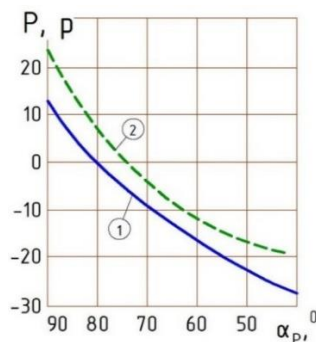
Жер қазатын машиналардың жұмыс органдары бойынша жүргізілген зерттеулердің талдауы көрсеткендей, кесуге қарсыласу күштерінің жалпы сипаты және олардың кесу бұрышына тәуелділігі ұқсас сипатқа ие.



4-сурет. Кесу бұрышының қатынасқа әсері $\frac{P_z}{P_x} : 1 - \mu = 300; 2 - \mu = 400$

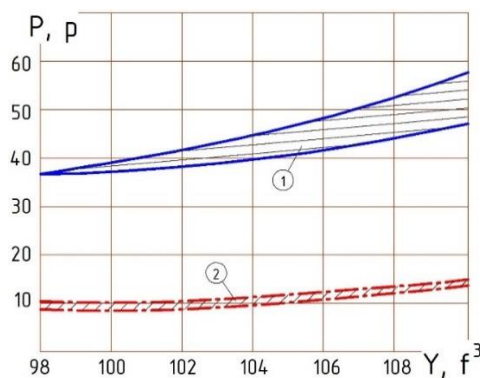
Ескерту – авторлармен құралған

CJ Coetzee-нің теориялық талдауына теориялық талдауында кесу күші $\alpha = 10^0$ кезінде минимумға жетсе, оның тәжірибелік өлшеулерінде қарсыласу күші минимумға $\alpha = 20^0$ кезінде жеткен.



5-сурет. Кесуге қарсыласу күштерінің кесу бұрышына тәуелділігі

Ескерту – авторлармен құралған



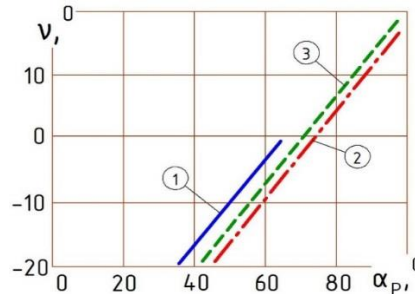
6-сурет. Кесуге қарсыласу күштерінің топырақ тығыздығына тәуелділігі:

1 – горизонталь құраушы; 2 – тік (вертикаль) құраушы

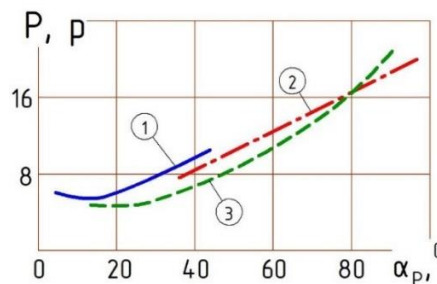
Ескерту – авторлармен құралған

$\alpha = 70 - 80^0$ кезінде топырақтың тік қарсыласу күші төмен бағытталады, бұл ауылшаруашылық құралдарының жұмысында жиі қолданылады. CJ. Coetzee құмда $h = 152$ мм жұмыс тереңдігінде жүргізген зерттеулерде $V = f(\alpha)$ тәуелділігінің сызықтық сипаты анықталған.

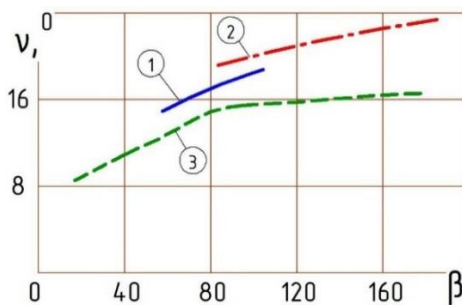
Жұмыс үшін қызықтысы – теңәрекетті күштің көлбеу бұрышы ν -ның жұмыс органының ұшталу бұрышына β тәуелділігі (8-сурет). Аспап ұштала түскен сайын көлбеубұрышы ν азаяды. Бұл жағдайда топырақтың горизонталь қарсыласуы тұрақты болып қалса, тік қарсыласу шамасы төмендейді.



7-сурет. Тең әрекетті күштің көлбеу бұрышының кесу бұрышына тәуелділігі:
1 – А.А. Ганюков бойынша; 2 – S.A. Miedema бойынша; 3 – C.J. Coetzee бойынша
Ескерту – авторлармен құралған



8-сурет. Кесу бұрышының кесуге қарсыласу күшіне тәуелділігі:
1 – А.А. Ганюков бойынша; 2 – S.A. Miedema бойынша; 3 – C.J. Coetzee бойынша
Ескерту – авторлармен құралған



9-сурет. Тең әрекетті күштің еңкею бұрышының (ν) ұшталу бұрышына (β) тәуелділігі:
1 – А.А. Ганюков бойынша; 2 – S.A. Miedema бойынша; 3 – C.J. Coetzee бойынша
Ескерту – авторлармен құралған

Жер қазатын-тасымалдаушы машиналардың жұмыс органдарының айрықша ерекшелігі – сүйреу призмасын жинақтайтын үйінді бетінің болуы. Сүйреу призмасының қозғалысына және жоңғылардың үйінді бетіне көтерілуіне қарсылық күштері қазуға қарсылық күштерінің көрінісіне түзетулер енгізеді.

Jiangtao Yu модельденген беттеріндегі үйінді бетіндегі топырақ қысымы гиперболалық заң бойынша биіктікте өзгереді (Yu, J. 2022):

$$P = a \cdot h^{-k} \quad (14)$$

мұндағы h – кесу жиегінен биіктік; A және K – пышақтың профиліне, кесу тереңдігіне, топырақтың түрі мен күйіне, сүйреу призмасының көлемі мен мөлшеріне байланысты коэффициенттер.

Үйіндідегі нәтижені қолдану нүктесі оның биіктігінің шамамен $1/3$ бөлігінде орналасқан, оның бағыты үйінді бетінің профиліне, топырақтың түрі мен күйіне байланысты өзгереді.

Барлық кесу бұрыштарында тығыздалған топырақты қазу кезінде қайырмадағы кедергі күштерінің тік құрамдас күштері қайырманы тереңдетуге тырысады. Борпылдақ топырақты қазу кезінде оның нәтижелері басқа зерттеушілердің нәтижелерімен сәйкес келеді.

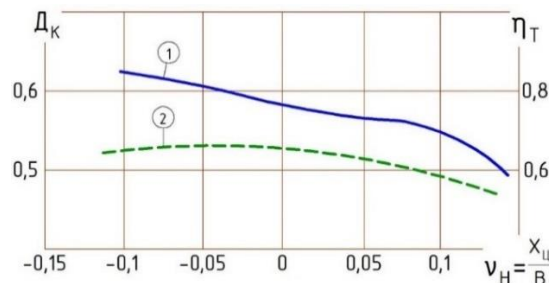
В.И. Баловнев әлемдік зерттеулерді талдай отырып, пышақтарда кесу бұрышы ұлғайған сайын көлбеу φ бұрышы төмендейтінін және қолдану нүктесі төмен қарай жылжитынын анықтады. Қайырманың қазуға алынған қарсылық күштерін қолдану нүктесі үйінді биіктігінің төменгі $1/5$ бөлігінде орналасады. Зерттеушілердің көпшілігі нәтиженің қолдану нүктесі пышақтың төменгі бөлігінде пышақтың биіктігінің $1/3$ шамасында орналасқандығы туралы ұсыныстар береді.

А.И. Доценконың зерттеулері қазудың энергия сыйымдылығына ең үлкен әсер пышақтың аударылу және көлбеу бұрыштары, қисықтық және оның биіктіктегі өзгеруі екенін көрсетеді. Кесу бұрышының ең қолайлы мәні $40 - 45^\circ$ құрайды, бұл қазудың ең аз энергия сыйымдылығы қамтамасыз етеді. Пышақтың көлбеу бұрышы және аударылу бұрышы сәйкесінше $75 - 80^\circ$ и 75° болуы керек.

Пышақ профилінің параметрлері тек көлденең құрамасына айтарлықтай әсер етеді. Алайда, олардың тік құрамдасы және көлбеу бұрышына әсері кесу бұрыштары 60° -дан асқанда айтарлықтай болады. Бұл кесу бұрыштарының диапазоны тік құрамдасы мен нәтиженің көлбеу бұрышы нөлдік мәндерден өтетін кесу бұрыштарында қамтитындықтан, нәтиженің реттелетін көлбеу бұрышы бар пышақтарды жасау кезінде олардың профиль параметрлерін пысықтау қажет. Мұндағы критерий нөлдік немесе нөлге жақын тік құрамдасымен бірге қазуға төзімділік күштерінің көлденең құрамдасының минималды мәні болуы мүмкін.

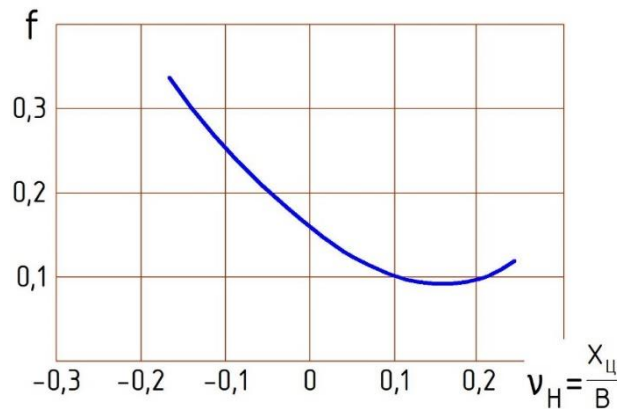
Қазу кедергісінің тік құрамдасының төмендеуі негізгі машинаның тартқыш қасиеттеріне оң әсер етеді. Бұл әсерді қозғалысқа төзімділік көрсеткіштері f бойынша бағалауға болады, меншікті тарту D_k , ПӨТ коэффициенті η_T .

Khankelov T.K., Mukhitdinov A.S., Alimov T.Y. зерттеулері бойынша 10 және 11-суреттерде $f = f(X_{ц}/B)$; $D_k = f(X_{ц}/B)$; $\eta_T = f(X_{ц}/B)$ байланыстар келтірілген. Мұндағы, $X_{ц}$ – қысым орталығының жылжуы, B – машинаның базасы.



10-сурет. Қысым ортасы орналасуының меншікті күшке D_k (1-қисық) және тарту ПӨТ η_T (2-қисық) әсері

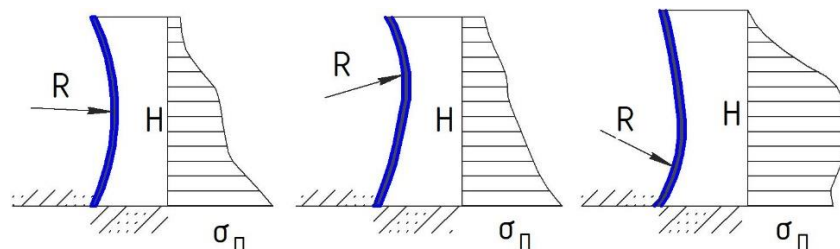
Ескерту – авторлармен құралған



11-сурет. Қысым орталығының орналасуының «ЧЕТРА»-Т35.01 тракторының қозғалысының кедергісіне әсері

Ескерту – авторлармен құралған

Пышақ профилінің пішіні топырақ қабатының қозғалу траекториясына сәйкес келмеген жағдайда пышақ бетінде тоқырау аймақтары пайда болады. Бұл жағдайда қабат кіші иілімділікке ие жолды таңдауға мәжбүр болады, бірақ сонымен бірге топырақ екі жақ бетімен үйкеліс күшін жеңіп өтсе де, иілімділіктің азаюы есебінен топырақты көтеруге қарсылық күші төмендейді. Қисықтықтың әсерін азайтып, тоқырау аймақтарын жою тұрғысынан пышақ бетін жазық етіп (қисаю бұрышы бойынша) орындау қажет. Алайда жоғарғы бөлікте топырақтың төгіліп кетуін болдырмау және жазық, торлы бөлікпен (қазу бұрышымен, ол отвальды бет қисаю бұрышынан кіші) біркелкі қосылу үшін, пышақ беті міндетті түрде белгілі бір қисықтыққа ие болады (12-сурет). Мұнда R – пышақ биіктігі, R – белгілі аймақтағы пышақтың қисықтығы. Төменгі бөліктегі қисықтық қазылып жатқан топырақтың сынған элементтерінен (қабаттарынан) қабат қалыптасу процесімен анықталады. Бұл жерде қабаттың қалыңдауы, сынған элементтердің бір-біріне қатысты жылжуы, қабаттың иілуі (байланысты, тығыз топырақтарда) сияқты күрделі және теориялық талдауға қиын құбылыстар байқалады. Тік пышақ беттен қиғаш кескіш бетке өтетін сызықтың қисықтығы отвальдың жоғарғы бөлігіндегі қисықтыққа қарағанда үлкен. Сондықтан көптеген зерттеушілер төменге қарай ұлғайып отыратын айнымалы қисықтыққа ие көлденең профильдің рационалды пішінін ұсынады. Бірақ қабаттың қалыптасуы мен оның сүйретпе призмасына түсу құбылыстары топырақ түріне, қазу тереңдігіне, пышақты орнату бұрыштарына байланысты болғандықтан, көлденең профильдің рационалды пішіні тұрақты болмайды, ал ақырында аталған параметрлердің көпшілігінің үйлесімімен анықталады. Оның үстіне, олардың кейбірі жұмыс процесі барысында үздіксіз өзгеріп отырады.



12-сурет. Пышақтың биіктігі бойынша қисықтық радиусының өзгеру мысалдары

Ескерту – авторлармен құралған

Егер пышақ профилі топырақ жағдайына сәйкес келмесе, қазу процесі топырақ қабатының пышақтың бетімен қалыптасуы мен қозғалысынсыз немесе оның итеріліп қозғалуымен өтетіні расталды. Бұл жағдайда сүйретпе призмасы кесілетін топырақтың фонтан тәрізді шашырауы есебінен ұлғаяды, ал пышақ беті толық немесе жартылай жабысып қалады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Тәжірибелік және есептелген деректерді салыстыру аналитикалық модельдердің байланыстардың сапалық сипатын дәл көрсететінін, бірақ олар күш мәндерін төмендететінін көрсетті. Бұл ығысу бетінің сипаты мен топырақтың біртектілігі туралы жеңілдетілген болжамдарға байланысты.

Адаптивті пышақ геометриясын пайдалану нәтижесінде пайда болған күштің бағытын тұрақтандырады және кедергінің тік компонентін азайтады, бұл негізі машинаның тарту қасиеттеріне оң әсер етеді.

Топырақты қазу бойынша белгілі зерттеулерге шолу жасау және жер қазатын-көлік машиналарының жұмыс органдарының құрылымдарын талдау нәтижесінде қазуды немесе топырақты тасымалдау тиімділігін арттыратын дәстүрден тыс пішіндегі бульдозер пышақтарын әзірлеу немесе жаңғырту, сондай-ақ зерттеу қажеттігі анықталды. Мысалы, ортаңғы пышағы шығыңқы және қозғалмалы бульдозер пышақтары немесе алдыңғы беті қозғалмалы пышақтар.

Пышақтың жұмыс органдарында икемді алдыңғы бетті қолдану топырақ қабатының қалыптасуы мен көтерілу процесінің өзін-өзі оңтайландыруын қамтамасыз етеді, яғни пышақтың көлденең қимасының пішінін қабаттың пішіні мен қозғалыс траекториясына сәйкестендіреді.

ҚОРЫТЫНДЫ

1) Топырақты кесу процесі күрделі және сызықты сипатта емес, жұмыс құралының геометриясы мен топырақ қасиеттерінің біріккен әсерлерімен анықталады.

2) Тиімді кесу бұрышының диапазоны $30-45^{\circ}$ құрайды, бұл қазуға минималды кедергіні қамтамасыз етеді;

3) Икемді алдыңғы беті бар пышақтардың энергия сиымдылығына шешуші әсер етеді.

4) Геометриясы өзгермелі және икемді болатын жұмыс органын әзірлеу перспективалы бағыт болып табылады.

5) Алынған нәтижелерді жер қазу жабдықтарын жобалау және жаңғырту кезінде пайдалануға болады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: жоқ.

АЛҒЫС: Жарияланымға байланысты жүргізілген зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын AP22684640 «Геометриясын әртүрлі деңгейде өзгертуге мүмкіндік беретін шарнирлі-буынтық бульдозер пышағының құрылымын әзірлеу» гранты аясында жүзеге асырылуда.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: жоқ.

ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Chandler, H. W. (1984). The use of non-linear fracture mechanics to study the fracture properties of soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 29(4), 321–327. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(84\)90087-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(84)90087-8)
- Altynbayev, A., & Ganyukov, A. (2025). Research on soil cutting with a flat cutter using a simulation model. *Communications: Scientific Letters of the University of Zilina*, 27(1), B12–B20. <https://doi.org/10.26552/com.C.2025.002>
- Ганюков А. А., & Алтынбаев А. Ж. (2022). Анализ силовых методов расчета разрушения грунтовых сред и обоснование нового подхода к теории резания грунта. *Труды университета*, 4(89), 274–279. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_274 // Ganyukov, A. A., & Altynbaev, A. Zh. (2022). Analiz silovykh metodov rascheta razrusheniya gruntovykh sred i obosnovanie novogo podkhoda k teorii rezaniya grunta [Analysis of force-based methods for calculating the destruction of soil media and substantiation of a new approach to the theory of soil cutting]. *Trudy universiteta [University Proceedings]*, 4(89), 274–279. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_274 (In Russ.)
- Зеленин А. Н. (2018). Основы разрушения грунтов механическими способами. *Машиностроение*. // Zelenin, A. N. (2018). Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami [Fundamentals of soil destruction by mechanical methods]. *Mashinostroyeniye*. (In Russ.)
- Dong, Y., Fang, L., Qin, K., Sun, S., & Gong, Y. (2025). Comparison of SPH and CEL methods for simulating the soil cutting process of a biomimetic digging shovel. *PLoS ONE*, 20(5), Article e0322861. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322861>
- Ветров Ю. А. (2019). Машины для земляных работ (7-е изд., дораб. и доп.). Вища школа. // Vetrov, Yu. A. (2019). Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earthmoving machines] (7th ed., rev. and enl.). Vishcha shkola. (In Russ.)
- Miedema, S. A. (2011). Soil cutting processes, the cutting of water saturated sand. In *Proceedings of OMAE 2011 ASME, Rotterdam, The Netherlands*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49233>
- Берестов Е. И. (2012). Сопротивление грунтов резанию. Метод расчета параметров при резании грунта. LAP LAMBERT Academic Publishing. // Berestov, E. I. (2012). Soprotivlenie gruntov rezaniyu. Metod rascheta parametrov pri rezanii grunta [Resistance of soils to cutting. A method for calculating parameters during soil cutting]. LAP LAMBERT Academic Publishing. (In Russ.)
- Kozbagarov, R., Zhussupov, K., Zhiyenkozhaev, M., Shalbayev, K., & Kamzanov, N. (2023). Increasing the efficiency of the bulldozer by reducing the energy intensity of the soil cutting process. *The Bulletin of KazATC*, 1(124), 16–24.
- Aluko, O. B., & Seig, D. A. (2000). An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil and Tillage Research*, 57(3), 143–157. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00156-2)
- Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliyev, A., & Andryukhov, N. (2021). Experimental studies on the interaction process with the environment of an adaptable bulldozer blade with variable geometry. *International Review of Mechanical Engineering*, 15(11), 554–565. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756>
- Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliyev, A., & Andryukhov, N. (2022). Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer blade with variable geometry. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(3), 798–807. <https://doi.org/10.5937/jaes0-37210>

- Hu, M., Gao, T., Dong, X., Tan, Q., Yi, C., Wu, F., et al. (2023). Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Soil and Tillage Research*, 229, Article 105671. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671>
- Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г. и др. (2012). Машины для земляных работ. Конструкция. Расчёт. Потребительские свойства: в 2-х кн. Кн. 1. Экскаваторы и землеройно-транспортные машины: учебное пособие для вузов (2-е изд., стер.; В.И. Баловнев, ред.). Издательство БГТУ // Balovnev, V.I., Glagolev, S.N., Danilov, R.G., et al. (2012). *Mashiny dlya zemlyanykh rabot. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitel'skie svoystva: v 2-kh kn. Kn. 1. Ekskavatory i zemleroyno-transportnye mashiny* [Earthmoving machines. Design, calculation, and consumer properties: In 2 books. Book 1. Excavators and earthmoving-transport machines] (2nd ed.; V. I. Balovnev, Ed.). Izdatel'stvo BGTU. (In Russ.)
- Недорезов И. А., & Симонов М. М. (2012). Имитационное моделирование рабочих процессов землеройно-транспортных машин с целью ранжирования их параметров. Вестник ХНАДУ, 57, 63–67 // Nedorezov, I. A., & Simonov, M. M. (2012). *Imitatsionnoe modelirovanie rabochikh protsessov zemleroyno-transportnykh mashin s tselyu ranzhirovaniya ikh parametrov* [Simulation modeling of working processes of earthmoving-transport machines for ranking their parameters]. *Vestnik KhNADU* [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University], 57, 63–67. (In Russ.)
- Кадыров А. С., Муддагалиев З. А., Нурмаганбетов А. С. и др. (2015). Теоретические основы проектирования и расчета бурильных и фрезерных землеройных машин (А. С. Кадыров, ред.). Караганда. // Kadyrov, A. S., Muldagaliev, Z. A., Nurmaganbetov, A. S., et al. (2015). *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rascheta buril'nykh i frezernykh zemleroynykh mashin* [Theoretical foundations of design and calculation of drilling and milling earthmoving machines] (A. S. Kadyrov, Ed.). Karaganda. (In Russ.)
- Кабашев Р. А. (2014). Грунтовые условия эксплуатации землеройной техники в Казахстане. КазАДИ. // Kabashev, R. A. (2014). *Gruntovye usloviya ekspluatatsii zemleroynoy tekhniki v Kazakhstane* [Soil conditions for the operation of earthmoving equipment in Kazakhstan]. *KazADI*. (In Russ.)
- Баловнев В.И. (2018). Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. Высшая школа // Balovnev, V.I. (2018). *Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochikh organov dorozhno-stroitel'nykh mashin* [Modeling of interaction processes between working bodies of road construction machines and the environment]. *Vysshaya shkola*. (In Russ.)
- Yu, J., Ma, Y., Wang, S., Xu, Z., Liu, X., Wang, H., Qi, H., Han, L., & Zhuang, J. (2022). 3D finite element simulation and experimental validation of a mole rat's digit inspired biomimetic potato digging shovel. *Applied Sciences*, 12(3), Article 1761. <https://doi.org/10.3390/app12031761>
- Баловнев В. И. (2014). Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты: учебное пособие. МАДИ // Balovnev, V.I. (2014). *Opredelenie optimal'nykh parametrov i izbor dorozhno-stroitel'nykh mashin metodom analiza chetvertoy koordinaty* [Determination of optimal parameters and selection of road construction machines by the fourth-coordinate analysis method]. *MADI*. (In Russ.)
- Coetzee, C. J. (2014). Discrete and continuum modelling of soil cutting. *Computational Particle Mechanics*, 1(4), 409–423. <https://doi.org/10.1007/s40571-014-0014-7>
- Haeri, A., Tremblay, D., Skonieczny, K., Holz, B., & Teichmann, M. (2020). Efficient numerical methods for accurate modeling of soil cutting operations. In *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020)* (pp. 608–615). <https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0085>

- Карасев Г. Н., Доценко А. И., & Кустарев Г. В. (2012). Машины для земляных работ. Бастет // Karasev, G. N., Dotsenko, A. I., & Kustarev, G. V. (2012). Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earthmoving machines]. Bastet. (In Russ.)
- Сурашов Н.Т., Асмагулаев Р.Б., & Толымбек Д.Н. (2021). Определение рациональной формы отвала бульдозера с учетом грунтового фона Республики Казахстан. Вестник СибАДИ, 18(6), 662–677. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677> // Surashov, N.T., Asmatulaev, R.B., & Tolymbek, D. N. (2021). Opredelenie ratsional'noy formy otvala bul'dozera s uchetom gruntovogo fona Respubliki Kazakhstan [Determination of the rational shape of a bulldozer blade considering the soil background of the Republic of Kazakhstan]. Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 18(6), 662–677. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677> (In Russ.)
- Guo, Z., Zhang, S., & Ni, L. (2023). A comprehensive study on the mechanical properties of bulldozing plate soil engaging surface based on the entropy-weighted grey relational analysis method. IEEE Access, 11, 78000–78016. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279263>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Аукенова Бекзат Қабыкенқызы – PhD докторы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Аукенова Бекзат Қабыкенқызы – доктор PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Aukenova Bekzat – PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2724-4447>



Айтказина Аяжан Калелхановна – техникалық ғылымдар магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Айтказина Аяжан Калелхановна – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Aitkazina Ayazhan – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: aaytkazina@edu.ektu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6305-4696>



Кабдуллина Динара Сайлаубековна – техникалық ғылымдар магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Кабдуллина Динара Сайлаубековна – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kabdullina Dinara – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: DKabdullina@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8725-1897>



Жексембинова Гулим Берикболкызы – техникалық ғылымдар магистрі, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Жексембинова Гулим Берикболкызы – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Zhekseminova Gulim – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: GZhekseminova@ektu.com ,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2540-2948>



Leśniewski Tadeusz Teodor – т.ғ.д., профессор, Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Вроцлав қ., Польша

Leśniewski Tadeusz Teodor – д.т.н., профессор, Вроцлавский университет науки и технологий, г. Вроцлав, Польша

Leśniewski Tadeusz Teodor – Doctor of Technical Sciences, professor, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Wrocław, Poland

e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1903-3967>