

Исследование рабочего процесса бульдозерного отвала с изменяемой геометрией

¹**АУКЕНОВА Бекзат Кабыкенкызы**, докторант, bekzat89a@mail.ru,

²**РАДЕНКОВ Радослав Лазаров**, к.т.н., доцент, rlr@abv.bg,

³**САВЕЛЬЕВ Андрей Геннадьевич**, д.т.н., профессор, prof.saveliev@yandex.ru,

^{1*}**ДУДКИН Михаил Васильевич**, д.т.н., профессор, vas_dud@mail.ru,

¹**КУМЫКОВА Татьяна Михайловна**, к.т.н., профессор, ktm6010@mail.ru,

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева», Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. А.К. Протозанова, 69,

²Софийский университет «Святого Климента Охридского», Болгария, София, бульвар Царя-Освободителя, 15,

³Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Россия, Москва, Ленинградский проспект, 64,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель работы – теоретическое и экспериментальное подтверждение рациональных параметров, значительного диапазона рационального использования и роста эффективности бульдозеров-террасеров за счёт установки на них универсального, адаптируемого к переменным условиям работы отвала с изменяемой геометрией своего профиля. Экспериментальными исследованиями подтверждена корректность допущений, принятых при выводе аналитических зависимостей определения объема накапливаемой грунтовой призмы, а также составляющих горизонтального сопротивления резанию и копанию отвалом с изменяемой геометрией. Полученные в результате проведенных исследований экспериментальные и теоретические зависимости позволили разработать методику определения основных параметров отвала с изменяемой геометрией с учетом функциональных ограничений. В статье показаны этапы теоретических и экспериментальных результатов проверки зависимости сил противодействия (их горизонтальных и вертикальных компонентов) копания и генерирования призмы волочения разрабатываемого материала от определяющих параметров отвала с изменяемой геометрией (углов захвата, наклона и зарезания, ширины отвала и т.д.). Предложенная методика определения основных параметров отвала с изменяемой геометрией позволяет выбирать их с учетом универсального назначения отвала, результатов проведенных исследований, существующих геометрических зависимостей между параметрами и различных функциональных ограничений.

Ключевые слова: бульдозер, отвал с изменяемой геометрией, выступающий средний нож (ВСН), сила сопротивления копания, ширина захвата, угол поворота боковых секций.

Введение. Взаимодействие бульдозерного отвала с грунтом, возможность и эффективность выполнения различных операций и в различных условиях, зависят от его геометрических параметров.

Исследуемая конструкция отвала с изменяемой геометрией позволяет адаптировать его к самым разнообразным требованиям за счет поворота боковых секций относительно наклонно расположенных шарниров [1, 2].

Характерные рабочие позиции отвала при различных сочетаниях углов поворота боковых секций показаны на рисунке 1.

Установка отвала по рисунку 1,а позволяет выполнять профилировочные работы, разработку насыпей и другие работы, производительность

на которых пропорциональна ширине захвата. Согласно расчетам, при соотношении $b/B_0 = 0,375$, например, за счет поворота боковых секций на угол до 30° , ширина захвата уменьшается на 10%. Это позволяет подстраивающемуся к изменяемым условиям отвалу с изменяемой геометрией при равных транспортных габаритах с прямым традиционным отвалом достигнуть в 1,1 раза увеличенной максимальной ширины захвата и, соответственно, большей производительности [2, 3, 4].

Анализ конструкции. Если установить боковые секции отвала повернутыми вперед (как на рисунке 1,б) с углом $\varphi = 30^\circ$, $b/B_0 = 0,375$ и $\Theta = 14^\circ$, то можно обеспечить перекося на 9° режущих граней крайних ножей и до 3% (в среднем) относительно высоты отвала, размер выступающей доли

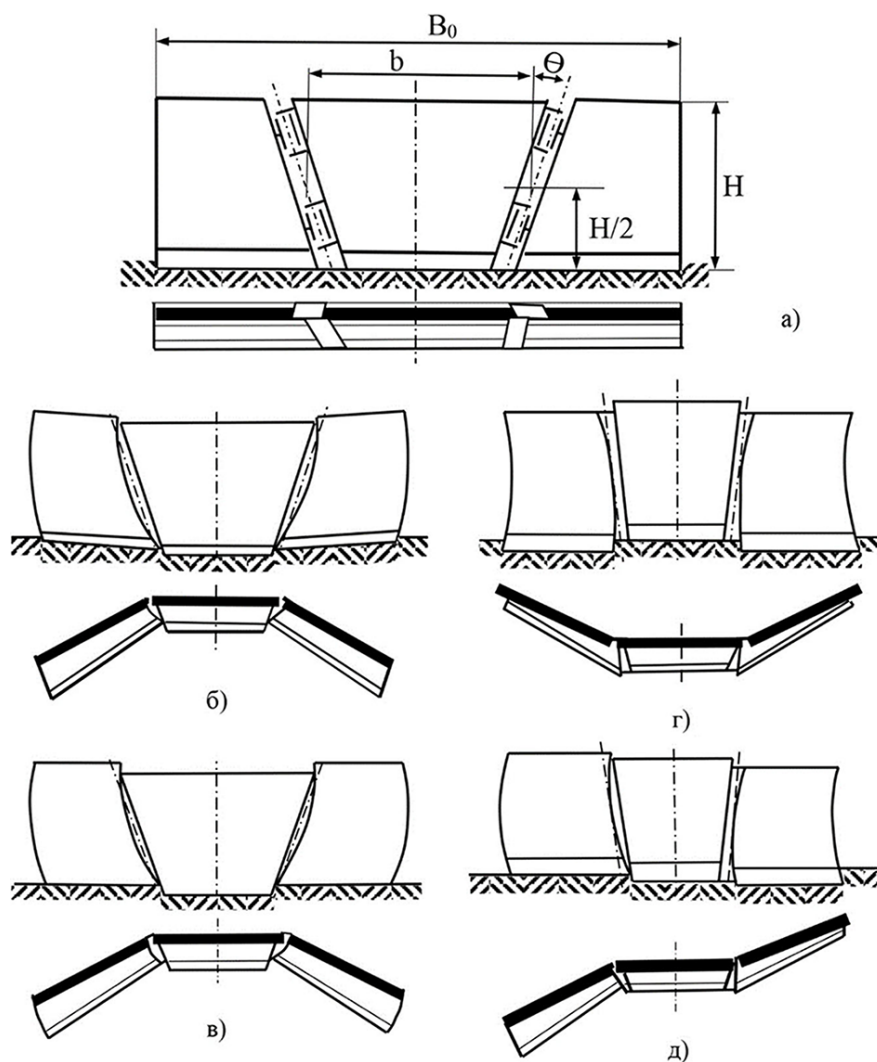


Рисунок 1 – Предлагаемые варианты компоновки и схем применения выдвижного бульдозерного адаптируемого отвала с изменяемой геометрией: B_0 – ширина отвала; b – ширина средней секции отвала в середине ее высоты; Θ – угол наклона шарниров; H – высота отвала

среднего ножа. Размеры стружек, соструганные отвалами с изменяемой геометрией и сравниваемые с размерами стружек, нарезанных прямым отвалом с выступающим средним ножом (ВСН) дают основание сделать вывод о том, что в обоих случаях обеспечиваются сопоставимо одинаковые напорные и удельные заглубляющие усилия, и, значит, на равных проводить разработку грунтов прочностью до IV категории (30-35 ударов плотнотера грунтов динамического, например, модели ДПГ-1,2) на бульдозере 10 класса [2, 5, 6, 7].

С увеличением угла Θ уменьшается отклонение траектории движения частиц боковых стружек по боковым ножам в сторону образующей средней секции. Согласно графику на рисунке 3 при увеличении Θ от 0° до 21° в 1,4 раза уменьшается значение $\cos \gamma_y$, а следовательно – и составляющая силы, продвигающей боковой пласт, которая сжимает и притормаживает продвижение среднего пласта. Снижение энергоемкости, достигаемое таким образом, позволяет увеличить глубину копания, величину набираемой призмы

грунта и в итоге – производительность бульдозера при разработке грунта и его перемещении на ограниченные расстояния.

Отвал, установленный по рисунку 1, с компенсирует перекося ножей, повернутых вперед боковых секций, увеличением угла установки средней секции (сокращением угла $\gamma = 90^\circ - \epsilon$).

Его возрастание от лежащего в основе значения $\epsilon_0 = 75^\circ$ до $\epsilon = 85^\circ$, находится в пределах допустимых на серийных бульдозерах рамков, и дает возможность сократить угол перекося при $\Theta = 14^\circ$, например, до $\beta_{пер} = 2^\circ$.

При такой установке отвала возможно удержание и перемещение значительных объемов разрабатываемого материала на большие расстояния.

Малое, до 2-3% от исходной высоты отвала, значение выступающей доли среднего ножа, дополнительно подрезает разрабатываемый материал, чем компенсирует потери разрабатываемого материала, «уходящего» в боковые валики. Варьируя углом установки непосредственно самой средней секции, можно компенсировать

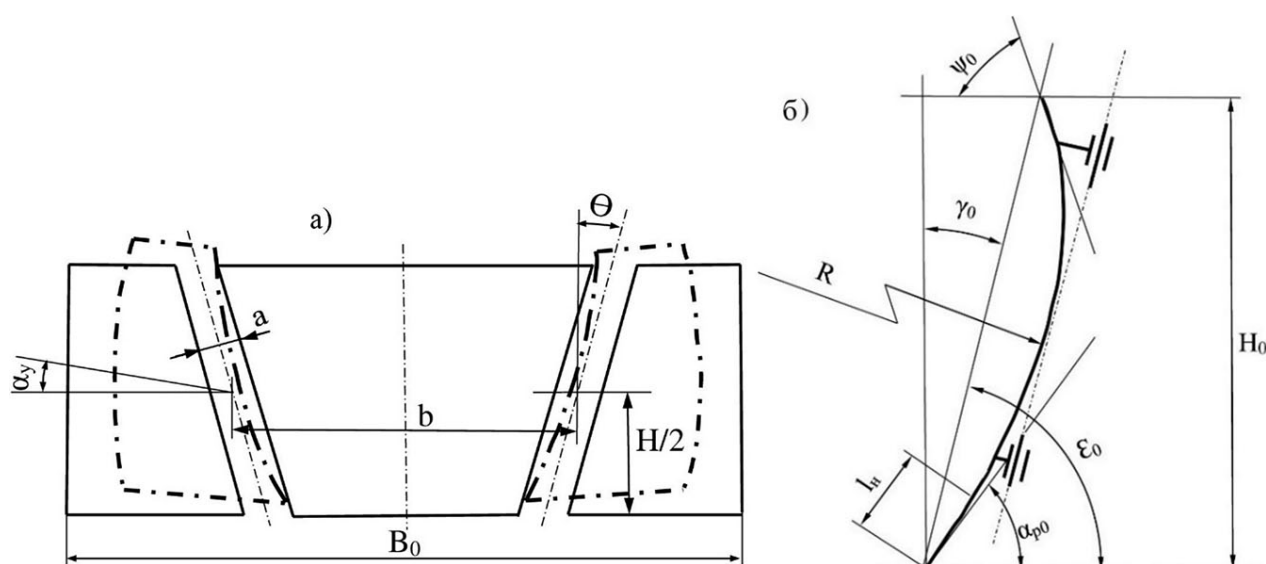


Рисунок 2 – Схема основных параметров выдвижного бульдозерного адаптируемого отвала с изменяемой геометрией: В

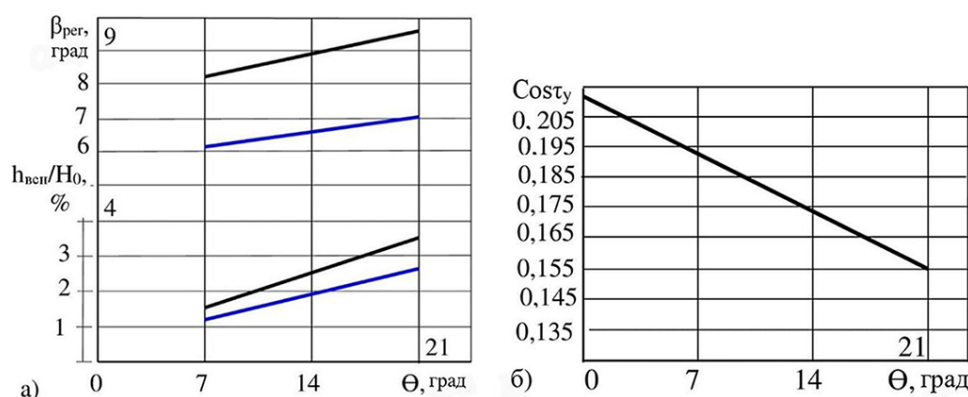


Рисунок 3 – Влияние угла наклона шарниров θ на: а) значение доли ВСН, сопоставимой с высотой отвала – $h_{\text{всн}}/H_0$; б) наклон маршрутов скольжения части грунта на ножах боковых секций и образующей средней секции – cost_y

перекос крайних боковых ножей для схемы компоновки отвала, данной на рисунке 1, г – с повернутыми назад боковыми секциями и для схемы на рисунке 1, д – с боковыми секциями, развернутыми в противоположные стороны.

При этом разница между уровнями режущих кромок среднего и боковых ножей в первом случае и между уровнями боковых ножей во втором не превышает соответственно 4 и 8% от высоты отвала (при $\theta = 14^\circ$ и $\varphi \leq 30^\circ$).

Ножи боковых секций, установленные под некоторым углом перекося и выступающий нож средней секции, вырезают в грунте стружку сложной формы (рисунок 4, а).

В зависимости от глубины резания сечение боковых стружек принимает треугольную или трапециевидальную форму, а их максимальная толщина меньше толщины средней стружки.

В зоне разрушения общий пласт грунта, сходящей с поверхности средней и боковых секций

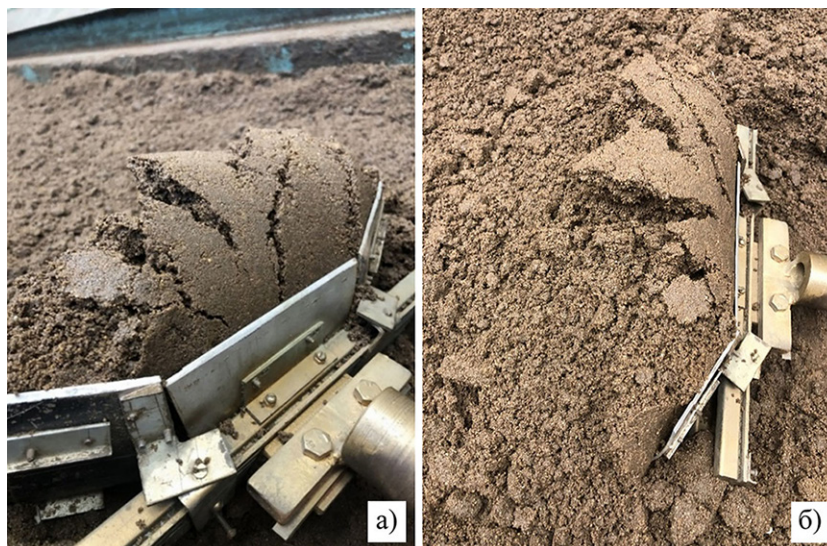
продвигается вверх и вперед по поверхности накопленной призмы.

Разрушение наступает при опрокидывании пласта через верхнее ребро переднего откоса призмы. Высота призмы ограничивается прочностью ее ядра.

После достижения максимальной накапливающей способности отвала устанавливается равенство количества вырезаемого и теряемого в боковые валики грунта.

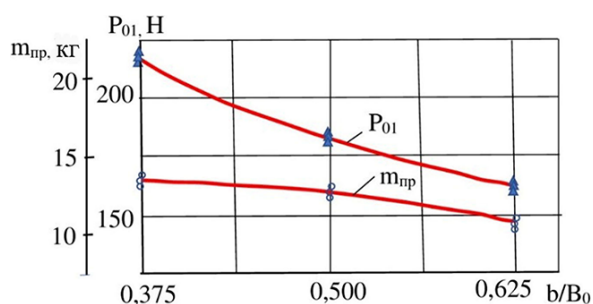
Результаты экспериментального исследования процесса взаимодействия с грунтом отвала с изменяемой геометрией

Экспериментальные данные показывают, что при неизменных величинах θ , α_y и $h_{\text{всн}}/H_0$ при снижении соотношения b/B_0 от значения 0,625 и до достижения 0,375, весовая составляющая призмы волочения может увеличиться в среднем на 16...31%, в зависимости от изменения параметров

Рисунок 4 – Копание грунта отвалом с изменяемой геометрией с углом $\Theta = 30^\circ$

остальных факторов. Учитывая характер влияния параметра b/B_0 на весовую составляющую волоочимой призмы грунта и силу горизонтального противодействия усилию копания (рисунок 5) и принимая во внимание требования, проистекающие из назначения адаптируемого отвала с изменяемой геометрией: обеспечение высокой концентрации заглубляющего усилия на средней, выступающей части режущего ножа при соблюдении ограничения его длины размером колеи бульдозера (во избежание заваливания гусениц бульдозера в вытое углубление): обеспечение возможно большей длины боковых секций для эффективной боковой миграции разрабатываемого материала при засыпке готовых траншей и прочих земляных работах, было решено экспериментальные исследования проводить при фиксированном значении отношения $b/B_0 = 0,375$.

Методы исследований. Для исследования влияния угловых параметров отвала с изменяемой геометрией на массу призмы волочения и противодействие копанию отвала в горизонтальном направлении был применен метод регрессионного анализа полученных данных.

Рисунок 5 – Зависимость весовой составляющей призмы волочения и силы противодействия копанию в горизонтальном направлении от отношения b/B_0 ($\Theta = 14^\circ$; $\alpha_y = 23^\circ$)

Регрессионные модели представлены графически на рисунках 6 и 7.

Для показателя $\Theta = 10-19^\circ$, с увеличением α_y , весовая составляющая призмы достигает экстремума при достижении значений $\alpha_y = 22-24^\circ$. Сокращение весовой составляющей призмы $m_{пр}$ при дальнейшем возрастании α_y обусловлено попутным уменьшением реальной ширины захвата исследуемого отвала. При значении $\Theta = 12-16^\circ$ достигается максимальный экстремум, а при продолжающемся росте Θ с боковых секций происходит повышенный сход разрабатываемого материала в боковые валики, с соответствующим сокращением накапливаемой призмы волочения. При дальнейшем возрастании угла α_y показания экстремума перемещаются в направлении более малых величин угла Θ , экстремум принимает еле заметное выражение, а весовая составляющая набора призмы $m_{пр}$ равномерно уменьшается по всему диапазону трансформации значений Θ .

Было установлено увеличение прироста $m_{пр}$ с увеличением отношения h_3/H_0 . Это объясняется особенностью режущего ножа. При малых значениях средней (эквивалентной) глубины копания h_3 (соответственно h_3/H_0) доминирующее влияние при резании имеет выступающий нож средней секции, а ножами боковых секций вырезаются стружки небольшой толщины. С увеличением h_3 увеличивается и толщина боковых стружек, которые, в этом случае, меньше разрыхляются и поднимаются на большую высоту. Вместе с тем, однако, при увеличении отношения h_3/H_0 возрастают потери грунта в боковые валики.

Анализ регрессионной модели массы призмы волочения на экстремум показал, что максимум $m_{пр}$ достигается при значениях $\alpha_y \approx 23^\circ$, а значения угла Θ , соответствующие локальным максимумам на различных глубинах копания, находятся в линейной зависимости от отношения h_3/H_0 (рисунок 8).

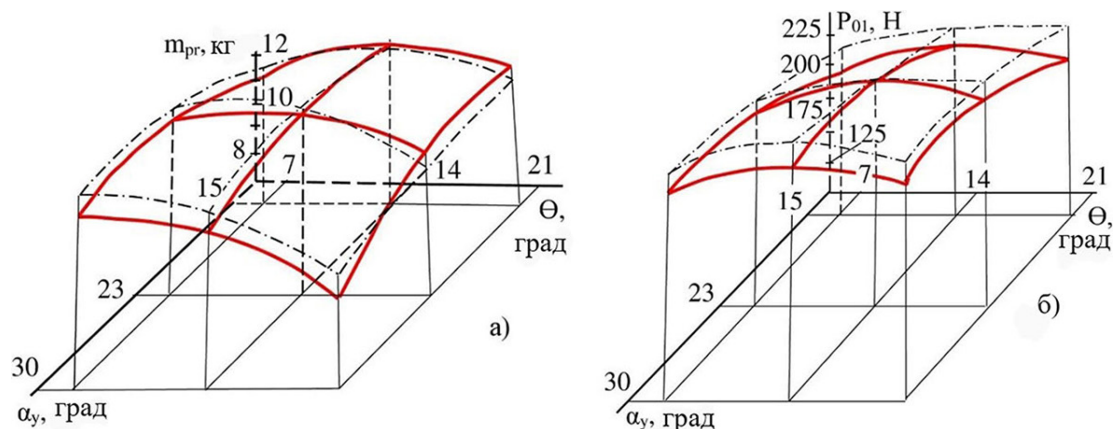


Рисунок 6 – Влияние параметров Θ и α_y на величины: а) весовой составляющей призмы волочения; б) противодействия копанью в горизонтальном направлении (при $h_3/H_0 = 0,15$), где h_3/H_0 – отношение глубины копания к высоте отвала

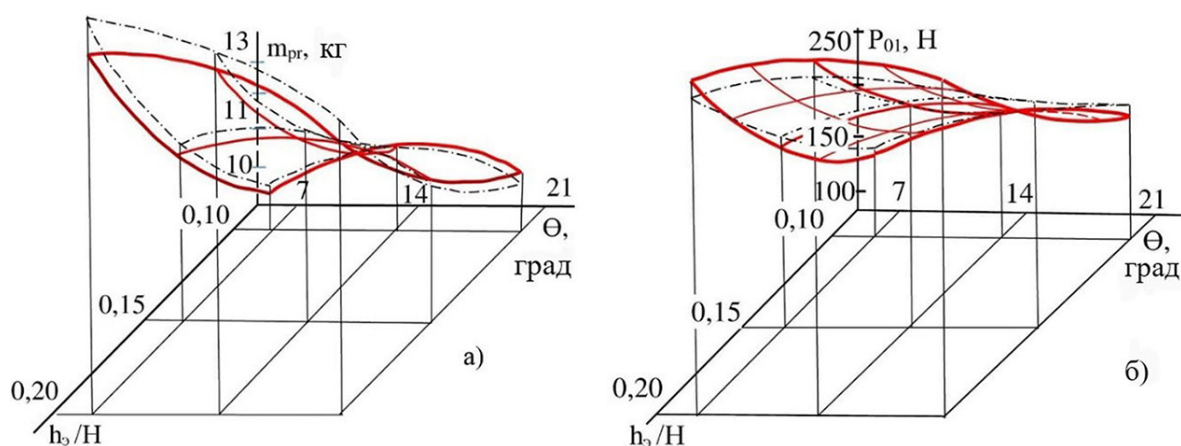


Рисунок 7 – Влияние параметров Θ и h_3/H_0 на величины: а) весовой составляющей призмы волочения; б) противодействия копанью в горизонтальном направлении

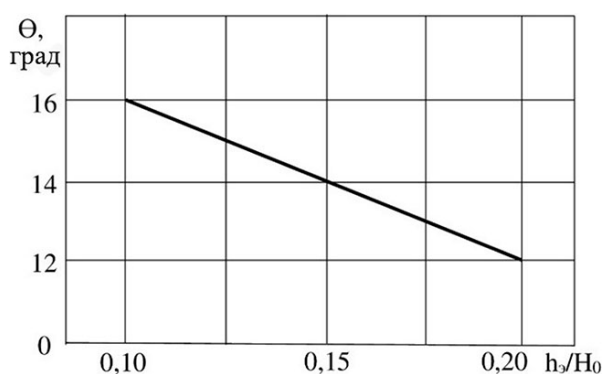


Рисунок 8 – Зависимость угла Θ от h_3/H_0 , при условии $m_{pr} \rightarrow \max$ ($\alpha_y \approx 23^\circ$)

Выводы:

1. Анализ закономерности изменения P_{01} показывает доминирующее влияние на сопротивление величины грунтовой призмы перед отвалом, вследствие чего она в большой степени повторяет закономерность изменения m_{pr} от тех же параметров. Более существенное отличие отмечено в

области больших значений Θ и α_y , где из-за увеличения выступающей части ножа средней секции сильно возрастает сопротивление резанию.

2. При одинаковых значениях сопротивления копанью, достигаемых при разных глубинах резания, масса призмы волочения отвала с изменяемой геометрией превышает этот показатель прямого и сферического отвалов соответственно до 1,5 и 1,15 раза.

3. Установлены повторяющиеся соотношения перемены набираемой отвалом с изменяемой геометрией массы призмы волочения m_{pr} от исследуемых геометрических параметров отвала – b/B_0 , Θ и α_y , а также от отношения h_3/H_0 .

Зависимости m_{pr} от Θ и α_y имеют экстремальный характер, причем максимум достигается, в зависимости от значения h_3/H_0 , при $\alpha_y = 22-24^\circ$ и $\Theta = 12-16^\circ$. При одновременном увеличении Θ и α_y после значений, при которых достигается максимум m_{pr} , происходит ее резкое снижение из-за повышенных потерь в боковые валики. Установлен рост интенсивности увеличения m_{pr} с увели-

чением отношения h_3/H_0 .

4. Анализ результатов исследований позволяет рекомендовать области рациональных значений параметров адаптируемого отвала с изменяемой геометрией при копании в диапазонах: $b/B_0 = 0,375-0,45$; $\Theta = 12-16^\circ$; $\alpha_y = 18-25^\circ$; $\alpha_{y\max} = 30^\circ$ – при заглублении отвала в прочные грунты.

5. Угол максимального поворота в плане боковых секций вперед $\alpha_{y\max}$ принимается по условию обеспечения нормального перемещения грунта в сторону от направления движения бульдозера, с

учетом его влияния на величину угла перекоса боковых секций и выступающей части ножа средней секции. По этим соображениям рекомендуется $\alpha_{y\max} = 25-30^\circ$.

Финансирование, востребованность. Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869252, договор 217/30-22-24 от 18.10.2022), а также является промежуточным результатом выполнения диссертационной (PhD) работы Аукиеновой Б.К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аукиенова Б.К., Кадыров Ж.Н., Кочетков А.В., Дудкин М.В. Бульдозер-террасер. Патент на изобретение РК № 34084, E02F 3/76, опубл. 27.12.2019, бюл. № 52.
2. M. Doudkin, A. Kim, B. Aukenova, R. Radenkov, A. Saveliev, N. Andryukhov. Experimental Studies on the Interaction Process with the Environment of an Adaptable Bulldozer Blade with Variable Geometry. I.R.E.M.E., Vol. 15, No. 11, 2021. – Pp. 554-565. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756>
3. Баловнев В.И., Раденков Р.Л., Савельев А.Г., Овчаренко Н.С. Рабочий орган бульдозера. А.С. СССР, № 1548351, E02F 3/76, опубл. 07.03.1990, бюл. № 9.
4. Баловнев В.И., Раденков Р.Л., Савельев А.Г. Бульдозерное оборудование. А.С. СССР, № 1553619, E02F 3/76, опубл. 30.03.1990, бюл. № 12.
5. Бабаев Т.К. Обоснование рациональных параметров и разработка конструкции дополнительного бокового отвала, расположенного вне опорной плоскости гусеничного бульдозера: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / МАДИ. – М., 2021. – 167 с.
6. Козликин В.И. Исследование процессов копания и транспортировки грунта бульдозерными отвалами сферического типа. Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1980. – 196 с.
7. Кабашев А.Р. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров бульдозера-террасера с выдвижным отвалом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / КазАТК. – Алматы, 2009. – 126 с.
8. M. Doudkin, A. Kim, B. Aukenova, R. Radenkov, A. Saveliev, N. Andryukhov. Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer blade with variable geometry. Journal of Applied Engineering Science, Vol. 20, No. 3, 2022. DOI:10.5937/jaes0-37210.
9. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожных машин. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
10. Mehari Z. Tekestea, Thomas R. Wayb, Zamir Syedc, Robert L. Schaferb. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM). Journal of Terramechanics Volume 88, April 2020, Pages 41-52.

Өзгермелі геометриясы бар бульдозер қайырмасының қоршаған ортамен өзара әрекеттесу процесін зерттеу

¹АУКЕНОВА Бекзат Кабыкенқызы, докторант, bekzat89a@mail.ru,

²РАДЕНКОВ Радослав Лазаров, т.ғ.к., доцент, rlr@abv.bg,

³САВЕЛЬЕВ Андрей Геннадьевич, т.ғ.д., профессор, prof.saveliev@yandex.ru,

^{1*}ДУДКИН Михаил Васильевич, т.ғ.д., профессор, vas_dud@mail.ru,

¹КУМЫКОВА Татьяна Михайловна, т.ғ.к., профессор, ktm6010@mail.ru,

¹«Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Өскемен, А.К. Протозанов көшесі, 69,

²«Әулие Климент Охридский» София университеті, Болгария, София, Патша-Азаткер бульвары, 15,

³Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті (МАДИ), Ресей, Мәскеу, Ленинград даңғылы, 64,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – рационалды параметрлерді, ұтымды пайдаланудың едәуір ауқымын және олардың профилінің өзгермелі геометриясымен өзгермелі жұмыс жағдайларына бейімделетін әмбебап қайырманы орнату арқылы бульдозер-террасердің тиімділігін арттыруды теориялық және эксперименттік растау. Эксперименттік зерттеулер жинақталған топырақ призмасының көлемін анықтаудың аналитикалық тәуелділіктерін, сондай-ақ өзгермелі геометриясы бар пышақпен кесуге және қазуға көлденең қарсылық компоненттерін анықтау кезінде қабылданған болжамдардың дұрыстығын растады. Жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде алынған эксперименттік және теориялық тәуелділіктер функционалдық шектеулерді ескере отырып өзгермелі геометриясы бар пышақтың негізгі параметрлерін анықтау әдістемесін жасауға мүмкіндік берді. Мақалада қарама-қарсы күштердің (олардың көлденең және тік компоненттерінің) қазуға

тәуелділігін тексерудің теориялық және эксперименттік нәтижелерінің кезеңдері және өзгермелі геометриясы бар қайырманың анықтаушы параметрлерінен (ұстау, еңкейту және кесу бұрыштары, пышақтың ені және т.б.) әзірленген материалды сызу призмасын құру көрсетілген. Өзгермелі геометриясы бар қайырманың негізгі параметрлерін анықтаудың ұсынылған әдістемесі оларды қайырманың әмбебап мақсатын, жүргізілген зерттеулердің нәтижелерін, параметрлер арасындағы геометриялық тәуелділіктерді және әртүрлі функционалдық шектеулерді ескере отырып таңдауға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: бульдозер, өзгермелі геометриялық қайырма, шығыңқы ортаңғы пышақ, қазуға төзімділік күші, қамту ені, бүйірлік бөліктердің бұрылу бұрышы.

Investigation of the Interaction Process with the Environment of a Bulldozer Bladow with Variable Geometry

¹**AUKENOVA Bekzat**, Doctoral Student, bekzat89a@mail.ru,

²**RADENKOV Radoslav**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, rlr@abv.bg,

³**SAVELIEV Andrey**, Dr. of Tech. Sci., Professor, prof.saveliev@yandex.ru,

^{1*}**DOUDKIN Mikhail**, Dr. of Tech. Sci., Professor, vas_dud@mail.ru,

¹**KUMYKOVA Tatyana**, Cand. of Tech. Sci., Professor, ktm6010@mail.ru,

¹NCJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», Kazakhstan, Oskemen, A.K. Protozanov Street, 69,

²Sofia University «Saint Kliment Ohridski», Bulgaria, Sofia, Tsar Liberator Boulevard, 15,

³Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Russia, Moscow, Leningrad Avenue, 64,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the work is theoretical and experimental confirmation of rational parameters, a significant range of rational use and efficiency growth of bulldozers-terrasers due to the installation of a universal, adaptable to variable working conditions of the blade with a variable geometry of its profile. Experimental studies have confirmed the correctness of the assumptions made when deriving analytical dependencies for determining the volume of the accumulated ground prism, as well as the components of the horizontal resistance to cutting and digging with a blade with a variable geometry. The experimental and theoretical dependences obtained as a result of the research made it possible to develop a methodology for determining the main parameters of a blade with a variable geometry, taking into account functional limitations. The article shows the stages of theoretical and experimental results of checking the dependence of the counteraction forces (their horizontal and vertical components) on digging and generating a drawing prism of the material being developed on the defining parameters of the blade with variable geometry (angles of capture, tilt and cutting, blade width, etc.). The proposed method for determining the main parameters of the blade with variable geometry allows you to choose them taking into account the universal purpose of the blade, the results of the research, the existing geometric dependencies between the parameters and various functional limitations.

Keywords: bulldozer, blade with variable geometry, protruding middle knife, digging resistance force, grip width, angle of rotation of side sections.

REFERENCES

1. Aukenova B.K., Kadyrov Zh.N., Kochetkov A.V., Dudkin M.V. Bulldozer terracer. Patent for invention RK No. 34084, E02F 3/76, publ. 27.12.2019, bul. No. 52.
2. M. Doudkin, A. Kim, B. Aukenova, R. Radenkov, A. Saveliev, N. Andryukhov. Experimental Studies on the Interaction Process with the Environment of an Adaptable Bulldozer Blade with Variable Geometry. I.R.E.M.E., Vol. 15, No. 11, 2021. – Pp. 554-565. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756>
3. Balovnev V.I., Radenkov R.L., Saveliev A.G., Ovcharenko N.S. The working body of the bulldozer. Patent USSR, No. 1548351, E02F 3/76, publ. 03/07/1990, bul. No. 9.
4. Balovnev V.I., Radenkov R.L., Saveliev A.G. Bulldozer equipment. Patent USSR, No. 1553619, E02F 3/76, publ. 03/30/1990, bul. No. 12.
5. Babaev T.K. Justification of rational parameters and design development of an additional side blade located outside the reference plane of a tracked bulldozer: Dis. ... of Cand. of Tech. Sc.: 05.05.04 / MADI. – Moscow, 2021. – 167 p.
6. Kozlikin V.I. Study of the processes of digging and transporting soil with bulldozer blades of a spherical type. Dis. ... of Cand. of Tech. Sc., 1980, 196 p.
7. Kabashev A.R. Theoretical and experimental substantiation of the parameters of a bulldozer-terraser with a retractable blade: Dis. ... of Cand. of Tech. Sc.: 05.05.04 / KazATK. – Almaty, 2009. – 126 p.
8. M. Doudkin, A. Kim, B. Aukenova, R. Radenkov, A. Saveliev, N. Andryukhov. Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer bladow with variable geometry. Journal of Applied Engineering Science, Vol. 20, No. 3, 2022. DOI:10.5937/jaes0-37210.
9. Balovnev V.I. Modeling of the processes of interaction with the environment of the working legs of road-building machines. Higher School, 1981, 335 p.
10. Mehari Z.Tekeste, Thomas R.Wayb, ZamirSyedc, Robert L.Schaferb. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM). Journal of Terramechanics Volume 88, April 2020, Pages 41-52.