

Научная статья

УДК 629.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>

EDN: KBSIAM



# МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗМЫ ВОЛОЧЕНИЯ

**П.А. Григорьев, Л.А. Сладкова** ✉Российский университет транспорта (МИИТ),  
г. Москва, Россия✉ ответственный автор  
[rich.cat2012@yandex.ru](mailto:rich.cat2012@yandex.ru)

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** На основании проведенного натурного эксперимента была дана оценка процесса формирования призмы волочения перед отвальной поверхностью и выявлены качественные показатели, подтверждающие теоретические исследования данного процесса.

**Материалы и методы.** При проведении экспериментальных исследований использовались основные положения теории планирования эксперимента, базирующиеся на методах математической статистики. В соответствии с теоретическими исследованиями процесс формирования призмы волочения перед рабочими органами землеройных машин сопровождается не только изменением скорости перемещения грунта по поверхности, происходящими в результате действия адгезионных сил и сил трения, но и возникающего в процессе перемещения грунта по криволинейной поверхности отвала ускорения Кориолиса, которое является, на наш взгляд, основной причиной неравномерного распределения грунта перед отвальной поверхностью.

**Результаты.** Предлагаемая методика проведения и обработки результатов эксперимента позволила выявить, что параметрами, характеризующими силу налипания грунта на поверхности рабочего органа отвального типа являются: объемная масса грунта; скорость перемещения грунта в  $i$ -й точке поверхности рабочего органа; время перемещения грунта по отвальной поверхности; коэффициент трения грунта по поверхности рабочего органа; время взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа. Методика обработки результатов эксперимента позволила выявить качественно и оценить количественно процесс формирования призмы волочения при перемещении грунта по поверхности рабочего органа в двумерном пространстве, определить изменение скоростей перемещения грунта в произвольной точке поверхности и провести верификацию рабочей гипотезы и теоретических исследований о характере изменения скоростей перемещения грунта перед отвальной поверхностью.

**Обсуждение и заключение.** Установлено, что для снижения липкости необходима оптимизация параметров рабочего органа, глубины копания и времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** натурный эксперимент, результаты, теоретическое обоснование, качественные показатели, количественная оценка, призма волочения, рабочий орган, машина для земляных работ, методика

**Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.**

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: Григорьев П.А., Сладкова Л.А. Методика проведения экспериментальных исследований для оценки качественных и количественных показателей формирования призмы волочения // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 354-365. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>

© Григорьев П.А., Сладкова Л.А., 2024

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>  
EDN: KBSIAM

## METHODOLOGY OF CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES TO ASSESS QUALITATIVE AND QUANTITATIVE INDICATORS OF DRAWING PRISM FORMATION

**Pavel A. Grigorev, Lubov A. Sladkova** ✉  
Russian University of Transport,  
Moscow, Russia  
✉ corresponding author  
[rich.cat2012@yandex.ru](mailto:rich.cat2012@yandex.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** Based on a full-scale experiment, the process of forming a drawing prism in front of the blade surface was assessed and qualitative indicators that confirm theoretical studies of this process were identified.

**Materials and methods.** In conducting experimental research, the main provisions of the theory of experimental design, based on the methods of mathematical statistics, were used. In accordance with theoretical studies, the process of formation of the drawing prism in front of the working bodies of earth-moving machines is accompanied not only by a change in the speed of soil movement on the surface, which occurs as a result of the action of adhesive forces and frictional forces, but also by the Coriolis acceleration that occurs in the process of moving soil along the curved surface of the dump, which, in our opinion, is the main reason for the uneven distribution of soil in front of the dump surface.

**Results.** The proposed method of conducting and processing the results of the experiment made it possible to identify that the parameters characterizing the force of soil adhesion on the surface of the working body of the dump type are: volumetric mass of soil; the speed of soil movement at the  $i$ -th point of the surface of the working body; time of soil movement on the dump surface; coefficient of friction of the soil on the surface of the working body; time of interaction of the soil with the surface of the working body. The method of processing the results of the experiment made it possible to qualitatively identify and quantitatively assess the process of formation of the drag prism when moving soil on the surface of the working body in two-dimensional space, to determine the change in the velocities of soil movement at an arbitrary point of the surface and to verify the working hypothesis and theoretical studies on the nature of the change in the velocities of soil movement in front of the dump surface.

**Discussions and conclusions.** It has been established that in order to reduce stickiness, it is necessary to optimize the parameters of the working body, the depth of digging and the time of interaction of the soil with the surface of the working body.

**KEYWORDS:** full-scale experiment, results, theoretical justification, qualitative indicators, quantitative assessment, drawing prism, working body, earthworks machine, methodology

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

*For citation.* Grigorev P.A., Sladkova L.A. Methodology of conducting experimental studies to assess qualitative and quantitative indicators of drawing prism formation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 354-365. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-354-365>

© Grigorev P.A., Sladkova L.A., 2024



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение физико-механических свойств грунтов [1, 2, 3] как объекта разработки рабочими органами землеройных машин показало, что липкость грунта определяется его физико-механическими характеристиками: показателями влажности, типами воды в грунте, углами внешнего и внутреннего трения и т.д. В частности, например, авторы<sup>1</sup> считают, что липкость способствует формированию ядра уплотнения, которое способно заполнять пустоты на поверхности рабочего органа. Авторы<sup>2</sup> предполагают, что показатели процесса липкости зависят от характера взаимодействия рабочих органов землеройных машин с грунтом. Вопросам, связанным с процессом возникновения липкости и способами борьбы с ней, посвящены труды отечественных и зарубежных ученых. Развитие данного научного направления на современном этапе можно встретить также в трудах ученых Китая, Вьетнама, России [3, 4, 5]. Непосредственная взаимосвязь формирования призмы волочения с геометрическими характеристиками отвала достаточно полно отражена в работах исследователей России<sup>3</sup>, Украины и Белоруссии [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

В научной работе [14] при проведении теоретических исследований авторами было установлено, что при формировании призмы волочения перед рабочим органом отвального типа на частицы грунта, взаимодействующие с рабочей поверхностью, кроме основных сил, учитываемых авторами [1, 2], также действуют силы Кориолиса, что является основной причиной неравномерности распределения грунта по поверхности отвала и отчасти способствует налипанию грунта. Проведенный анализ состояния вопроса показал отсутствие качественных и количественных показателей формирования призмы волочения.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основой для проведения экспериментальных исследований является дополнение исследований авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6] и верифика-

ция теоретических исследований [14] с целью получения качественных и количественных характеристик формирования призмы волочения с учетом адгезионных, когезионных сил и сил трения на поверхности рабочих органов землеройных машин в реальных условиях эксплуатации.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе проведения эксперимента появляется возможность изучить качественные показатели процесса копания грунта, а также провести количественную оценку исследуемых параметров.

В данном случае целью эксперимента является оценка изменения показателей усилий копания грунта рабочим органом отвального типа в процессе формирования призмы волочения.

В статье<sup>4</sup> теоретически было установлено, что после отделения элементной стружки от грунтового массива (процесс резания грунта)<sup>5</sup> элементная стружка начинает перемещаться по криволинейной поверхности рабочего органа землеройной машины и в процессе разработки грунта формирует призму волочения. Этот процесс наблюдается при копании грунта рабочими органами отвального, ковшового, совкового и дискового типов.

Очевидно, что в начальный момент времени, отделенная от грунтового массива стружка до момента взаимодействия с поверхностью рабочего органа находится в состоянии покоя, т.е. ее скорость равна нулю.

Далее, учитывая наличие поверхности, эта стружка начинает перемещаться по поверхности рабочего органа со скоростями, результирующая которых  $V$  является постоянной величиной, равной скорости перемещения базовой машины в процессе разработки грунта (рисунок 1).

<sup>1</sup>Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

<sup>2</sup>Баловнев В.И. Физическое моделирование резания грунтов. М.: Машиностроение, 1969. 159 с.

<sup>3</sup>Морозов С.Ю. Моделирование параметров призмы волочения при производстве отвальных работ бульдозером KOMATSU // Сборник трудов XV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 18–21 апреля 2023 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», 2023. С. 58–62.

<sup>4</sup>Там же. С. 58–62.

<sup>5</sup>Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1990. 358 с.

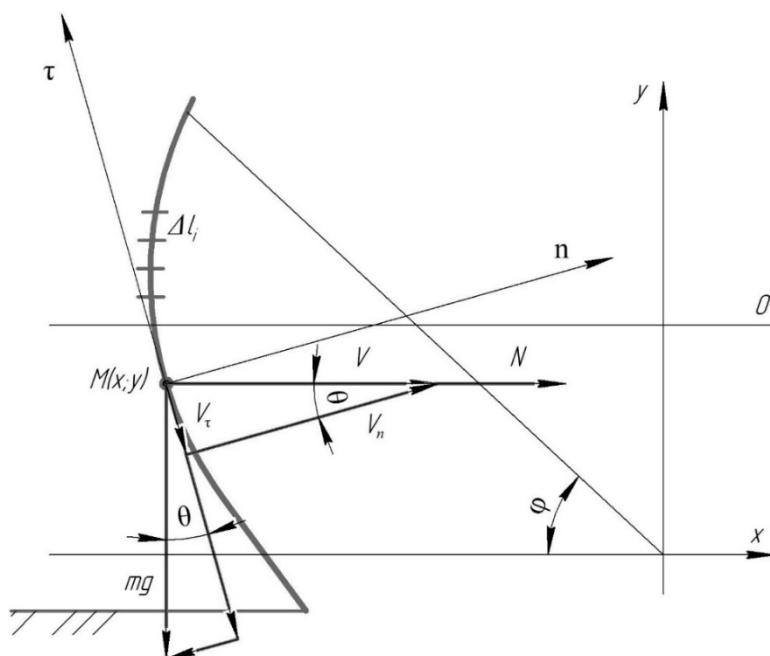


Рисунок 1 – Изменение скорости перемещения грунта по поверхности рабочего органа  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Change in the speed of soil movement on the surface of the working body  
Source: compiled by the authors.

Рассмотрим некоторую массу грунта весом  $mg$ , находящуюся в произвольный момент времени в точке  $M(x, y)$  криволинейной поверхности рабочего органа. При разложении поступательной скорости  $V$  грунта (скорость перемещения базовой машины при формировании призмы волочения) на составляющие  $V_n$  и  $V_\tau$ , направленные соответственно по нормали  $n$  и касательной  $\tau$  к криволинейной поверхности рабочего органа видно, что они равны

$$V_\tau = V \sin \theta; \quad V_n = V \cos \theta. \quad (1)$$

При этом скорость  $V$  является полным дифференциалом в проекциях на оси  $x$  и  $y$ :

$$V = \frac{\partial x}{\partial t} dt + \frac{\partial y}{\partial t} dt. \quad (2)$$

Рассмотрим изменение скорости в проекциях на оси  $x$  и  $y$  (рисунок 2).

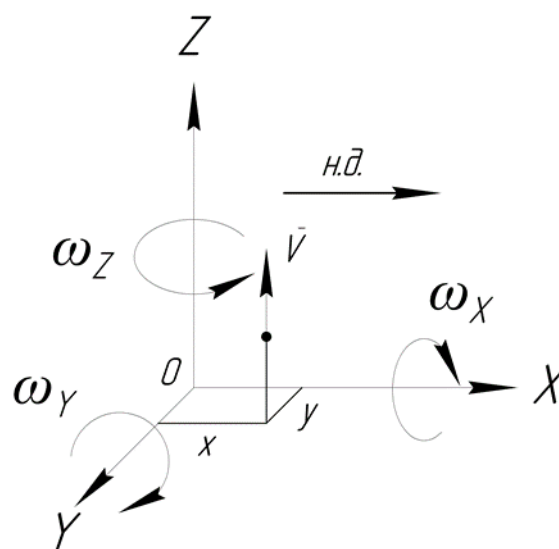


Рисунок 2 – Изменение скорости в проекциях на оси  $x$  и  $y$   
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Change of velocity in projections on the  $x$  and  $y$  axes  
Source: compiled by the authors.

При этом считаем, что поверхность рабочего органа совпадает с плоскостью, то есть величина в момент контакта поверхности рабочего органа с грунтом может быть принята равной нулю из-за того, что толщина стружки по отношению к размерам призмы волочения является величиной второго порядка малости.

С другой стороны, в соответствии с зависимостью (8) [7] вектор перемещения скорости равен

$$\vec{V} = \vec{V}_{сж} + \vec{V}_{вр}, \quad (3)$$

где  $\vec{V}_{сж}$  – изменение скорости перемещения грунта по отвальной поверхности за счет ее

сжатия в результате действия сил трения и липкости (адгезии);

$\vec{V}_{вр}$  – изменение скорости вращения частиц грунта по отвальной поверхности за счет в результате действия на них сил Кориолиса.

Исходя из сказанного, можно считать (рисунок 3), что процесс сжатия грунта происходит по направлению оси  $z$  за счет изменения скорости  $\vec{V}_y$  и  $\vec{V}_z$  (рисунок 3, б, в), а смещение направления грунтовой стружки к центру за счет сил Кориолиса происходит при развороте грунтовой стружки относительно оси  $Oy$  за счет изменения скорости  $\vec{V}_x$  (рисунок 3, г).

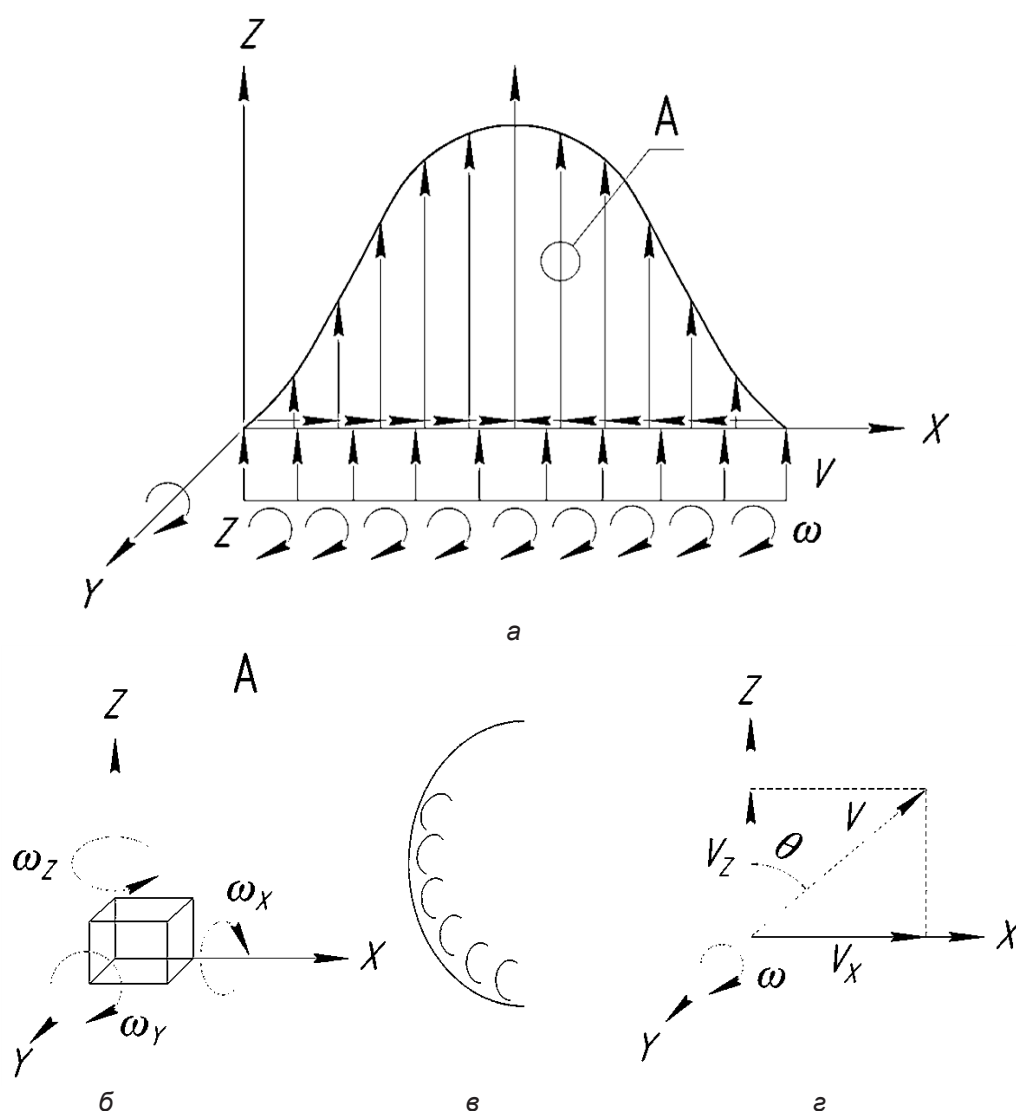


Рисунок 3 – Перемещение грунта по поверхности рабочего органа с учетом действия кориолисовых сил  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Soil movement on the surface of the working body taking into account the action of Coriolis forces  
Source: compiled by the authors.

Таблица  
Тактико-технические характеристики отвала  
Источник: составлено авторами.

Table  
Performance characteristics of the blade  
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	Величина
1	Емкость отвала	м <sup>3</sup>	5,61
2	Длина отвала	мм	3410
3	Высота отвала	мм	1425
4	Максимальное заглубление отвала в грунт	мм	500
5	Масса бульдозерного оборудования	кг	2390
6	Удельное давление на грунт	кПа	62,9

Таким образом, из изложенного установлено, что образующая при формировании призмы волочения будет представлять собой линию, представляющую степенную зависимость с четным показателем степени типа (рисунок 3, а), так как она лежит в положительном квадрате декартовой системы координат:

$$z = f(x^{2n}y^{2m}), \quad (4)$$

где  $m$  и  $n$  – показатели степени, зависящие от физико-механических свойств грунта;

$x$  и  $y$  – изменяемые в течение времени  $t$  показатели изменения положения грунтовой стружки на поверхности отвала.

За счет снижения скорости перемещения грунта по криволинейной поверхности, что происходит из-за действия силы Кориолиса, на периферии отвала возможно налипание грунта на этих участках отвальной поверхности.

Для обоснования изложенной выше рабочей гипотезы необходимо проведение экспериментальных исследований.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились в естественных условиях эксплуатации на строительной площадке в г. Воронеже на грунте III категории трудности разработки на бульдозере с неповоротным отвалом «СИГМА» (D65TX-16) фирмы KOMATSU<sup>6</sup>, выполненным из высокопрочной стали.

Ниже приведем тактико-технические характеристики отвала (таблица).

При проведении эксперимента грунт представлял собой супесь с частичными гравийными включениями крупностью не более 5 мм. Трудность экскавации грунта определялась динамическим плотномером конструкции ДорНИИ, среднестатистическая величина которого равна  $C = 12,3$  удара, что соответствует грунту третьей категории трудности разработки. Весовая влажность грунта лежала в пределах 15...18%, что соответствует минимальной величине липкости грунта на поверхности рабочего органа.

Параметры разработки грунта в процессе копания грунта отвальной поверхностью приведены ниже:

- угол резания  $\alpha = 55^\circ$ ;
- угол установки отвала –  $72^\circ$ .

В соответствии с рекомендациями проведения экспериментальных исследований<sup>7</sup> [11] число параллельных опытов, проводимых при идентичных условиях, было равно 3. Каждая серия опытов проводилась на различной глубине копания (100, 200 и 300 мм).

При проведении экспериментальных исследований перемещение бульдозера было прямолинейным со скоростью 4 км/ч (1,1 м/с). Процесс копания фиксировался на видеокамеру, закрепленную на отвальной поверхности на некотором расстоянии от отвала и позволяющую фиксировать процесс копания грунта и формирование призмы волочения до полного набора (рисунок 4).

<sup>6</sup> Bul'dozer Komatsu D65EX-16 // «GreenLight». Режим доступа: <https://gltm.ru/katalog/avtobusy/buldozer-komatsu-d65ex-16> (дата обращения: 01.04.2024).

<sup>7</sup> Сладкова Л.А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин: учебное пособие. М.: МГУПС (МИИТ), 2016. 275 с.





Рисунок 4 – Процесс копания грунта:  
а – отделение элементной стружки;  
б – начало формирования призмы волочения (подъем грунта вверх по отвалу);  
в – полная призма волочения  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Soil digging process:  
a – separation of elemental chips;  
b – the beginning of the formation of the drawing prism (lifting the soil up the blade);  
c – full lug prism  
Source: Compiled by the authors.

На рисунке 4, а видно, что левый край отвала имеет большее заглубление, чем правый, что в дальнейшем будет оказывать влияние на формирование призмы волочения.

Число полученных кадров при проведении эксперимента зависело от времени отделения элементной стружки от грунтового массива и отличались друг от друга. В свою очередь время отделения стружки от грунтового массива зависело от величины заглубления отвала в грунт.

#### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Задачами при обработке результатов эксперимента является:

- оценка формирования призмы волочения при перемещении грунта по поверхности рабочего органа, т.е. по направлениям осей  $z$  и  $x$ ;
- определение скоростей перемещения грунта в произвольной точке поверхности;
- верификация зависимости (3) рабочей гипотезы и теоретических исследований.

Отснятый в процессе проведения эксперимента материал по набору призмы волочения подвергался кадрированию с частотой 1 кадр /с. Говоря другими словами, отснятый видеоматериал, продолжительность действия которого в течение времени  $t$  соответствовала набору полной призмы волочения перед отвальной поверхностью. При обработке информации для каждой серии опытов были выбраны кадры с равной периодичностью через три секунды, начиная с момента вырезания элементной стружки.

На рисунке 5 видно, что материал каждого кадра представляет собой трехмерную перспективу.

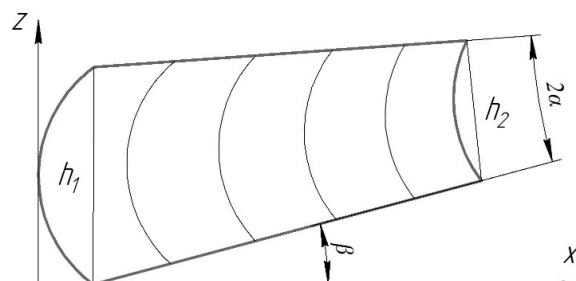


Рисунок 5 – Отвал бульдозера в перспективе  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Bulldozer blade in perspective  
Source: compiled by the authors.

Для оценки закономерностей формирования призмы волочения разобьем отвал на секции по длине на 5 частей, направленных по перспективной оси, проходящей вдоль отвала, что позволяет оценить изменения, происходящие при формировании призмы волочения по осям  $z$  и  $x$ .

Учитывая то, что эксперимент проводился в реальных условиях эксплуатации, сопровождающийся задержками момента начала движения с включенной камерой, рекомендуется для получения реальной картины формирования призмы волочения выбор кадрированных фотографий начинать не с первого кадра. Например, в первом эксперименте он начинался с 16 кадра, во втором – с 35, в третьем с 26.

Номер каждого последующего кадра был третьим, что позволило фиксировать время (3 с) для каждого этапа набора призмы волочения. Таким образом, зная фиксированное время изменения положения грунта по каждому последующему кадру и измерив расстояние, на которое переместится грунт за это время, определяется среднестатистическая скорость перемещения грунта по отвальной поверхности. Это положение основано на том, что каждая вырезаемая стружка грунта проходит между призмой волочения и отвальной поверхностью. При этом на нее, в соответствии с исследованиями авторов<sup>8,9</sup>, между контактирующими поверхностями возникают в первом случае силы трения и силы адгезии между грунтом и отвальной поверхностью, а во втором случае силы внутреннего трения между частицами грунта.

Для учета погрешности размеров, полученных в результате ведения съемки по каждому кадру, определялись масштабные коэффициенты по высоте  $k_h$  и длине  $k_L$ .

Для перехода от параметров кадра к параметрам оригинала величина масштабирования (мм/м) определялась по зависимостям:

$$k_h = \frac{h_{iM}}{h_{10}}; \quad (5)$$

$$k_L = \frac{L_{iM}}{L_0}, \quad (6)$$

где  $h_{iM}$  и  $L_{iM}$  – размеры высоты и длины отвала на кадре соответственно, мм;

$h_{10}=1,425$  и  $L_0=3,410$  – размеры высоты и длины отвала в оригинале в соответствии с паспортными данными, м.

Для оценки изменения скорости перемещения грунта вверх по отвальной поверхности определим высоту  $\Delta l_i$  подъема грунта по отвальной поверхности в соответствии с его положением на каждом последующем кадре (рисунок 4).

Зная скорость перемещения бульдозера и время до набора полной призмы волочения, оценим время  $t_i$ , приходящееся на каждый кадр по зависимости

$$t_i = \frac{t}{N}, \quad (7)$$

где  $t$  – время копания грунта до набора полной призмы волочения;

$N$  – число кадров.

Учитывая, что кадры выбирались через одинаковый интервал, очевидно, что для всех  $x$  участков величина  $t_i=3$  с будет одинаковая. Тогда скорость на каждом последующем участке  $\Delta l_i$  будет равна

$$v_i = \frac{2\Delta l_i}{t} - v_{i-1}, \quad (8)$$

где  $v_{i-1}$  – скорость перемещения грунта на предыдущем участке.

Очевидно, что в начальный момент разработки грунта скорость  $v_{i-1}$  равна скорости перемещения бульдозера, т.е. равна 1,1 м/с.

Для упрощения расчетов воспользуемся схемой, приведенной на рисунке 6.

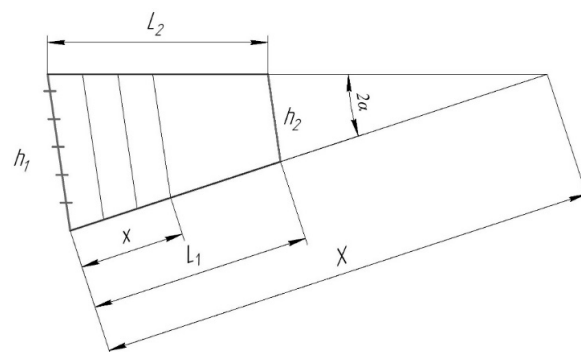


Рисунок 6 – Схема для определения параметров призмы волочения в процессе копания грунта  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Diagram for determining the parameters of the drawing prism in the process of digging the soil  
Source: compiled by the authors.

Здесь величину подъема грунта по отвалу в произвольной точке определим по теореме Фалеса:

$$y = \frac{\Delta l_i}{x} (h_1 - h_2), \quad (9)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – высота отвала в перспективе в соответствии с рисунком 6.

<sup>8</sup>Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

<sup>9</sup>Баловнев В.И. Физическое моделирование резания грунтов. М.: Машиностроение, 1969. 159 с.



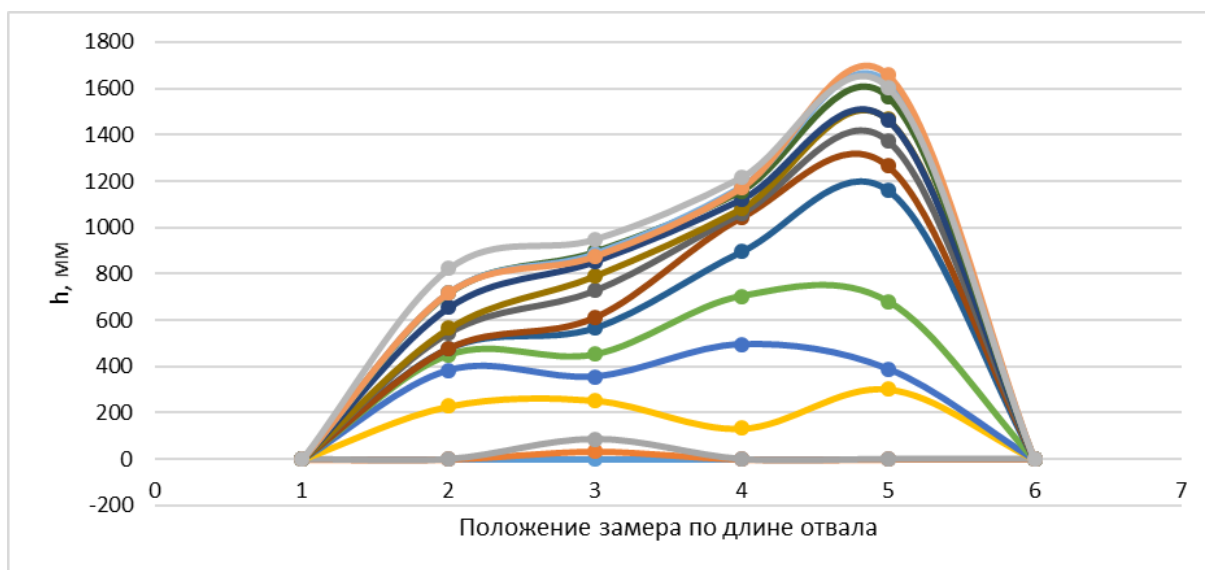


Рисунок 7 – Процесс качественных изменений положения грунта при формировании призмы волочения [EXCEL]  
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The process of qualitative changes in the position of the soil during the formation of the drawing prism [EXCEL]  
Source: compiled by the authors.

Далее проводим проверку результатов эксперимента на воспроизводимость по критерию Кохрена (<sup>2</sup>).

Результаты обработки эксперимента заносились в специально разработанные таблицы, учитывающие кадрирование процесса формирования призмы волочения, изменение размеров призмы в соответствии с методикой, представленной на рисунках 5, 6.

Глубина копания оказывает существенное влияние на процесс формирования призмы волочения. В качественном выражении этот процесс можно отследить на рисунке 7.

Представленные на рисунке 7 кривые характеризуют качественный процесс формирования призмы волочения перед отвальной поверхностью, что согласуется с гипотезой о влиянии на этот процесс сил Кориолиса. При этом каждая кривая показывает изменение положения частиц грунта (пройденное расстояние  $\Delta l_i$ ) относительно нижней кромки ножа отвала за заданный промежуток времени (3 с).

Выше отмечалось, что в результате неровности поверхности разрабатываемого грунта (см. рисунок 4), зарезание левой стороной

отвала происходило на большей глубине, что привело к увеличению объема призмы волочения с этой стороны, т.е. более быстрому ее формированию.

На рисунке 7 видно, что высота набора призмы превышает высоту реальной отвальной поверхности. Погрешность составляет 16%, что допустимо при проведении натурных экспериментов.

Очевидно, что изменение призмы волочения по высоте отвала  $\Delta l_i$  равна

$$\Delta l_i = v_{i-1}t + \frac{v_i - v_{i-1}}{2}t. \quad (10)$$

В соответствии с законом сохранения количества движения<sup>10</sup> имеем

$$\frac{m_i(v_i - v_{i-1})}{t} = F, \quad (11)$$

где  $F$  – усилие перемещения грунта массой  $m_i$  по поверхности рабочего органа в течение времени  $t$ .

Масса грунта перед поверхностью рабочего органа равна

<sup>10</sup> Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.

$$m_i = \gamma h L \sum_{i=1}^n \Delta l_i, \quad (12)$$

где  $\gamma$  – объемная масса грунта, кг/м<sup>3</sup>;  
 $h$  – глубина копания, м;  
 $L$  – длина отвала, м.

Тогда сила налипания грунта на поверхность рабочего органа будет равна

$$F_H = F - F_{mp}, \quad (13)$$

где  $F_{mp}$  – сила трения грунта по поверхности рабочего органа, Н;

$F_H$  – сила налипания, Н.

Данное положение подтверждается результатами исследований И.В. Крагельского<sup>11</sup> при получении суммарного коэффициента трения, являющегося результатом действия адгезионных и когезионных сил. Применительно к трению материалов составляющую адгезионную компоненту коэффициента трения  $f_{ad}$  предлагается оценивать по зависимости

$$f_{ad} = \frac{\tau}{HB}, \quad (14)$$

где  $\tau$  – величина касательного напряжения при трении, Па;

$HB$  – твердость материала по Бринеллю, Па.

С другой стороны, видно, что «при внешнем трении (в нашем случае мы рассматриваем только факт взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа), материал перемещается в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости, при этом характер перемещения носит «синусоидальный характер», что подтверждает наши исследования.

В этом случае «величину адгезии» (автор<sup>7</sup>, наверное, имел в виду коэффициент адгезии) рекомендуется определять по зависимости

$$f_{ad} = \frac{\tau}{\sigma_s}, \quad (15)$$

где  $\sigma_s$  – величина предела текучести материала (грунта), Па.

Силу трения грунта по поверхности рабочего органа определим по формуле (см. рисунок 1):

$$F_{mp} = F_n f = m_i g f \sin \theta, \quad (16)$$

где  $F_n$  – сила нормального давления грунта массой на поверхность рабочего органа, Н;

$f$  – коэффициент трения грунта по поверхности рабочего органа.

Используя зависимости (10), (11), (12) и (13) преобразуем выражение (16).

Усилие налипания грунта на поверхность рабочего органа будет равна

$$\begin{aligned} F_H &= \frac{m(v_i - v_{i-1})}{t} - m_i g f \sin \theta = \\ &= \frac{m_i(v_i - v_{i-1})}{t} - m_i g f \sin \theta = \\ &= \gamma h L \Delta l_i \sum_{i=1}^n \left( \frac{(v_i - v_{i-1})}{t} - g f \sin \theta \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Из выражения (17) видно, что сила налипания грунта на поверхность рабочего органа зависит от следующих параметров:

- объемной массы грунта;
- объема призмы волочения;
- скорости перемещения грунта в  $i$ -й точке поверхности рабочего органа;
- коэффициента трения грунта по поверхности рабочего органа;
- времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа.

Очевидно, что снижению этого параметра способствуют снижение глубины копания, длины отвала и увеличение времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа, что подтверждает исследования авторов статьи [15]. В первом случае это ведет к снижению производительности, а во втором – к возрастанию усилий копания грунта.

Анализ зависимости (17) позволяет определить рациональное время копания грунта до набора полной призмы волочения:

$$t_i \leq \frac{(v_i - v_{i-1})}{g f \sin \theta}. \quad (18)$$

Зная силу налипания грунта, определяемую по зависимости (17), вычислим тангенциальную составляющую напряжения в грунте в процессе формирования призмы волочения по формуле

$$\tau \leq \frac{F_H}{S}, \quad (19)$$

где  $S$  – площадь контакта грунта с поверхностью отвала, м<sup>2</sup>.

<sup>11</sup> Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой исследований, рассматриваемых в статье, являются предлагаемые методики проведения эксперимента и обработки результатов экспериментальных данных, которые позволили провести качественную и количественную оценку процесса формирования призмы волочения при перемещении грунта по отвальной поверхности. Исходя из полученных результатов, установлены теоретические зависимости, позволяющие определять изменение скоростей перемещения грунта в произвольной точке отвальной поверхности, провести верификацию рабочей гипотезы и предложить мероприятия по выбору рациональных параметров, влияющих на процесс копания грунта: для снижения липкости необходима оптимизация параметров рабочего органа, глубины копания и времени взаимодействия грунта с поверхностью рабочего органа.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Belousov S.V., Saprykin E.A., Karmazin I.S. Explanation of the angle of sharpening of a plough cutting working body. *E3S Web of Conferences*. Sevastopol: EDP Sciences. 2019. P. 00025. DOI 10.1051/e3sconf/201912600025.
2. Zenkov S.A. Application of thermal effect as a means to combat ground-and-machine part adhesion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. 2020. P. 32060. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032060.
3. Ren L., Cong Q., Tong G., Chen B. Reducing adhesion of soil against load-ing shovel using bionic electro-osmosis method. *Journal of Terramechanics*. 2001; 38: 211–219.
4. Yang X., Xia R., Zhou H., Guo L., Zhang L. Bionic surface design of cemented car-bide drill bit. *Science China Technological Sciences*. 2016; 59: 175–182.
5. Tagar A.A., Ji C., Ding Q. fan etc. Soil failure patterns and draft as influ-enced by consistency limits: An evaluation of the remolded soil cutting. 2014; 137: 58–66.
6. Ничке В.В., Тулузов А.Г. Формирование призмы волочения и определение рациональных отношений высоты и ширины отвала // ХНАД, Харьков. Режим доступа <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-prizmy-volocheniya-i-opredelenie-ratsionalnyh-otnosheniy-vysoty-i-shiriny-otvala> (дата обращения: 07.04.2024)
7. Берестов Е.И., Лесковец И.В. Методика расчета геометрических параметров призмы волочения на отвале бульдозера // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 2(23). С. 6–12. Режим доступа: <https://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/1449/57253243> (дата обращения: 07.04.2024)

8. Шемякин С.А., Гамоля Ю.А., Шишкин Е.А. Сопротивление копанию несвязных грунтов отвалом бульдозера // Ученые заметки ТОГУ, Хабаровск. 2016. Том 7, № 1. С. 217–219.

9. Берестов Е.И., Лесковец И.В. Влияние свойств грунта на усилия сопротивления копанию рабочим оборудованием бульдозера // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Машиностроение и машиноведение. 2011. № 3. С. 45–52.

10. Сурашов Н.Т., Асматулаев Р.Б., Толымбек Д.Н. Определение оптимальных конструктивных параметров отвала бульдозера // Вестник СибАДИ. 2022;19(4): 500–513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513/>

11. Мячникова Н.Н. Бульдозерный отвал типа «Сигма» // Молодой ученый. 2017. № 3(137). С. 129–132. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/137/38571/> (дата обращения: 18.02.2024).

12. Беляев В.В. Математическая модель поверхности грунта, обрабатываемой автогрейдером // Строительные и дорожные машины. 2006. № 8. С. 33–39.

13. Шукуров Н.Р., Мухамадиев Г.М., Абиджанов З.Х. Основные направления интенсификации рабочих процессов землеройно-транспортных машин // Молодой ученый. 2020. № 12(302). С. 61–65. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (дата обращения: 17.04.2024).

14. Сладкова Л.А., Григорьев П.А. Модель формирования призмы волочения при разработке грунта рабочими органами отвального типа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 576–581. DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-576-577.

15. Шукуров Н.Р., Мухамадиев Г.М., Абиджанов З.Х. Основные направления интенсификации рабочих процессов землеройно-транспортных машин // Молодой ученый. 2020. № 12(302). С. 61–65. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (дата обращения: 17.04.2024).

## REFERENCES

1. Belousov S.V., Saprykin E.A., Karmazin I.S. Explanation of the angle of sharpening of a plough cutting working body. *E3S Web of Conferences*. Sevastopol: EDP Sciences. 2019: 00025. DOI 10.1051/e3sconf/201912600025.
2. Zenkov S.A. Application of thermal effect as a means to combat ground-and-machine part adhesion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. 2020: 32060. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032060.
3. Ren L., Cong Q., Tong G., Chen B. Reducing adhesion of soil against load-ing shovel using bionic electro-osmosis method. *Journal of Terramechanics*. 2001; 38: 211–219.
4. Yang X., Xia R., Zhou H., Guo L., Zhang L. Bionic surface design of cemented car-bide drill bit. *Science China Technological Sciences*. 2016; 59: 175–182.

5. Tagar A.A., Ji C., Ding Q. fan etc. Soil failure patterns and draft as influ-enced by consistency limits: An evaluation of the remolded soil cutting. 2014; 137: 58–66.

6. Nichke V.V., Tuluzov A.G. Formation of the prism of volocheniya and the definition of rational relations of height and width of the dump. HNAD, Kharkov, Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-prizmy-volocheniya-i-opredelenie-ratsionalnyh-otnosheniy-vysoty-i-shiriny-otvala> (accessed: 07.04.2024) (In Russ.)

7. Berestov E.I., Leskovets I.V. Methods of calculation of geometric parameters of the prism of dragging on the bulldozer's dump. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009; 2(23): 6–12 Available at: <https://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/1449/57253243> (accessed: 07.04.2024) (In Russ.)

8. Shemyakin S.A., Gamolya Yu.A., Shishkin E.A. Resistance to digging of non-cohesive soils with a bulldozer dump. *Electronic scientific journal «Scientists notes PNU»*. 2016; Vol. 7, No. 1: 217–219. (In Russ.)

9. Berestov E.I., Leskovets I.V. Influence of soil properties on the efforts of resistance to digging by bulldozer working equipment. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye*. 2011; 3: 45–52. (In Russ.)

10. Surashov N.T., Asmatulaev R.B., Tolymbek D.N. Blade optimal design parameters determination. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(4): 500–513. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

11. Myachnikova N. N. Bulldozer dump of the Sigma type. *Molodoj uchenyj*. 2017; 3(137): 129–132. Available at: <https://moluch.ru/archive/137/38571/> (accessed: 18.02.2024). (In Russ.)

12. Belyaev V.V. Mathematical model of the surface of the soil, processed by the motor grader. *Construction and building machinery*. 2006: 8: 33–39. (In Russ.)

13. Shukurov N.R., Mukhamadiev G.M., Abidjanov Z.Kh. Main directions of intensification of working processes of earth-transport machines. *Molodoj uchenyj*. 2020; 12(302): 61–65. Available at: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (accessed: 17.04.2024). (In Russ.)

14. Sladkova L.A., Grigorev P.A. Formation model of the drawin g prismatic solid during the development of soil by workin g bodies of the blade type. «*Izvestiya Tula State University*» (*Izvestiya TulGU*). 2024; 1: 576–581. DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-576-577. (In Russ.)

15. Shukurov N.R., Mukhamadiev G.M., Abidjanov Z.Kh. Main directions of intensification of working processes of earth-transport machines. *Molodoj uchenyj* 2020; 12(302): 61–65. Available at: <https://moluch.ru/archive/302/68279/> (accessed: 17.04.2024). (In Russ.)

## ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Григорьев П.А. Организация и проведение экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Сладкова Л.А. Формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, написание текста статьи.

## CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Grigorev P.A. Experimental research managing, experimental data processing, material for the article preparation.

Sladkova L.A. Research purposes and objectives statement, research methodology development, the text of the article writing.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Павел Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры наземных транспортно-технологических средств Российского университета транспорта (МИИТ) (127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5409-6250>, **SPIN-код:** 1305-7521, e-mail: [grigorievpavel1996@yandex.ru](mailto:grigorievpavel1996@yandex.ru)

Сладкова Любовь Александровна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры наземных транспортно-технологических средств Российского университета транспорта (МИИТ) (127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>, **SPIN-код:** 9088-6547, e-mail: [rich.cat2012@yandex.ru](mailto:rich.cat2012@yandex.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Grigorev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Ground Transport and Technological Means Department, Russian University of Transport (MIIT) (9 Obratsova str., p. 9, Moscow, 127994), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5409-6250>, **SPIN-код:** 1305-7521, e-mail: [grigorievpavel1996@yandex.ru](mailto:grigorievpavel1996@yandex.ru)

Lyubov A. Sladkova – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Ground Transport and Technological Means Department, Russian University of Transport (MIIT) (9 Obratsova str., p. 9, Moscow, 127994), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>, **SPIN-код:** 9088-6547, e-mail: [rich.cat2012@yandex.ru](mailto:rich.cat2012@yandex.ru)