

УДК 631.363

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Коновалов Владимир Иванович  
доцент кафедры «Процессы и машины в агробизнесе», SPIN-код 4413-4190, ABH-7546-2020, Scopus Author ID: 57190000996, ORCID 0000-0003-2740-2010  
e-mail: konovalov.v.i@mail.ru  
*ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия*

Коновалов Сергей Иванович  
инженер, SPIN-код: 5475-7500, AuthorID: 894066  
*ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия*

Кравченко Виктор Валерьевич  
инженер, SPIN-код: 4438-6886  
AuthorID: 709424 *ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия*

Клиничкин Данила Григорьевич  
аспирант факультета механизации  
*ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия*

Страхов Александр Алексеевич  
студент факультета механизации  
*ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия*

В статье представлено теоретическое исследование тягового сопротивления отвального корпуса плуга. В ходе исследований использованы как уже известные зависимости, так и получены новые, на основании которых получено выражение, описывающее зависимость тягового сопротивления отвального корпуса от его конструктивно-технологических параметров и угла трения почвы. Полученные результаты согласуются с результатами известных ученых

Ключевые слова: ОТВАЛЬНЫЙ КОРПУС, ТЯГОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ, НОРМАЛЬНАЯ СИЛА, СИЛА ТРЕНИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-009>

**Актуальность исследования**

С каждым днем, прожитым нашей Родины в условиях международных санкций позволяет все наиболее отчетливо понимать, что независимое

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/09.pdf>

UDC 631.363

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**THEORETICAL STUDY OF TRACTION RESISTANCE OF A WORKING ORGAN FOR TILLAGE**

Konovalev Vladimir Ivanovich  
Associate Professor, Department of Processes and Machines in Agribusiness, RSCI SPIN-code 4413-4190, ABH-7546-2020, Scopus Author ID: 57190000996, ORCID 0000-0003-2740-2010  
e-mail: konovalov.vi@mail.ru  
*FSBEI HE Kuban SAU, Krasnodar, Russia*

Konovalev Sergey Ivanovich  
engineer, RSCI SPIN-code 5475-7500  
*FSBEI HE Kuban SAU, Krasnodar, Russia*

Kravchenko Victor Valerievich  
engineer, RSCI SPIN code: 4438-6886, AuthorID: 709424  
*FSBEI HE Kuban SAU, Krasnodar, Russia*

Klinichkin Danila Grigorievich  
postgraduate student of the Faculty of Mechanization  
*FSBEI HE Kuban SAU, Krasnodar, Russia*

Strakhov Alexander Alekseevich  
student of the Faculty of Mechanization  
*FSBEI HE Kuban SAU, Krasnodar, Russia*

The article presents a theoretical study of the traction resistance of the dump body of the plow. In the course of the research, both the already known dependencies were used, and new ones were obtained, on the basis of which an expression was obtained describing the dependence of the traction resistance of the main body on its structural and technological parameters and the angle of friction of the soil. The results obtained are consistent with the results of well-known scientists

Keywords: DUMP BODY, TRACTION RESISTANCE, COEFFICIENT OF FRICTION, NORMAL FORCE, FRICTION FORCE

и самодостаточное государство является залог свободы и успеха. Жизненно важным условием существования любого государства является продовольственная безопасность, которая строится на целом ряде отдельных профильных отраслей, и прежде всего на отрасли агропромышленного комплекса.

Эффективная работа АПК, и в частности отрасли растениеводства, во многом зависит от применяемых технологий возделывания, которые должны быть зонированы под существующие агроклиматические условия. При этом любая технология включает в себя научно и практико-обоснованные технологии обработки почвы, посева, внесения удобрений, ухода за растениями, уборки и послеуборочной обработки готовой продукции. Особо важным элементом любой технологии возделывания любой сельскохозяйственной культуры является использование научно обоснованных технологий обработки почвы, поскольку именно на нее отводится большая доля в затратах труда и топлива [8, 10, 20].

В последнее время в научных изданиях все больше уделяется внимание минимизации обработки почвы, конечно, что вызвано значительными затратами труда и топлива для реализации традиционной технологии, при этом утверждается об ее эффективности и прогрессивности. С другой стороны, как отмечают ведущие ученые агрономы, для каждого агроклиматических условий и конкретной культуры существует своя оптимальная технология обработки почвы [3, 4, 14, 15]. Поэтому технологию обработки почвы под сельскохозяйственную культуру, включающую в себя отвальную вспашку, можно встретить в большинстве регионов наше государства.

Не мало важным фактом такого широкого распространения технологии обработки почвы под сельскохозяйственную культуру, включающую себя отвальную вспашку, является тот факт, что при ее применении происходит разуплотнение основного пахотного горизонта, осуществляет аэрация почвы, проводится борьба с сорной растительностью, заделывают в

почву пожнивные остатки, которые постепенно переходят в органические удобрения, а самое главное, это заделка в почву вредителей, бактерий и грибков, которые погибают, тем самым снижая вредоносную нагрузку на почв и растение.

Эффективность проведения отвальной вспашки, как и любой другой операции по обработке почвы, зависит от различных конструктивных и технологических факторов технического средства для ее осуществления, а также агроклиматических условий ее выполнения [2, 5, 11, 18]. Указанное влияние определяется множеством агротехнических и эксплуатационных параметров, к которым относятся равномерность глубины обработки, крошение почвы, курсовая устойчивость и прочие показатели [6, 17, 19]. Во время вспашки основной задачей является оборот и крошение пласта. Выполнение такого воздействия возможно только при относительно длительном контакте почвы с рабочей поверхностью корпуса плуга, что и формирует высокую энергоемкость процесса [16].

Отвальную вспашку выполняют в подавляющем числе случаев после зернобобовых, озимых и яровых колосовых зерновых культур, пропашных культур, а также разнообразных трав различного посева.

В процессе вспашки почвы с отвалом пласта по ходу движения ее отвал должен быть как можно более полным, при этом угол считается достаточным более 135 градусов. Во время вспашки отвальным корпусом степень крошения почвы должна составлять не менее 75 процентов с преобладаем размеров 1-50 мм, с полным, т.е. 100 процентным, подрезанием всех растений, и прежде всего сорняков. Подрезанные растения, и прежде всего сорняки и пожнивные остатки, должны заделываться на глубину более 12-15 см от поверхности поля, а процент заделки должен составлять не менее 97 процентов. Изменчивость глубины отвальной вспашки различно для разных условий, но как правило не должно отличаться от заданной более чем на 2 сантиметра. При этом поверхность поля после прохода по ней

отвального луга должна быть слитной, а имеющиеся на ее поверхности гребневые участки не должны быть больше 4-5 сантиметров. Заданную глубину вспашки устанавливает самый ученый агроном предприятия где она проводится и ее величина различна для разных предшествующих и последующих культур, но как правило лежит в пределах 22-35 сантиметров. Как правило, вспашку проводят на скорости от 6 до 12 км/ч, но современные плуги сконструированы для скорости значительно превышающие этот показатель, и достигают 15-16 км/ч. После проведения послеуборочного лущения вспашку с оборот почвы проводят приблизительно в течении 10-15 дней [1, 9].

Именно высокая энергоемкость вспашки и низкая производительность технических средств для ее реализации является основным сдерживающим фактором ее применения.

Качественное выполнение вспашки почвы с отвалом пласта является весьма важным фактором формирования почвенной структуры, а точнее взаимного строения-расположения почвенных фаз, а именно твердой, жидкой, газообразной и живой, между собой в почвенном горизонте, а также значительно влияет на борьбу с вредителями, сорняками и бактериями, оказывающими негативное влияние на почву. Именно поэтому выполнение вспашки на высоком агротехническом уровне является столь значимым событием и элементом технологии обработки почвы.

### **Постановка задачи**

В процессе работы отвального корпуса лемешного плуга на его рабочую поверхность действуют ряд усилий. В настоящее время существует множество точек зрения о природе, точках приложения, направлений и величин указанных сил, но однозначно все ученые утверждают, что в виду сложности формы и ее расположения в пространстве их невозможно привести к общей равнодействующей [1, 9]. Наиболее часто для описания силового взаимодействия рабочей поверхности отвального корпуса лемеш-

ного плуга с почвой используют полуэмпирические зависимости, однако их использование осложнено ввиду необходимости предварительных испытаний в заданных агроклиматических условиях, поэтому предварительное теоретическое исследование тягового сопротивления отвального корпуса лемешного плуга является актуальной научной и практической задачей.

### **Исследовательская часть**

Подавляющее большинство ведущих ученых признают, что в основу любого почвообрабатывающего рабочего органа положен обычный или трехгранный клин, форма которых, также, как и характер их взаимодействия с почвой, описывается тремя основными углами, а именно углом крошения  $\alpha$ , углом наклона  $\beta$  пласта и углом сдвига  $\gamma$  пласта от стенки борозды. Кроме указанных углов часто используется угол наклона рабочей грани клина  $\varepsilon$  к дну борозды. При этом, взаимосвязь между этими углами описывается выражениями [1]:

$$\tan \alpha = \tan \beta \tan \gamma = \tan \varepsilon \sin \gamma, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол крошения, град;

$\beta$  – угол наклона, град;

$\gamma$  – угол сдвига, град;

$\varepsilon$  – угол наклона рабочей грани клина к дну борозды, град.

Процесс формирования любой рабочей поверхности почвообрабатывающего органа протекает изменением указанных углов в пространстве, что формирует прямые или криволинейные поверхности, например, лемешно-отвальные поверхности плужных корпусов, рабочие поверхности культиваторных лап, дисков и др. [7, 9, 12, 13].

Если принять, что отвальный корпус перемещается прямолинейно и равномерно со скоростью  $v_k$ , а пласт почвы, бывший до их взаимодействия стационарным, перемещается по нему также равномерно по криволиней-

ной траектории со скоростью  $v_o$ , то тяговое сопротивление рабочей поверхности отвального корпуса лемешного плуга (рис. 1) можно разделить на отдельные составляющие, к которым относятся:

– сила сопротивления почвы  $R_p$  внедрению лезвия лемеха, приложенная, согласно трудам академика Горячкина В. П., посередине лезвия и отклоненная от нормали на угол трения почвы  $\varphi_{mp}$  [9];

– нормальная реакция  $N$  на рабочую поверхность, возникающая в следствии давления пласта на рабочую поверхность, приложенная в точке  $A$  проекции центра его тяжести на рабочую поверхность и направленная по нормали к рабочей поверхности;

– сила трения пласта  $T$  о рабочую поверхность, возникающая в следствии движения пласта вдоль рабочей поверхности корпуса, направленная в сторону движению пласта и приложенная в точке  $A$ ;

– сила статистического давления или веса  $G_n$  пласта на рабочую поверхность, возникающая в следствии веса самого пласта, направленная вертикально вниз и приложенная в точке  $A$ ;

– сила инерции  $P_u$  пласта, возникающая в виду его перемещения по рабочей поверхности, имеющая точку приложения своего действия в точке  $A$  и указывающая в сторону, в которую направлено ускорение, действующая на пласт почвы.

Выбрав систему координат и точку ее отчета, а также выполнив схематическое отображение отвального корпуса плуга в ней, с приложением всех указанных сил, а именно силы сопротивления почвы  $R_p$  внедрению лезвия лемеха, нормальную реакцию  $N$  на рабочую поверхность, силу трения пласта  $T$  о рабочую поверхность, силу статистического давления или веса  $G_n$  пласта на рабочую поверхность и сила инерции  $P_u$  пласта, и конструктивных величин, характеризующих его рабочую поверхность, получим рисунок 1. На основании данных, полученных профессором Гячевым Л. В., используя сферический треугольник  $LKM$ , можно найти величину

угла  $\theta$  между касательной к траектории движения пласта и вертикалью, выражение для чего будет иметь вид [1]:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma \cos \varepsilon), \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол между перпендикуляром к лемеху (или дном борозды) и касательной к относительной траектории пласта вдоль рабочей поверхности отвального корпуса, град.

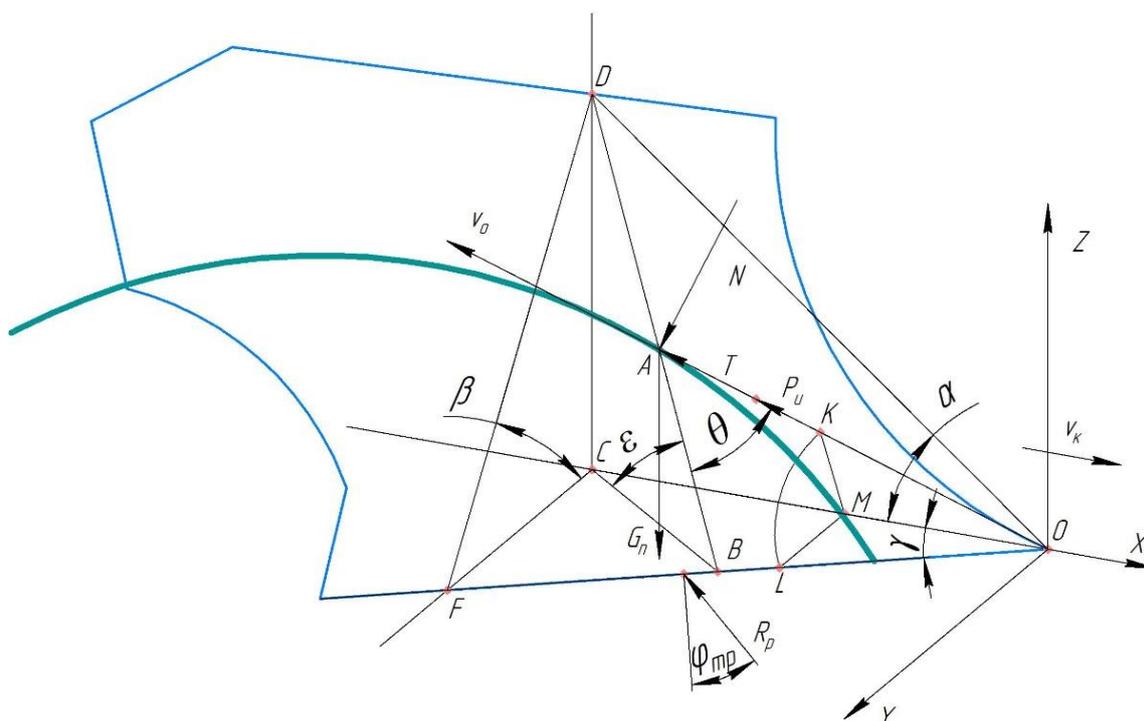


Рисунок 1 – Схематическое представление действующих на рабочую (контактирующую с почвой) поверхность отвального корпуса лемешного плуга сил

Исходя из полученного рисунка 1 можно сделать вывод, что тяговое сопротивление отвального корпуса плуга будет состоять из горизонтальных состоящих сил сопротивления почвы  $R_p$  внедрению лезвия лемеха, нормальной реакции  $N$  на рабочую поверхность, сил трения пласта  $T$  о рабочую поверхность, сил статистического давления или веса  $G_n$  пласта на

рабочую поверхность и сил инерции  $P_u$  пласта. Указанные горизонтальные суслящие будут располагаться в плоскости параллельной дну борозды, а их направление будет параллельно оси  $OX$ , или направления движения рассматриваемого отвального корпуса,  $X$ , что запишется в виде:

$$\bar{R}_x^k = \bar{R}_x^p + \bar{N}_x + \bar{T}_x + \bar{G}_x^n + \bar{P}_x^u, \quad (3)$$

где  $R_x^k$  – действующая корпус отвального плуга сила сопротивления прямолинейному поступательному перемещению или его тяговое сопротивление;

$R_x^p$  – составляющая силы сопротивления почвы  $R_p$  внедрению лезвия лемеха, расположенная в плоскости параллельной дну борозды и направленная параллельно оси  $OX$ ;

$N_x$  – составляющая нормальной реакции  $N$  на рабочую поверхность отвального корпуса плуга, расположенная в плоскости параллельной дну борозды и направленная параллельно оси  $OX$ ;

$T_x$  – составляющая сил трения пласта  $T$  о рабочую поверхность отвального корпуса плуга, расположенная в плоскости параллельной дну борозды и направленная параллельно оси  $OX$ ;

$G_x^n$  – составляющая сил статистического давления или веса  $G_n$  пласта на рабочую поверхность отвального корпуса плуга, расположенная в плоскости параллельной дну борозды и направленная параллельно оси  $OX$ ;

$P_x^u$  – составляющая сил инерции  $P_u$  пласта, действующая на рабочую поверхность отвального корпуса плуга, расположенная в плоскости параллельной дну борозды и направленная параллельно оси  $OX$ .

Поскольку проекция силы от веса пласта  $G_x^n$  на рабочую поверхность на ось  $OX$  равняется нулю, то ее величину определять не целесообразно. Однако совсем ее не учитывать также не допустимо, что приводит к выводу о том, что ее необходимо учесть, как составляющую в нормальной

силе  $N$ , поскольку она также будет является одной из сил, создающих давление на рабочую поверхность отвального корпуса.

Согласно исследованиям, проф. Синеокова Г. Н., новый лемех с острой режущей кромкой будет иметь очень незначительную величину силы сопротивления внедрению в почву, и ее можно отдельно не учитывать, однако для лемехов, находящихся в эксплуатации значительное время и имеющих видимый износ, величина указанной силы имеет большее значение, которое можно определить по выражению [9]:

$$R_x^p = 0,35G_k \frac{\sin \varepsilon_3 \sin \gamma_B + \tan \varphi_{mp} (\cos^2 \gamma_B + \cos \varepsilon_3 \sin^2 \gamma_B)}{\cos \varepsilon_3 - \tan \varphi_{mp} \sin \gamma_B \sin \varepsilon_3}, \quad (4)$$

где  $G_k$  – вес корпуса плуга, Н;

$\varepsilon_3$  – задний угол резания лезвия лемеха (переменная величина, возрастающая по мере износа режущей кромки), град;

$\varphi_{mp}$  – угол трения почвы по материалу корпуса, град;

$\gamma_B$  – угол между образующей и стенкой борозды в точке  $B$  центра тяжести пласта.

Из выражения 4 видно, что по мере износа режущей кромки тяговое сопротивление начинает расти и может достигать 20-30% от веса самого корпуса.

В процессе рабочего хода на рабочую поверхность корпуса пласт почвы оказывает давление, в результате чего со стороны последнего образуется нормальная реакция, направление которой совпадает с перпендикуляром или нормалью к опорной поверхности и приложенной в точке их контакта (рис. 1), тогда с учетом расположения нормальной реакции в пространстве и углов, характеризующих это расположение (рис. 2), величина проекций на соответствующие оси будут определяться выражениями:

$$N_x = N \sin \varepsilon_A \sin \gamma_A, \quad (5)$$

$$N_y = N \sin \varepsilon_A \cos \gamma_A, \quad (6)$$

$$N_z = N \cos \varepsilon_A, \quad (7)$$

где  $N_x, N_y, N_z$  – составляющие или проекции нормальной реакции на оси в выбранной системе координат, Н;

$\varepsilon_A$  – угол наклона рабочей грани клина к дну борозды в точке  $A$ , град;

$\gamma_A$  – угол между образующей и стенкой борозды в точке  $A$  центра тяжести пласта.

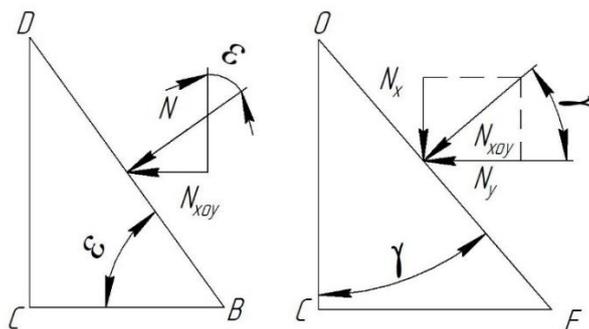


Рисунок 2 – К определению проекций нормальной силы

Действуя аналогично, проекции сил трения на соответствующие оси, с учетом нормальной реакции и выражения 1, составят:

$$T_x = \tan \varphi_{mp} N \sin\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A)\right) \cos \gamma_A, \quad (8)$$

$$T_y = \tan \varphi_{mp} N \sin\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A)\right) \sin \gamma_A, \quad (9)$$

$$T_z = \tan \varphi_{mp} N \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A)\right) \sin \varepsilon_A. \quad (10)$$

где  $T_x, T_y, T_z$  – проекции силы трения на соответствующие оси, Н;

Из рисунка 1 видно, что сила инерции пласта, как и сила трения, направлена в сторону противоположную сторону направления ускорения пласта, а, следовательно, ее проекции будут иметь вид:

$$P_x^u = P_u \sin\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A)\right) \cos \gamma_A, \quad (11)$$

$$P_y^u = P_u \sin\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A)\right) \sin \gamma_A, \quad (12)$$

$$P_z^u = P_u \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A)\right) \sin \varepsilon_A. \quad (13)$$

где  $P_x^u$ ,  $P_y^u$ ,  $P_z^u$  – составляющие или проекции сил инерции пласта на соответствующие оси в выбранной системе координат, Н.

В соответствии с ранее полученными результатами проф. Синеокова Г. Н., величина силы инерции пласта может получена по выражению [9]:

$$P_u = 2ab\rho_n v_k^2 \sin \frac{\varepsilon_A}{2} \sin \gamma_A, \quad (14)$$

где  $P_u$  – сила инерции пласта, Н;

$a$  – глубина хода корпуса, м;

$b$  – ширина захвата корпуса, м;

$\rho_n$  – плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$v_k$  – скорость движения корпуса, м/с.

Для определения величины действующих на рабочую поверхность отвального корпуса плуга сил трения и реакции нормальной силы, необходимо проанализировать силы, действующие на, перемещающейся по ней, пласт почвы (рис. 3). Для этого будем рассматривать перемещающийся пласт почвы по рабочей поверхности отвального корпуса плуга в условии его равновесия. Тогда, рассматриваемый пласт почвы, в процессе его перемещения по рабочей поверхности отвального корпуса плуга, будет находиться под действием нормальных сил  $N^k$  и сил трения  $T^k$  со стороны указанной поверхности, а точка их сосредоточения будут совпадать с центром тяжести пласта. Кроме того, на пласт будет действовать сила, обусловленная весом самого пласта и направленная вертикально вниз. Ввиду перемещения пласта, дополнительно возникают сила реакции впереди расположенной не обработанной почвы  $Q_n$ , условно приложенной также в центре

тяжести пласта, параллельной поступательному движению, т.е. оси  $OX$ , и направленной в противоположную сторону.

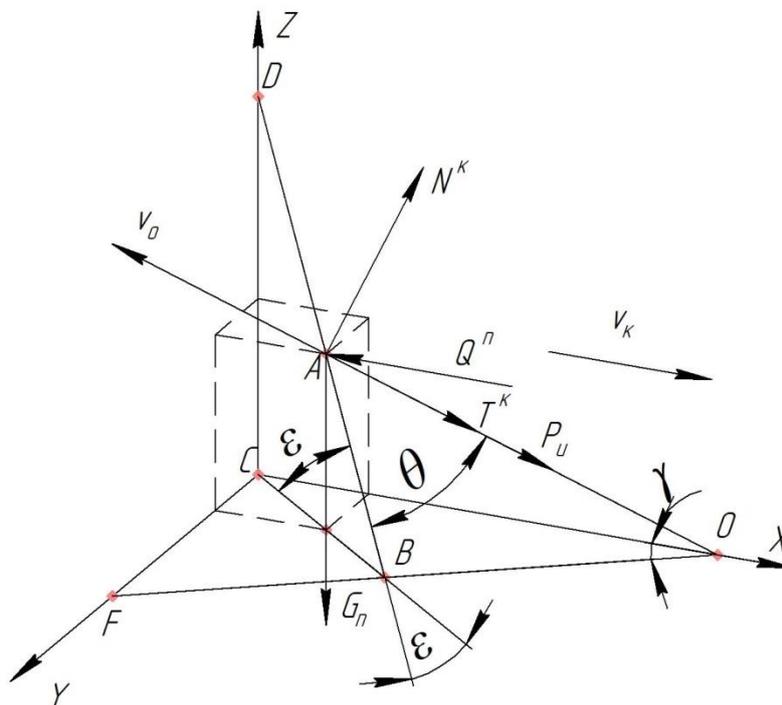


Рисунок 3 – К определению действующих на пласт почвы сил

Поскольку почва является упруговязкопластичным веществом, то собственное сопротивление обработке выражается динамическим сопротивлением пласта или инерцией  $P_u$ , при этом ее направление будем принимать противоположным направлению ускорению пласта почвы. Выполнив проецирование указанные силы на ось координат  $OZ$ , получим:

$$\sum Z = N^k \cos \varepsilon_A - G_n - T^k \cos \theta_A \sin \varepsilon_A - P^u \cos \theta_A \sin \varepsilon_A = 0, \quad (15)$$

где  $G_n$  – вес пласта, Н.

Проведя преобразования, с учетом того, что  $T^k = \tan \varphi_{mp} N^k$ , из выражения 15 будет:

$$N^k = \frac{G_n + P^u \cos \theta_A \sin \varepsilon_A}{\cos \varepsilon_A - \tan \varphi_{mp} \cos \theta_A \sin \varepsilon_A}, \quad (16)$$

Полученное выражение 16, в виду того, что  $N^k = N$  показывает зависимость нормальной силы, действующей на рабочую поверхность отвала с учетом действия статической и динамической составляющих пласта.

На силу веса пласта, действующая вертикально вниз, оказывает влияние плотность и объем почвы, находящейся в заданный момент времени на рабочей поверхности отвального корпуса плуга, тогда величину действующей силы можно определить по выражению:

$$G_n = abl_n\rho_n g, \quad (17)$$

где  $l_n$  – длина траектории средней точки (центра тяжести) пласта перемещения почвы по рабочей поверхности отвального корпуса плуга, которая может быть определена по результатам, полученным Гячевым Л. В., м [1];

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Тогда, с учетом выражений 2, 14 и 17, нормальная сила будет:

$$N = ab\rho_n \frac{l_n g + 2v_\kappa^2 \sin \frac{\varepsilon_A}{2} \sin \gamma_A \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right] \sin \varepsilon_A}{\cos \varepsilon_A - \tan \varphi_{mp} \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right] \sin \varepsilon_A}, \quad (18)$$

Учитывая соотношения между нормальной силой и силой трения, получим:

$$T = ab\rho_n \tan \varphi_{mp} \frac{l_n g + 2v_\kappa^2 \sin \frac{\varepsilon_A}{2} \sin \gamma_A \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right] \sin \varepsilon_A}{\cos \varepsilon_A - \tan \varphi_{mp} \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right] \sin \varepsilon_A}, \quad (19)$$

Выражения 18 и 19 характеризуют силы нормальной реакции и трения, действующих на пласт, а, следовательно, в виду их равенности, на отвальный корпус лемешного плуга, однако только их горизонтальная составляющая является структурным элементов тягового сопротивления =.

Тогда, подставляя полученные выражения 4, 18 и 19 в выражение 3, с учетом выражений 5 и 8 и направлений проекций, для точки  $A$  центра тяжести пласта, получим:

$$R_x^k = 0,35G_\kappa \frac{\sin \varepsilon_3 \sin \gamma_B + \tan \varphi_{mp} (\cos^2 \gamma_B + \cos \varepsilon_3 \sin^2 \gamma_B)}{\cos \varepsilon_3 - \tan \varphi_{mp} \sin \gamma_B \sin \varepsilon_3} +, \\ ab\rho_n \frac{l_n g + 2v_\kappa^2 \sin \frac{\varepsilon_A}{2} \sin \gamma_A \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right] \sin \varepsilon_A}{\cos \varepsilon_A - \tan \varphi_{mp} \cos \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right] \sin \varepsilon_A} \times \quad (20) \\ \times (\sin \varepsilon_A \sin \gamma_A + \sin \left( \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \gamma_A \cos \varepsilon_A) \right) \cos \gamma_A \tan \varphi_{mp}).$$

### Апробация полученных результатов

Выражение 20 характеризует тяговое сопротивление отвального корпуса лемешного плуга в зависимости от его конструктивно-технологических параметров и физико-механических свойств почвы. Графические представления полученной зависимости представлены на рисунках 4 и 5.

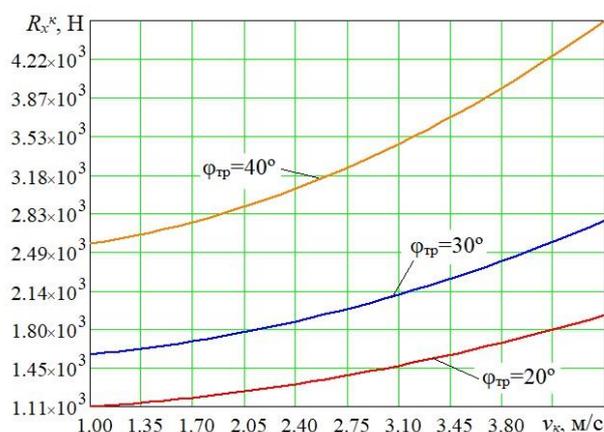


Рисунок 4 – Графики зависимости тягового сопротивления отвального корпуса плуга от его скорости движения во время рабочего хода и угла трения почвы по материалу его рабочей поверхности

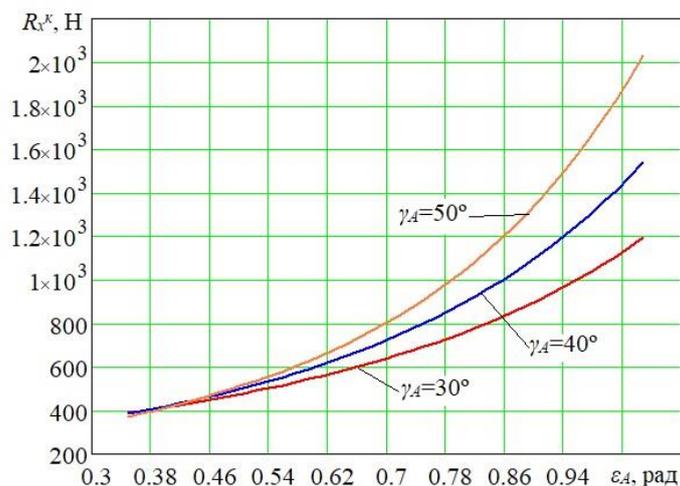


Рисунок 5 – График зависимости тягового сопротивление отвалного корпуса плуга от угла наклона образующей рабочей грани клина к дну борозды и угла между образующей и стенкой борозды в точке центра тяжести пласта

Анализ представленных на рисунках 4 и 5 графиков позволяет сделать вывод, что тяговое сопротивление отвалного корпуса возрастает при увеличении скорости по параболической зависимости. Увеличение угла трения почвы по рабочей поверхности приводит к пропорциональному росту тягового сопротивления, при этом поведение функции в заданном интервале не меняется. При возрастании угла наклона образующей рабочей грани клина к дну борозды от 20 до 60 градусов тяговое сопротивление также возрастает по криволинейной зависимости, при этом резкий рост происходит при превышении угла 45 градусов, увеличение же угла между образующей и стенкой борозды в точке центра тяжести пласта приводит к более интенсивному возрастанию тягового сопротивления.

### Выводы

Полученные зависимости и графические представления согласуются с уже известными результатами исследований других ученых, а также подтверждают целесообразность использования различных способов для снижения угла трения почвы по рабочей поверхности отвалного корпуса.

Кроме того, полученные результаты демонстрируют необходимость уменьшения угла между образующей и стенкой борозды при повышении угла наклона образующей рабочей грани клина к дну борозды. Однако следует отметить, что полученные результаты не учитывают изменение длины траектории перемещения почвы по рабочей поверхности при уменьшении угла между образующей и стенкой борозды, которое приведет к росту работы сил трения.

### Список литературы

1. Гячев Л.В. Теория лемешно-отвальной поверхности. Зерноград, АЧИМСХ, 1961.-318 с.
2. Заглубляющая способность дисковых борон и луцильников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, В. В. Кравченко // Сельский механизатор. – 2013. – № 11. – С. 14-15. – EDN PZFMVM.
3. Камбулов С. И. Энергосберегающие технологии возделывания зерновых колосовых культур [Текст] / С. И. Камбулов, В. П. Максимов, Ю. А. Царев, Е. М. Зубрилина // Научная жизнь. – 2019. – № 2. – С. 19-26.
4. Несмиян А. Ю. Технические характеристики и агротехнические показатели работы почвообрабатывающих агрегатов [Текст] / А. Ю. Несмиян // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – №6. – С. 58-64.
5. Коновалов, В. И. Кинематический анализ дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны / В. И. Коновалов, С. И. Коновалов, А. Г. Коновалов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 185. – С. 22-34. – DOI 10.21515/1990-4665-185-003. – EDN OULIWX.
6. Коновалов, В. И. Влияние конструктивно-технологических параметров дисковых рабочих органов на высоту гребня дна борозды / В. И. Коновалов, С. И. Коновалов, В. В. Жадько // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 184. – С. 63-76. – DOI 10.21515/1990-4665-184-008. – EDN ZPNQIC.
7. Обоснование конструктивных параметров измельчающего узла / В. И. Коновалов, С. И. Коновалов, В. В. Кравченко, Е. Р. Минаков // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 2(30). – С. 22-28. – DOI 10.31279/2222-9345-2018-7-30-22-28. – EDN ХТТQН.
8. Соколова А. П. Влияние обеспеченности техникой на экономические показатели растениеводства [Текст] / А. П. Соколова, Ю. К. Кастиди, Г. Ф. Бершицкая Г.Ф., М. Е. Трубилин // Сельский механизатор – М.: Из-во. «Нива». – 2015. № 2. С. 22-23.
9. Синеоков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин [Текст] / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
10. Трубилин А. И. Теоретические аспекты повышения эффективности использования сельскохозяйственной техники в растениеводстве [Текст] / А. И. Трубилин, Ю. И. Бершицкий, Ю. К. Кастиди // Труды Кубанского государственного аграрного университета – Краснодар.: Из-во. «КубГАУ». – 2009. № 17. С. 7–11.

11. Трубилин, Е. И. Равновесие дисковых борон и луцильников в горизонтальной плоскости / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 40. – С. 166-169. – EDN PWZCCD.

12. Konovalov, V. I. Justification of design parameters of a disk working body with a changing radius of curvature / V. I. Konovalov // E3S Web of Conferences, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 01014. – DOI 10.1051/e3sconf/202019301014. – EDN CTQPQJ.

13. Konovalov, V. Analytical study of the design parameters of the grinding unit of disk harrows / V. Konovalov, S. Konovalov, V. Igumnova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 сентября 2019 года. Vol. 403. – Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012086. – DOI 10.1088/1755-1315/403/1/012086. – EDN PTSUKR.

14. Konovalov, V. I. Similarity and Differences of Husking and Disking of the Soil. Prospects of Improving Disk Tools / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, A. Strakhov // E3S Web of Conferences : International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2024), Kuban State Agrarian University named after. I.T. Trubilina, 23–24 января 2024 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2024. – P. 01007. – DOI 10.1051/e3sconf/202449301007. – EDN KUUXTS.

15. Konovalov, V. I. Comparative Agrotechnological Assessment of Disk Tillage Tools / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, A. Strakhov // E3S Web of Conferences : International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2024), Kuban State Agrarian University named after. I.T. Trubilina, 23–24 января 2024 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2024. – P. 01008. – DOI 10.1051/e3sconf/202449301008. – EDN THEHHC.

16. Konovalov, V. I. Analysis of research on soil destruction criteria during its interaction with working bodies / V. I. Konovalov // E3s web of conferences : International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2021), Krasnodar, Russia, 24–26 мая 2021 года. Vol. 285. – Krasnodar, Russia: EDP Sciences, 2021. – P. 07003. – DOI 10.1051/e3sconf/202128507003. – EDN UVDAVW.

17. Konovalov, V. I. Influence of Design and Technological Parameters of Disk Working Bodies on the Height of the Crest of the Bottom of the Furrow / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 346. – P. 03006. – DOI 10.1051/matecconf/202134603006. – EDN GBFJEM.

18. Konovalov, V. I. Kinematic Analysis of a Disk Working Body with a Changing Radius of Curvature / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, V. I. Baradakov // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 346. – P. 03007. – DOI 10.1051/matecconf/202134603007. – EDN BBVXPS.

19. Sokht, K. A. Uniformity of the soil tillage depth with tools with disk working bodies / K. A. Sokht, V. I. Konovalov // E3S Web of Conferences, Krasnodar, 30–31 мая 2023 года / Kuban State Agrarian University. Vol. 398. – Krasnodar: EDP Sciences, 2023. – P. 01012. – DOI 10.1051/e3sconf/202339801012. – EDN NTEYQB.

20. Rykov V. B. System of energy criteria in the justification of technical units for field production / V. B. Rykov, S. I. Kambulov, E. I. Trubilin, YU. K. Kastidi // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 193. – P. 01008.

### References

1. Gjachev L.V. Teorija lemeshno-otval'noj poverhnosti. Zernograd, AChIMSH, 1961.- 318 s.
2. Zaglublajushhaja sposobnost' diskovyh boron i lushhil'nikov / E. I. Trubilin, K. A. Soht, V. I. Konovalov, V. V. Kravchenko // Sel'skij mehanizator. – 2013. – № 11. – S. 14-15. – EDN PZFMVM.
3. Kambulov S. I. Jenergosberegajushhie tehnologii vozdeyvanija zernovyh kolosovyh kul'tur [Tekst] / S. I. Kambulov, V. P. Maksimov, Ju. A. Carev, E. M. Zubrilina // Nauchnaja zhizn'. – 2019. – № 2. – S. 19-26.
4. Nesmijan A. Ju. Tehnicheskie karakteristiki i agrotehnicheskie pokazateli raboty pochvoobrabatyvajushhih agregatov [Tekst] / A. Ju. Nesmijan // Traktory i sel'hozmashiny. – 2017. – №6. – S. 58-64.
5. Konovalov, V. I. Kinematičeskij analiz diskovogo rabočego organa s izmenjajushimsja radiusom krivizny / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, A. G. Konova-lov // Politematičeskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudar-stvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – № 185. – S. 22-34. – DOI 10.21515/1990-4665-185-003. – EDN OULIWX.
6. Konovalov, V. I. Vlijanie konstruktivno-tehnologičeskikh parametrov diskovyh rabočih organov na vysotu grebnja dna borozdy / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, V. V. Zhad'ko // Politematičeskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudar-stvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – № 184. – S. 63-76. – DOI 10.21515/1990-4665-184-008. – EDN ZPNQIC.
7. Obosnovanie konstruktivnyh parametrov izmel'čajushhego uzla / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, V. V. Kravchenko, E. R. Minakov // Vestnik APK Stavro-pol'ja. – 2018. – № 2(30). – S. 22-28. – DOI 10.31279/2222-9345-2018-7-30-22-28. – EDN XTTOQH.
8. Sokolova A. P. Vlijanie obespečenosti tehnikoj na jekonomičeskie pokazateli rastenievodstva [Tekst] / A. P. Sokolova, Ju. K. Kastidi, G. F. Bershickaja G.F., M. E. Trubilin // Sel'skij mehanizator – M.: Iz-vo. «Niva». – 2015. № 2. S. 22-23.
9. Sineokov G. N. Teorija i raschet pochvoobrabatyvajushhih mashin [Tekst] / G. N. Sineokov, I. M. Panov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 328 s.
10. Trubilin A. I. Teoretičeskie aspekty povyšeniya jeffektivnosti is-pol'zovanija sel'skohozjajstvennoj tehniki v rastenievodstve [Tekst] / A. I. Trubilin, Ju. I. Bershickij, Ju. K. Kastidi // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Krasnodar.: Iz-vo. «KubGAU». – 2009. № 17. S. 7–11.
11. Trubilin, E. I. Ravnovesie diskovyh boron i lushhil'nikov v gorizon-tal'noj ploskosti / E. I. Trubilin, K. A. Soht, V. I. Konovalov // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 40. – S. 166-169. – EDN PWZCCD.
12. Konovalov, V. I. Justification of design parameters of a disk working body with a changing radius of curvature / V. I. Konovalov // E3S Web of Conferences, Sevastopol, 07–11 sentjabrja 2020 goda. – Sevastopol, 2020. – P. 01014. – DOI 10.1051/e3sconf/202019301014. – EDN CTQPQJ.
13. Konovalov, V. Analytical study of the design parameters of the grinding unit of disk harrows / V. Konovalov, S. Konovalov, V. Igumnova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 sentjabrja 2019 go-da. Vol. 403. – Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012086. – DOI 10.1088/1755-1315/403/1/012086. – EDN PTSUKR.
14. Konovalov, V. I. Similarity and Differences of Husking and Disking of the Soil. Prospects of Improving Disk Tools / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, A. Strakhov //

E3S Web of Conferences : International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2024), Kuban State Agrarian University named after. I.T. Trubilina, 23–24 janvarja 2024 goda. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2024. – P. 01007. – DOI 10.1051/e3sconf/202449301007. – EDN KUUXTS.

15. Konovalov, V. I. Comparative Agrotechnological Assessment of Disk Tillage Tools / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, A. Strakhov // E3S Web of Conferences : International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2024), Kuban State Agrarian University named after. I.T. Trubilina, 23–24 janvarja 2024 goda. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2024. – P. 01008. – DOI 10.1051/e3sconf/202449301008. – EDN THEHHC.

16. Konovalov, V. I. Analysis of research on soil destruction criteria during its interaction with working bodies / V. I. Konovalov // E3s web of conferences : International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2021), Krasnodar, Russia, 24–26 maja 2021 goda. Vol. 285. – Krasnodar, Russia: EDP Sciences, 2021. – P. 07003. – DOI 10.1051/e3sconf/202128507003. – EDN UVDAVW.

17. Konovalov, V. I. Influence of Design and Technological Parameters of Disk Working Bodies on the Height of the Crest of the Bottom of the Furrow / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 346. – P. 03006. – DOI 10.1051/matecconf/202134603006. – EDN GBFJEM.

18. Konovalov, V. I. Kinematic Analysis of a Disk Working Body with a Changing Radius of Curvature / V. I. Konovalov, S. I. Konovalov, V. I. Baradakov // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 346. – P. 03007. – DOI 10.1051/matecconf/202134603007. – EDN BBVXPS.

19. Sokht, K. A. Uniformity of the soil tillage depth with tools with disk working bodies / K. A. Sokht, V. I. Konovalov // E3S Web of Conferences, Krasnodar, 30–31 maja 2023 goda / Kuban State Agrarian University. Vol. 398. – Krasnodar: EDP Sciences, 2023. – P. 01012. – DOI 10.1051/e3sconf/202339801012. – EDN NTEYQB.

20. Rykov V. B. System of energy criteria in the justification of technical units for field production / V. B. Rykov, S. I. Kambulov, E. I. Trubilin, YU. K. Kastidi // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 193. – P. 01008.