

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.3:631.51

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.578-593



Условия равновесия сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы

И. В. Божко*, Г. Г. Пархоменко, С. И. Камбулов
ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»
(г. Зерноград, Россия)

*i.v.bozhko@mail.ru

Введение. Как известно, в настоящее время для решения вопроса равновесия сельскохозяйственных агрегатов является недостаточным применение уравнений статики и динамики, а также требуется введение дополнительных усилий, что в свою очередь существенно увеличивает сложность исследований в данном направлении. Известные исследования характеризуются тем, что при анализе устойчивости почвообрабатывающего орудия, исходя из условия равновесия, в качестве рабочего органа рассматривается стандартный корпус плуга.

Материалы и методы. В исследовании применялись методы, позволяющие определить условия равновесия системы сходящихся сил в аналитической или геометрической форме. Условия равновесия определялись для навесного пятикорпусного комбинированного орудия для послонной безотвальной обработки почвы. Аналитическое определение условий равновесия системы осуществлялось посредством составления уравнений равновесия. Графическое определение условий равновесия осуществлялось посредством построения силовых многоугольников для вертикальной и горизонтальной плоскости проекций.

Результаты исследования. В результате исследований установлено, что почвообрабатывающие агрегаты имеют избыточное число связей (опор). Получено условие равновесия сил, действующих на почвообрабатывающее орудие с рабочими органами для послонной безотвальной обработки почвы, имеющие двенадцать связей: пять полевых досок по две связи и два опорных колеса по одной, воспринимаемые реакции от взаимодействия с почвой которых должны быть положительными.

Обсуждение и заключение. По итогам исследований можно отметить, что современные сельхозмашины являются многооперационными статически неопределимыми системами. Вследствие этого усложняется процесс их регулирования во время работы и становится практически невозможным проведение силовых расчетов без принятия дополнительных условий. Для упрощения, точности и наиболее наглядного представления поставленная задача решалась посредством анализа замкнутых силовых многоугольников, методика построения которых представлена как для условия равновесия в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Ключевые слова: условия равновесия, почвообрабатывающий агрегат, аналитический метод, графический метод, пахотный горизонт

© Божко И. В., Пархоменко Г. Г., Камбулов С. И., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Финансирование: Работа выполнена в рамках НИР при финансовой поддержке государственного бюджета.

Для цитирования: Божко И. В., Пархоменко Г. Г., Камбулов С. И. Условия равновесия сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 578–593. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.578-593>

Equilibrium Conditions of Agricultural Machines for Main Tillage

I. V. Bozhko*, G. G. Parkhomenko, S. I. Kambulov
State Scientific Establishment “Agricultural Research Center
“Donskoy” (Zernograd, Russia)

*i.v.bozhko@mail.ru

Introduction. The use of the equations of statistics and dynamics is insufficient to solve the problem of equilibrium of agricultural aggregates, and additional efforts are required that in turn significantly increases the complexity of relevant research. Known studies are characterized by the fact that when analyzing the stability of the tillage machine, on the basis of the equilibrium condition, a standard plow body is considered as a working body. **Materials and Methods.** In this study, a variety of methods was used to determine equilibrium conditions for a system of converging forces in an analytical or geometric form. The equilibrium conditions were determined for the mounted five-case combined machine made soilless tillage. Analytical determination of the equilibrium conditions for the system was through the preparation of equilibrium equations. A graphical definition of the equilibrium conditions was obtained by constructing power polygons for vertical and horizontal projection planes.

Results. As a result, it was found that tillage machines have an excessive number of bonds (supports). There is defined a condition for the balance of forces acting on a tillage machine with working bodies for layer-by-layer subsurface tillage, having twelve connections: five field boards with two connections each and two support wheels one at a time, the perceivable responses from the interaction with which should be positive.

Discussion and Conclusion. According to the results, it is noteworthy that modern agricultural machines are multi-operation statically indeterminate systems. As a result, the process of their regulation during operation is complicated and it is practically impossible to make power calculations without accepting additional conditions. For simplification, accuracy and most visual representations, the problem was solved by analyzing closed force polygons, the construction method of which is presented for both the equilibrium conditions in horizontal and vertical planes.

Keywords: equilibrium conditions, tillage machine, analytical method, graphical method, arable horizon

Funding: The work was carried out within the framework of research and development with financial support from the state budget.

For citation: Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Kambulov S.I. Equilibrium Conditions of Agricultural Machines for Main Tillage. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):578-593. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.578-593>

Введение

Обработкой почвы принято считать приемы механического воздействия на почву, способствующие повышению ее плодородия и созданию лучших ус-

ловий для роста и развития растений. Основная обработка почвы включает в себя отвальный и безотвальный способы рыхления почвы. Отвальный способ (вспашка) – это прием основной

обработки почвы, при помощи которого происходит оборачивание, перемешивание и рыхление обрабатываемого слоя почвы. Безотвалный способ (чизелевание) – производится на большую глубину, но без оборота пласта почвы, что в свою очередь снижает эрозию почв и способствует накоплению влаги внутри пласта. Вспашку и чизелевание проводят осенью в системе зяблевой обработки почвы (зять) или иногда весной (весенняя вспашка). При применении этих способов изменяется плотность почвы, а также производится взаимное перемещение слоев почвы внутри плодородного пласта.

К машинам, выполняющим способ отвальной обработки почвы, относятся оборотные плуги лемешного типа российских (ПН-5-35, ПНО, ППО) и зарубежных (Lemken: Europol, Variopol, Juwel, Diamant) производителей. С различными вариантами комплектации, рабочими органами и соответственно шириной захвата таких орудий.

Машины, осуществляющие безотвалный способ обработки почвы, подразделяются на комбинированные агрегаты российского производства (АКПД-6Р, АКП-2, КАО-2, КУМ-4), зарубежным аналогом которых является AmazoneTL, а также плоскорезы глубокорыхлители (чизели). В модельном ряду сельскохозяйственных машин следует отметить такие, как АЧП-2,5, АГР-2,4, ГР-2,5, ГРН-4 российского производства и Lemkin (Labrador 160), Case (EcoloTil 2500, EcoloTiger 870) зарубежных производителей.

Все вышеперечисленные сельскохозяйственные машины для основной обработки почвы по типу агрегатирования с машинно-тракторным агрегатом (МТА) подразделяются на прицепные, полунавесные и навесные. Навесные сельхозмашины, как известно, в 1,5–2 раза легче, значительно проще по устройству и маневреннее при транспортировке, чем прицепные: для их поворота в конце поля нужна по-

лоса вдвое меньшей ширины, чем для прицепных сельхозмашин. Поэтому производительность навесных агрегатов больше, а тяговое сопротивление меньше, чем у прицепных агрегатов равной ширины захвата. Полунавесные сельхозмашины, в свою очередь, по большинству показателей занимают промежуточное место между навесными и прицепными орудиями.

Сельскохозяйственные агрегаты, как известно, во время работы находятся под воздействием различных по величине и направлению сил, из которых одни являются активными (сила тяги, вес); другие, возникающие в результате действия первых, являются пассивными (сопротивление почвы, реакция опор, силы инерции). Движение почвообрабатывающего агрегата во время работы, как правило, не бывает устойчивым из-за непостоянства сопротивления почвы ввиду различной твердости, обрабатываемого пласта, неровностей поля и так далее. Поэтому для решения вопроса равновесия сельскохозяйственных агрегатов является недостаточным применение уравнений статистики и динамики: требуется введение дополнительных усилий, что в свою очередь существенно увеличивает сложность исследований в данном направлении. Для упрощения вопроса, как правило, ограничиваются лишь статическим равновесием, которое практически позволяет отразить основные моменты правильной установки агрегата, учитывая сравнительно небольшие рабочие скорости орудий для основной обработки почвы.

Цель исследования – равновесие навесных сельскохозяйственных машин для основной послойной безотвальной обработки почвы и условия необходимые для его обеспечения.

Обзор литературы

Равновесие сельскохозяйственных машин является определяющим фактором в стабильности работы агрегатов для основной обработки почвы [1]. Од-

ним из базовых условий для почвообрабатывающих агрегатов любых видов является получение работы хорошего качества с минимальным энергопотреблением. Качество работы и потребление энергии зависят от совокупной стабильности во время эксплуатации агрегатов для основной безотвальной обработки почвы. Нестабильная работа агрегата приводит к низкому качеству выполняемых технологических операций, высокому расходу топлива и увеличению количества манипуляций, выполняемых трактором.

Количество и тип сил, которые действуют на сельскохозяйственные машины в процессе работы, определяют устойчивость почвообрабатывающих агрегатов. Когда эти силы находятся в равновесии как по горизонтали, так и по вертикали, работу сельскохозяйственного агрегата можно назвать стабильной [2–4]. Большинство исследований в этом направлении посвящены условиям равновесия плугов с различными способами агрегатирования (прицепные, полунавесные, навесные). Многими исследователями отмечается, что стабильность работы навесных орудий обуславливается различными факторами: физическими и механическими характеристиками почвы (состав, текстура, структура и влажность почвы); размерами среза и перевернутой борозды в процессе вспашки (глубина и ширина); скоростью обработки почвы и массой плуга. На устойчивую работу агрегата оказывает большое влияние тяговое сопротивление плуга. Соединения между рабочими органами (лемехом и отвалом, соответственно, их крепление на опоре и степень износа режущей кромки, формы и скорость полировки поверхностей отливков, сопротивление качению колес, трение носка о стенку борозды) [5–7].

Также известно, что сопротивление почвы в процессе вспашки имеет большое влияние на расчет устойчивости почвообрабатывающих агрегатов. Это объединяет бесконечность реакций,

создаваемых в ходе сложного процесса резки и разрушения борозды на рабочих поверхностях корпуса плуга. Исследователями установлено, что для правильной работы плуги должны поддерживать установленные параметры: рабочую глубину и ширину обработки почвы. Этого можно достичь, если у плугов есть достаточная устойчивость как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях соответственно, а распределение сил, действующих на плуги, находится в равновесии в двух плоскостях [8–10].

Следует отметить, что в вопросе условий равновесия почвообрабатывающих машин для безотвальной обработки почвы таких исследований практически не проводилось.

Материалы и методы

Как известно из механики и статике, для равновесия пространственной системы сходящихся сил необходимо и достаточно, чтобы равнодействующая этой системы сил равнялась нулю. Равновесие плоской системы сходящихся сил определяется тем, что алгебраические суммы проекций всех сил на каждую из двух выбранных любым образом координатных осей, лежащих в плоскости, в которой расположены линии действия всех сил, равнялись нулю.

Если на свободное тело действует система сходящихся сил (неважно пространственная или плоская) эквивалентная нулю, то из этого еще не следует, что данное тело будет находиться в покое от выбранной системы отсчета, так как это тело может двигаться и по инерции. Необходимыми и достаточными условиями состояния покоя свободного тела, на которое действует система сходящихся сил, являются:

- равнодействующая этой системы сил должна быть равна нулю;
- начальные скорости всех точек рассматриваемого тела также должны быть равны нулю.

Если эти два условия выполняются, то можно сказать, что данное тело

находится в равновесии (условия равновесия свободного тела в этом случае полностью совпадают с условиями равновесия свободной материальной точки). Однако иногда под равновесием рассматриваемого тела понимают его движение по инерции, а не только состояние покоя. В связи с этим в статике решают задачи, относящиеся не только к телам, находящимся в покое, но и к телам, движущимся по инерции. Если же на данное тело наложены связи, то, присоединяя силы реакций связей к активным силам, приложенным к телу, можно рассматривать его как свободное (аксиома связей). При этом в большинстве случаев в задачах статики по некоторым известным активным силам, приложенным к данному несвободному телу, требуется определить неизвестные силы реакций связей, предполагая, что тело находится в покое и что, следовательно, все приложенные к нему активные силы и силы реакций связей уравниваются [11].

При решении таких задач, когда линии действия всех сил, приложенных к телу, включая и силы реакций, пересекаются в одной точке, нужно воспользоваться условиями равновесия системы сходящихся сил в аналитической или геометрической форме.

При аналитическом методе находят искомые величины из уравнений равновесия, в левые части которых войдут, кроме проекций известных активных сил, и проекции неизвестных сил реакций связей. Следует отметить, что те соотношения, в которые будут входить проекции сил реакций связей, называют *уравнениями равновесия*, а те из них, в которые проекции сил реакций связей не будут входить, называют *условиями равновесия*. Если тело несвободно, то число условий равновесия будет равно числу степеней свободы тела, то есть числу независимых перемещений, которые может иметь это тело.

При применении графического метода для системы сходящихся сил

определяются искомые силы реакций связей или другие неизвестные в данной задаче величины при помощи построения замкнутого силового многоугольника или *чисто графически*, строя этот силовой многоугольник в строго определенном масштабе или вычисляя его стороны по правилам *геометрии тригонометрии* [12; 13].

Результаты исследования

Опорами сельхозмашин во время работы служат общепринятые элементы конструкции, такие как: полевые доски, колеса ограничения глубины обработки и устройства агрегатирования с трактором.

Принимая во внимание, что масса МТА значительно (приблизительно в 10 раз) больше массы агрегируемой сельхозмашины, при определении условий равновесия последней число степеней свободы будет определяться по отношению к остоу трактора [14].

Наибольшее число степеней свободы имеет прицепная сельскохозяйственная машина, так как, будучи агрегатированна с трактором в одной точке (точке прицепа), она может совершать поворот вдоль продольной, поперечной и вертикальной осей, проведенных через эту точку, а шарнирное присоединение прицепа к раме сельхозмашины делает возможным также поступательные перемещения сельхозмашины относительно трактора в вертикальном направлении. Поэтому прицепные сельхозмашины имеют относительно трактора четыре степени свободы.

Навесные сельхозмашины, агрегатированные с трактором посредством трехточечного механизма навески, имеют относительно трактора две степени свободы – возможность поворота вокруг осей y и z . Уменьшение числа степеней свободы навесной сельскохозяйственной машины относительно трактора до одной невозможно, так как это в свою очередь приведет к поломке агрегируемого устройства (если отсутствует возможность поворота сельхозмашины

вокруг оси y) и потере управляемости трактора (если отсутствует возможность поворота вокруг оси z). Агрегатирование навесной сельхозмашины с трактором при оставлении трех степеней свободы (возможности поворота вокруг осей x , y , z) целесообразно лишь в многокорпусных сельхозмашинах (5 и более корпусов), когда необходимо обеспечить независимое приспособление сельхозмашины и трактора к рельефу поля в поперечной плоскости проекции.

Полунавесные сельхозмашины в зависимости от способа агрегатирования с трактором имеют относительно последнего три или четыре степени свободы.

Как правило, сельхозмашины имеют избыточное число связей (опор). Так, к примеру, навесное пятикорпусное комбинированное орудие для послышной безотвальной обработки почвы имеет двенадцать связей: пять полевых досок, каждая из которых, соприкасаясь с дном и стенкой борозды, одновременно воспринимает два усилия (одно параллельное оси z , другое – оси y), и два опорных колеса, которые добавляют по еще одной связи каждое. Число степеней свободы такого орудия относительно МТА равно двум, следовательно, в рассматриваемом случае число избыточных опор равно десяти.

Таким образом, современные сельхозмашины являются многооперационными статически неопределимыми системами, что в свою очередь усложняет их регулировку во время работы и делает практически невозможным проведение силовых расчетов без принятия дополнительных условий. Поэтому при проведении расчетов предположим, что:

- полевые доски корпусов сельхозмашины не соприкасаются с дном борозды, что соответствует случаю работы долотообразного лемеха;

- все корпуса рабочих органов сельхозмашины и полевые доски одинаково нагружены;

- величины коэффициента трения почвы о сталь f и коэффициента пере-

катывания колеса μ известны ($\mu = \text{const}$ при различных нагрузках на колесо).

Равенство усилий, приложенных к рабочей поверхности каждого корпуса, позволяет заменить силы и моменты, приложенные к отдельным корпусам, равнодействующей силой и суммарным моментом, приложенными к среднему корпусу почвообрабатывающей машины. Из тех же соображений усилия, приложенные к полевым доскам корпусов агрегата, заменяют равнодействующей силой F , приложенной к полевой доске среднего корпуса.

Определение сил, действующих на почвообрабатывающий агрегат, может быть выполнено аналитическим и графическим методами [15; 16].

Поскольку колеса и полевые доски являются односторонними связями, условия равновесия хода агрегата заключаются в том, чтобы реакции этих опор были всегда положительными.

Проверочный расчет устойчивости хода производится дважды:

- для случая работы агрегата с острыми долотами, когда угол ψ , характеризующий наклон силы R_{xz} , имеет положительное значение;

- при работе агрегата с износившимися (тупыми) долотами, когда угол ψ отрицательный.

Аналитический метод определения сил, действующих на навесной почвообрабатывающий агрегат

Задача заключается в определении усилий S , N_n , N_d в звеньях механизма навески T и в тягах грузового вала, а также усилий Q и F , приложенных соответственно к ободу опорного колеса и полевой доске среднего корпуса агрегата. При этом известны масса агрегата G , главный вектор сил сопротивления почвы R и момент динамы M_0 (рис. 1). Линии действия усилий T и T' в тягах грузового вала механизма навески на схеме изображены параллельными оси Z и приложенными к оси подвеса в точках, соответствующих центрам присоединительных втулок нижних тяг механизма навески. Такое

допущение возможно, так как определение усилий T и T' (равных по величине, но при этом противоположно направленных) необходимо лишь для определения величины момента, удерживающего агрегат от поворота вокруг оси x .

Координаты точек приложения всех сил известны, за начало координат на схеме (рис. 1) принята середина левой цапфы оси подвеса – точка O .

Использование уравнений, определяющих условия равновесия твердого тела в пространстве, дает:

$$R_x + Q_x + F_x + S_x - N_{lx} - N_{nx} = 0, \quad (1)$$

$$F_y - R_y + N_{ly} - N_{ny} = 0, \quad (2)$$

$$T' - T + N_{lz} + N_{nz} + Q_z + S_z - R_z - G = 0, \quad (3)$$

$$Q_z y_Q - G y_G + F_y z_F - R_y z_R - R_z y_R + \\ + S_z y_z + N_{lz} y_N + T' y_T - M_{Ox} = 0, \quad (4)$$

$$Q_z x_Q + Q_z z_Q - S_x z_S + R_x z_R - R_z x_R + \\ + F_x z_F - G x_G + M_{Oy} = 0, \quad (5)$$

$$N_{lx} y_N - S_x y_S - Q_x y_Q - R_x y_R - R_y x_R + \\ + F_y x_F - F_x y_F - M_{Oz} = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что:

$$T = T'; Q_x = \mu Q_z; F_x = f F_y;$$

$$S_z = S_x \operatorname{tg} \alpha; N_{lz} = N_{lx} \operatorname{tg} \beta; N_{nz} = N_{nx} \operatorname{tg} \beta; \\ N_{ly} = N_{lx} \operatorname{tg} \gamma_1; N_{ny} = N_{nx} \operatorname{tg} \gamma_2,$$

где α , β , γ_1 и γ_2 – углы, характеризующие направление звеньев механизма навески в соответствующих плоскостях проекций [17; 18].

Далее в найденных уравнениях необходимо сделать подстановки и упрощения, после чего произвести расчет обычными методами, применяемыми для решения системы линейных уравнений.

Графическое определение сил, действующих на агрегат, навешенный на колесный трактор

Заданными являются силы R_{xz} и R_{xy} , приложенные к среднему корпусу аг-

регата соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях проекций, а также вес сельхозмашины G .

Необходимо определить реакцию F стенки борозды, реакцию Q на опорных колесах агрегата и усилия S , N_1 и N_2 в верхнем, нижнем левом и нижнем правом звеньях механизма навески.

Рассматривая равновесие агрегата в вертикальной плоскости проекций, зададимся значением коэффициента перекачивания опорных колес μ , также определимся направлением силы Q и величиной силы F_x . При работе агрегата на плотных почвах $\mu = 0,15$, а при работе на рыхлых почвах $\mu = 0,2$ соответственно. Величина силы F_x зависит от величины боковой составляющей тягового сопротивления R_y , коэффициента трения f , положения на раме агрегата опорных колес, а также от направления в плане линии тяги и верхнего звена AB механизма навески. Так как в начале расчетов представляется невозможным точно определить влияние перечисленных факторов на величину силы F_x , то принимаем:

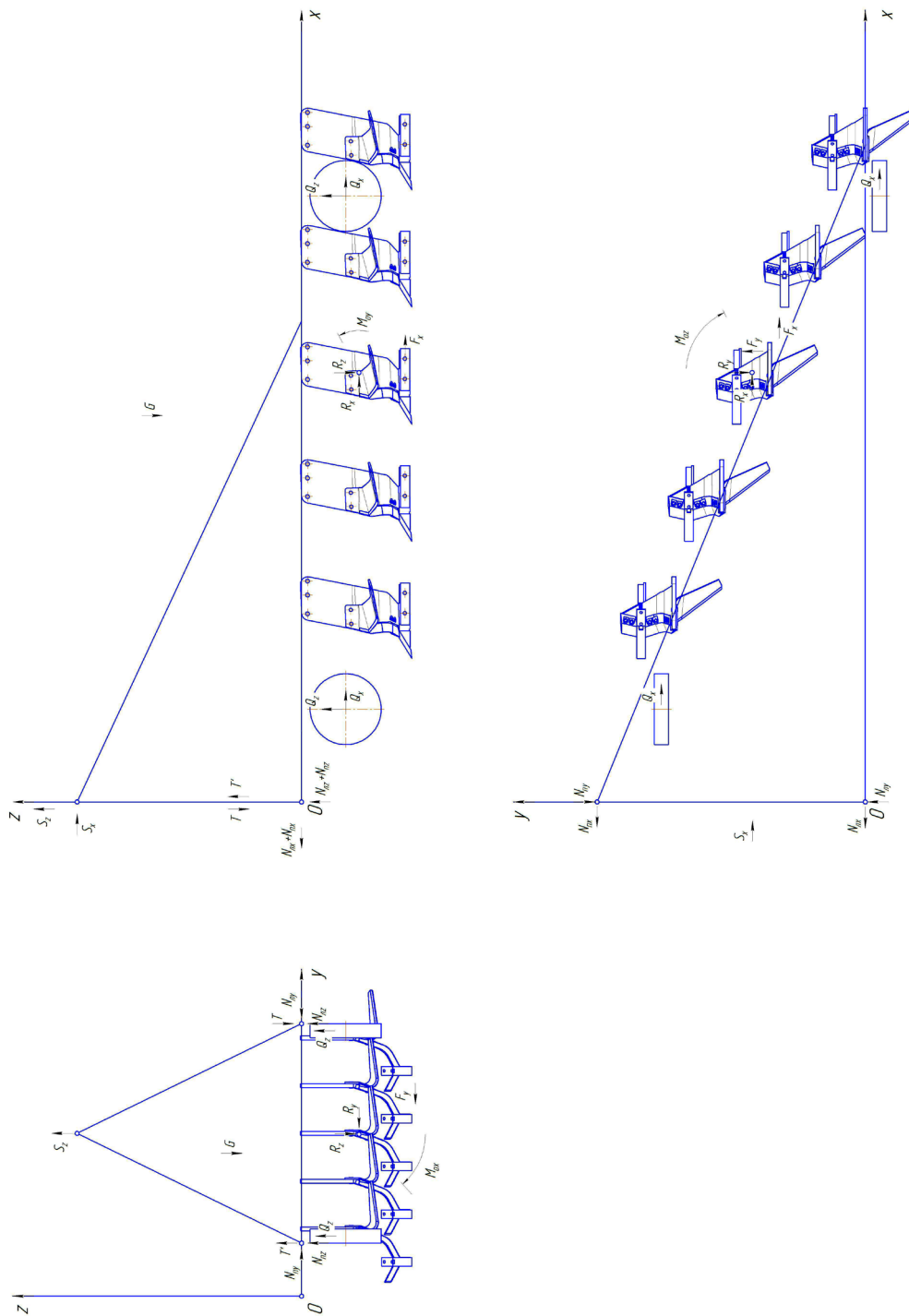
$$F_y = R_y = \frac{R_x}{5} \text{ и } f = 0,5, \quad (7)$$

откуда:

$$F_x \approx \frac{R_x}{10}. \quad (8)$$

Силу F будем считать приложенной к концу полевой доски среднего корпуса агрегата.

Силы, действующие на агрегат, должны быть нанесены на соответствующие проекции схемы сельхозмашины. Геометрическое сложение этих сил произведем не на самой схеме, а в стороне, построив для этого в каждой плоскости проекции свой силовой многоугольник. Построение силовых многоугольников дает более точные и наглядные результаты, чем последовательное сложение на схеме агрегата действующих на него сил.



Р и с. 1. Схема сил, действующих на навесной пятикорпусный агрегат

F i g. 1. Forces acting on the mounted five body unit

Построение силового многоугольника в вертикальной плоскости проекций трактора (рис. 2) начнем со сложения сил G и R_{xz} , после определения направления равнодействующей этих сил (силы R_G) на схеме агрегата через точку 1 , являющуюся пересечением направления сил G и R_{xz} , проводим прямую $1-2$, параллельную равнодействующей силе R_G . Сложив силы R_G и F_x , получим результирующую силу R_1 , параллельно направлению которой через точку 2 на схеме агрегата отложим прямую $2-3$, пересекающую направление силы Q в точке 3 . Для графического определения направления линии тяги (направления силы P_{xz}) на схеме агрегата соединим прямой точки 3 и π_1 .

Основная силовая нагрузка Q при работе агрегата приходится на переднее опорное колесо, вследствие чего построение силового многоугольника производится в привязке точек проекций сил относительно переднего опорного колеса. Заднее опорное колесо предусмотрено в конструкции агрегата для повышения устойчивости хода рамы сельхозмашины параллельно пахотному горизонту и снижению вероятности возникновения эффекта глиссирования [19; 20].

Путем разложения в силовом многоугольнике силы R_1 по направлению сил P_{xz} и Q определим их величину. Далее разложением силы P_{xz} по направлениям AB и CD найдем проекции усилий S и $N_1 + N_2$ в звеньях механизма навески на плоскость xOz . На этом заканчивается определение сил, действующих на агрегат в вертикальной плоскости проекций. В том случае, когда точка π_1 из-за малого наклона звеньев лежит за пределами схемы, искомые силы можно определить построением плана скоростей механизма $ABCD$ в масштабе звена CD .

В горизонтальной плоскости проекций произведем построения, аналогичные описанным выше (рис. 3).

Построение силового многоугольника начнем со сложения сил R_{xy} и Q_x .

Сила Q_x имеет обратное направление относительно движения агрегата. Так как в конструкции предусмотрено второе опорное колесо, расположенное по линии направления силы R_{xy} , также имеющее силу Q_x и оказывающее уравновешивающий эффект хода рамы агрегата относительно пахотного горизонта, можно сделать допущение о том, что направление равнодействующей силы R_Q , образованной силами R_{xy} и Q_x , будет параллельно направлению силы R_{xy} , образующими точку 4 на крайнем рабочем органе агрегата. А воздействия, оказываемые силами Q_x от обоих опорных колес, являются уравновешивающими друг друга, и ими можно пренебречь.

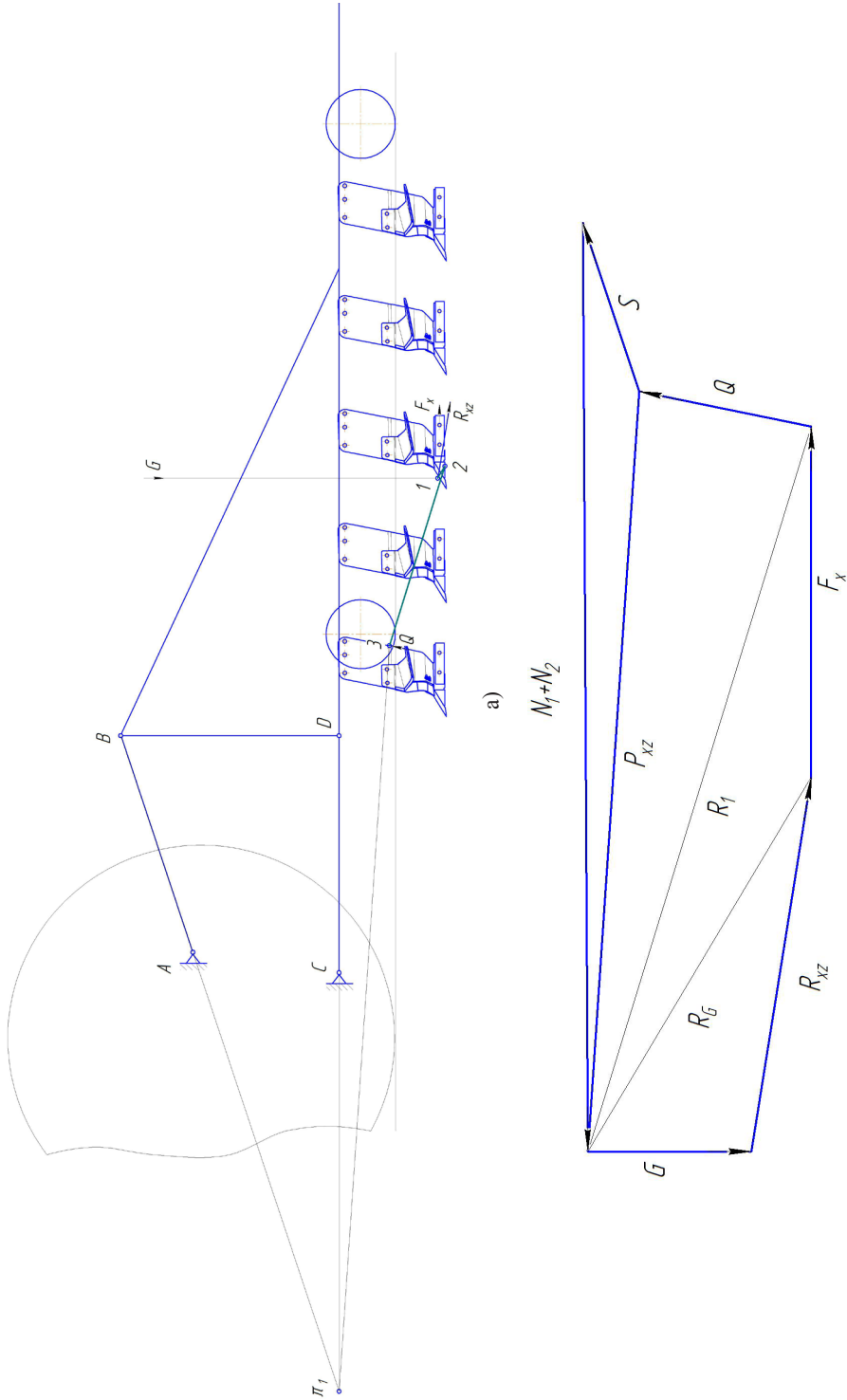
Через точку 4 до пересечения с направлением силы F проведем прямую $4-5$. Точку 5 соединим с полюсом π_2 , после чего в многоугольнике сил разложим силу R_Q по направлениям, параллельным направлению силы F и линии $5 - \pi_2$ и определим величины сил P_{xy} и F .

Из многоугольника сил вертикальной плоскости проекций в силовой многоугольник горизонтальной плоскости проекций спроектируем усилие S , воспринимаемое верхним звеном механизма навески, и найдем равнодействующую R_s сил P_{xy} и S . Далее, перенеся из схемы агрегата в силовой многоугольник направления C_1D_1 и C_2D_2 нижних звеньев механизма навески, разложим по этим направлениям силу R_s . Определим величину проекций на плоскость xOy усилий N_1 и N_2 , возникающих в этих звеньях.

Обсуждение и заключение

По итогам исследований следует отметить, что современные сельхозмашины являются многооперационными статически неопределимыми системами. Вследствие этого усложняется их регулировка во время работы и становится практически невозможным проведение силовых расчетов без принятия дополнительных условий.

Установлено, что почвообрабатывающие агрегаты имеют избыточное

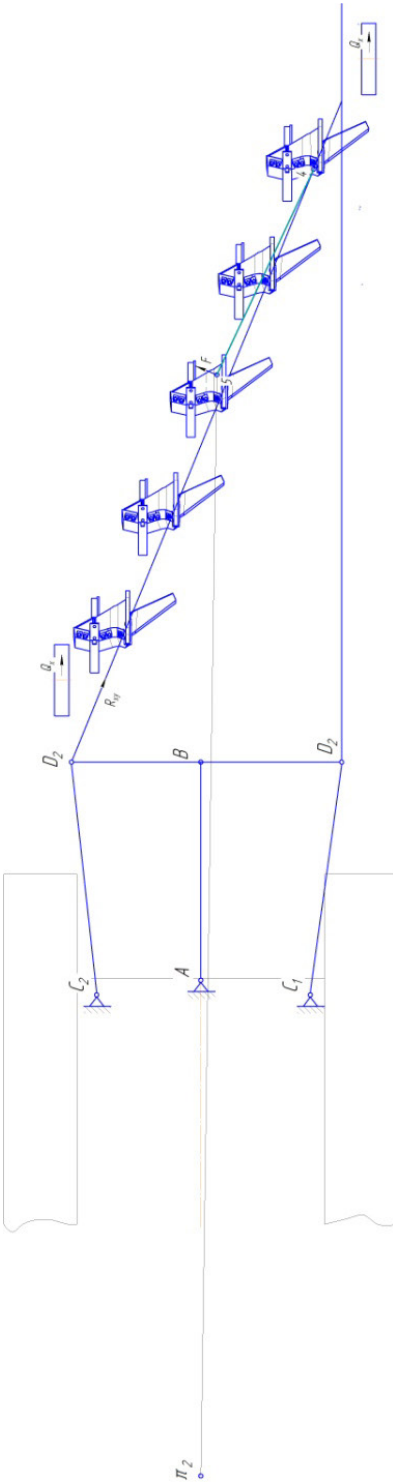


Р и с. 2. Схема сил, действующих на агрегат, навешенный на колесный трактор, в вертикальной плоскости проекций:

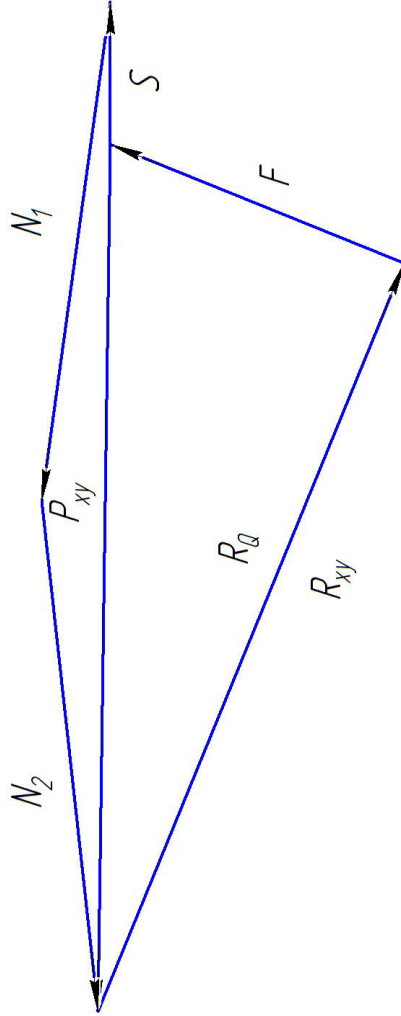
а) схема сил; б) силовой многоугольник

Fig. 2. Forces acting on the mounted unit of the wheeled tractor, in a vertical plane of projections:

a) force scheme; b) force polygon



a)



b)

Р и с. 3. Схема сил, действующих на агрегат, навешенный на колесный трактор, в горизонтальной плоскости проекций: а) схема сил; б) силовой многоугольник

Fig. 3. Forces acting on the mounted unit of the wheeled tractor, in the horizontal plane of the projections: a) force scheme; b) force polygon

число связей (опор). Навесное пятикорпусное комбинированное орудие для послонной безотвальной обработки почвы имеет двенадцать связей: пять полевых досок, каждая из которых, соприкасаясь с дном и стенкой борозды, одновременно воспринимает два усилия (одно параллельное оси z , другое – оси y), и два опорных колеса, которые добавляют по еще одной связи каждое. В то время, как число степеней свободы такого орудия относительно МТА равно двум, следовательно, в рассматриваемом случае число избыточных опор равно десяти.

Условие равновесия хода агрегата относительно пахотного горизонта заключается в том, чтобы реакции, воспринимаемые от опор, опорных колес глубины хода и полевых досок агрегата, были всегда положительными.

Определение сил, действующих на почвообрабатывающий агрегат, производилось аналитическим и графическим методами.

При аналитическом методе искомые величины определялись из уравнений равновесия, в левые части которых входят, кроме проекций известных активных сил, и проекции неизвестных сил реакций связей. Далее в найденных уравнениях равновесия необходимо сделать подстановки и упрощения, после чего произвести расчет обычными методами, применяемыми для решения системы линейных уравнений.

При применении графического метода для системы сходящихся сил искомые силы реакций связей или другие неизвестные величины определялись при помощи построения замкнутого силового многоугольника. Графическое определение сил, действующих на навесной почвообрабатывающий агрегат производили как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости проекций. Построение силовых многоугольников дает более точные и наглядные результаты, чем последовательное сложение на схеме агрегата действующих на него сил.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Paraschiv G., Maican E., Paraschiv I., Bucur D.** Study on Stability at Work for Tillage Aggregates // *Cercetări Agronomice în Moldova*. 2007. Issue 2. Pp. 5–13. URL: http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/en-V2_2007 (дата обращения: 18.11.2019).
2. **Tenu I., Carlescu P., Cojocariu P., Rosca R.** Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil // *Resource Management for Sustainable Agriculture*. 2012. Pp. 263–296. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/47746>
3. **Godwin R. J.** A Review of the Effect of Implement Geometry on Soil Failure and Implement Forces // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 97, Issue 2. Pp. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>
4. **Askari M., Khalife E.** Draft Force Inputs for Primary and Secondary Tillage Implements in a Clay Loam Soil // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 21, Issue 12. Pp. 1789–1794. URL: https://www.researchgate.net/publication/248386870_Draft_Force_Inputs_for_Primary_and_Secondary_Tillage_Implements_in_a_Clay_Loam_Soil (дата обращения: 18.11.2019).
5. **Al-Suhaibani S. A., Ghaly A. E.** Comparative Study of the Kinetic Parameters of Three Chisel Plows Operating at Different Depth Sand Forward Speed in a Sandy Soil // *The International Journal of Engineering and Science*. 2013. Vol. 2, Issue 7. Pp. 42–59. URL: <http://www.theijes.com/papers/v2-i7/Part.6/H0276042059.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).
6. **Deshpande Sh., Shirwal S.** Studies on Operational Parameters of Selected Tillage Tools in Soil Bin // *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 5, Issue 3. Pp. 381–389. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/a77b/60293849cfa982ac144405774dae37ad02bf.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).

7. **Mandradzhiev S., Kehayov D.** Degree of Influence of the Lid Angle over Soil Sputtering and Disintegration by a Tiller // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2007. Vol. 13. Pp. 247–252. URL: <https://www.agrojournal.org/13/02-13-07.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).
8. Effect of Soil Forces on the Surface of Moldboard Plow under Different Working Conditions / I. A. Mari [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2014. Vol. 20, Issue 2. Pp. 277–281. URL: https://www.researchgate.net/publication/262603386_Effect_of_soil_forces_on_the_surface_of_moldboard_plow_under_different_working_conditions/references (дата обращения: 18.11.2019).
9. Plough Section Control for Optimised Uniformity in Primary Tillage / S. K. Nielsen [et al.] // Advances in Animal Biosciences. 2017. Vol. 8, Issue 2. Pp. 444–449. DOI: <https://doi.org/10.1017/S2040470017000735>
10. **Al-Subaibani S. A., Ghaly A. E.** Performance Evaluation of a Heavy Duty Chisel Plow at Various Tillage Depth and Forward Speeds // American J. of Engineering and Applied Sciences. 2010. Vol. 3, Issue 4. Pp. 588–596. URL: <https://thescrip.com/pdf/10.3844/ajeassp.2010.588.596> (дата обращения: 18.11.2019).
11. **Manuwa S. I.** Performance Evaluation of Tillage Tines Operating under Different Depths in a Sandy Clay Loam Soil // Soil And Tillage Research. 2009. Vol. 103, Issue 2. Pp. 399–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.004>
12. **Ibrahmi A., Bentaher H., Maalej A.** Soil-Blade Orientation Effect on Tillage Forces Determined by 3D Finite Element Models // Spanish Journal of Agricultural Research. 2014. Vol. 12, no. 4. Pp. 941–950. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014124-5766>
13. **Safari M., Gazor H. R.** Comparison of Conventional Tractors Performance during Primary Tillage in Iran // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2014. Vol. 16, Issue 1. Pp. 61–68. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2608/0> (дата обращения: 18.11.2019).
14. **Rosa U. A., Wulfsohn D.** Soil Bin Monorail for High-Speed Testing of Narrow Tillage Tools // Biosystems Engineering. 2008. Vol. 99, Issue 3. Pp. 444–454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2007.11.010>
15. **Keller T., Arvidsson J.** A Model for Prediction of Vertical Stress Distribution near the Soil Surface Below Rubber-Tracked Undercarriage Systems Fitted on Agricultural Vehicles // Soil and Tillage Research. 2016. Vol. 155. Pp. 116–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.014>
16. A Comparative Study of Conventional and Controlled Traffic in Irrigated Cotton: I. Heavy Machinery Impact on the Soil Resource / J. Bennet [et al.] // Soil and Tillage Research. 2017. Vol. 168. Pp. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.012>
17. **Носков Н. К., Позин Б. М., Трояновская И. П.** Математическая модель бокового увода трактора // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 1 (31). С. 35–39. URL: [https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1\(31\)_2017.pdf](https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1(31)_2017.pdf) (дата обращения: 18.11.2019).
18. **Миронов Д. А., Лискин И. В., Сидоров С. А.** Влияние геометрических параметров долота на тяговые характеристики и ресурс лемехов отечественных плугов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 6. С. 25–29. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/105> (дата обращения: 18.11.2019).
19. **Лискин И. В., Миронов Д. А., Сидоров С. А.** Равновесие плуга в продольно-вертикальной плоскости // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 6. С. 41–46.
20. **Adem H. H., Vanapalli S. K.** Review of Methods for Predicting in Situ Volume Change Movement of Expansive Soil Over Time // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 7, Issue 1. Pp. 73–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.11.002>

Поступила 27.03.2019; принята к публикации 18.04.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Божко Игорь Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: E-9518-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, ScopusID: 57204682997, i.v.bozhko@mail.ru

Пархоменко Галина Геннадьевна, ведущий научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: D-2633-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, parkhomenko.galya@yandex.ru

Камбулов Сергей Иванович, главный научный сотрудник лаборатории механизации полеводства отдела механизации растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, Научный городок, д. 3), доктор технических наук, ResearcherID: A-6156-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, ScopusID: 57207655797, kambulov.s@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. В. Божко – постановка задачи, определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, критический анализ и доработка решения; Г. Г. Пархоменко – постановка задачи, анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста; С. И. Камбулов – научное руководство, постановка задачи, критический анализ и доработка решения.

Благодарности: Авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Paraschiv G., Maican E., Paraschiv I., Bucur D. Study on Stability at Work for Tillage Aggregates. *Cercetări Agronomice în Moldova = Agronomic Research in Moldova*. 2007; (2):5-13. Available at: http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/en-V2_2007 (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
2. Tenu I., Carlescu P., Cojocariu P., Rosca R. Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil. *Resource Management for Sustainable Agriculture*. 2012; 263-296. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/47746>
3. Godwin R.J. A Review of the Effect of Implement Geometry on Soil Failure and Implement Forces. *Soil and Tillage Research*. 2007; 97(2):331-340. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>
4. Askari M., Khalife E. Draft Force Inputs for Primary and Secondary Tillage Implements in a Clay Loam Soil. *World Applied Sciences Journal*. 2013; 21(12):1789-1794. Available at: https://www.researchgate.net/publication/248386870_Draft_Force_Inputs_for_Primary_and_Secondary_Tillage_Implements_in_a_Clay_Loam_Soil (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
5. Al-Suhaibani S.A., Ghaly A.E. Comparative Study of the Kinetic Parameters of Three Chisel Plows Operating at Different Depth Sand Forward Speed in a Sandy Soil. *The International Journal of Engineering and Science*. 2013; 2(7):42-59. Available at: <http://www.theijes.com/papers/v2-i7/Part.6/H0276042059.pdf> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
6. Deshpande Sh., Shirwal S. Studies on Operational Parameters of Selected Tillage Tools in Soil Bin. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2015; 5(3):381-389. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a77b/60293849cfa982ac144405774dae37ad02bf.pdf> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
7. Mandradzhiev S., Kehayov D. Degree of Influence of the Lid Angle over Soil Sputtering and Disintegration by a Tiller. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2007; 13:247-252. Available at: <https://www.agrojournal.org/13/02-13-07.pdf> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)

8. Mari I.A., Ji Ch., Tagar A.A., et al. Effect of Soil Forces on the Surface of Moldboard Plow under Different Working Conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2014; 20(2):277-281. Available at: https://www.researchgate.net/publication/262603386_Effect_of_soil_forces_on_the_surface_of_moldboard_plow_under_different_working_conditions/references (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
9. Nielsen S.K., Munkholm L.J., Aarestrup M.H., et al. Plough Section Control for Optimised Uniformity in Primary Tillage. *Advances in Animal Biosciences*. 2017; 8(2):444-449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S2040470017000735>
10. Al-Suhaibani S. A., Ghaly A. E. Performance Evaluation of a Heavy Duty Chisel Plow at Various Tillage Depth and Forward Speeds. *American J. of Engineering and Applied Sciences*. 2010; 3(4):588-596. Available at: <https://thescipub.com/pdf/10.3844/ajeassp.2010.588.596> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
11. Manuwa S.I. Performance Evaluation of Tillage Tines Operating under Different Depths in a Sandy Clay Loam Soil. *Soil And Tillage Research*. 2009; 103(2):399-405. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.004>
12. Ibrahim A., Bentaher H., Maalej A. Soil-Blade Orientation Effect on Tillage Forces Determined by 3D Finite Element Models. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2014; 12(4):941-950. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014124-5766>
13. Safari M., Gazor H.R. Comparison of Conventional Tractors Performance during Primary Tillage in Iran. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2014; 16(1):61-68. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2608/0> (accessed 18.11.2019). (In Eng.)
14. Rosa U.A., Wulfsohn D. Soil Bin Monorail for High-Speed Testing of Narrow Tillage Tools. *Biosystems Engineering*. 2008; 99(3):444-454. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2007.11.010>
15. Keller T., Arvidsson J. A Model for Prediction of Vertical Stress Distribution near the Soil Surface Below Rubber-Tracked Undercarriage Systems Fitted on Agricultural Vehicles. *Soil and Tillage Research*. 2016; 155:116-123. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.014>
16. Bennet J., Robertson S.D., Jensen T.A., et al. A Comparative Study of Conventional and Controlled Traffic in Irrigated Cotton: I. Heavy Machinery Impact on the Soil Resource. *Soil and Tillage Research*. 2017; 168:143-154. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.012>
17. Noskov N.K., Pozin B.M., Troyanovskaya I.P. Mathematical Model of the Lateral Traction of the Tractor. *Izvestiya MGTU "MAMI" = News of Moscow State Technical University MAMI*. 2017; (1):35-39. Available at: [https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1\(31\)_2017.pdf](https://mospolytech.ru/storage/files/izvestiya/Izvestiya_MGTU_MAMI_No_1(31)_2017.pdf) (accessed 18.11.2019). (In Russ.)
18. Mironov D.A., Liskin I.V., Sidorov S.A. Influence of Geometrical Parameters of Chisel on Traction Characteristics and Resource of Domestic Ploughshares. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2015; (6):25-29. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/105> (accessed 18.11.2019). (In Russ.)
19. Liskin I.V., Mironov D.A., Sidorov S.A. Plow Balance in the Longitudinally Vertical Plane. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2014; (6):41-46. (In Russ.)
20. Adem H.H., Vanapalli S.K. Review of Methods for Predicting in Situ Volume Change Movement of Expansive Soil over Time. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015; 7(1):73-86. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.11.002>

Received 27.03.2019; revised 18.04.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Igor V. Bozhko, Researcher of Field Mechanization Laboratory of Plant Production Mechanization Department, State Scientific Establishment "Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-9518-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, ScopusID: 57204682997, i.v.bozhko@mail.ru

Galina G. Parkhomenko, Leading Researcher of Field Mechanization Laboratory of Plant Production Mechanization Department, State Scientific Establishment “Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: D-2633-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, parkhomenko.galya@yandex.ru

Sergey I. Kambulov, Senior Researcher of Field Mechanization Laboratory of Plant Production Mechanization Department, State Scientific Establishment “Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchnyy Gorodok, Zernograd 347740, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: A-6156-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, ScopusID: 57207655797, kambulov.s@mail.ru

Contribution of the authors:

I. V. Bozhko – problem statement, research methodology developing, collecting and analyzing analytical and practical materials on the research topic, critical analysis and finalizing the solution; G. G. Parkhomenko – problem statement, analysis of scientific sources on the topic of research, critical analysis and revision of the text; S. I. Kambulov – scientific guidance, problem statement, critical analysis and finalizing the solution.

Acknowledgements: The authors would like to thank anonymous reviewers.

All authors have read and approved the final manuscript.