




Теоретическое исследование подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы

П. И. Гаджиев , Е. В. Шестакова, Г. Г. Рамазанова

Российский государственный аграрный заочный университет
(г. Балашиха, Российская Федерация)

 pgadjiev@yandex.ru

Аннотация

Введение. Качество работы картофелеуборочных машин, наряду с конструктивной особенностью, зависит от способа уборки картофеля. Возделывание картофеля предусматривает выполнение комплекса мероприятий, направленных на повышение и сохранение качества товарной продукции при уборке картофеля. В связи с этим для снижения потерь урожая и предотвращения ветровой эрозии почвы предлагается агрегат и способ уборки картофеля. Чтобы уменьшить количество комков, соизмеримых с размерами клубней, перед подкапывающим рабочим органом картофелеуборочного агрегата устанавливаются рыхлительные лапы. Цель работы – провести теоретическое исследование подкапывающего рабочего органа картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы.

Материалы и методы. Проанализирована работа подкапывающего лемеха. Его угол наклона к горизонту обуславливает наименьшее сгруживание лемеха, минимальное сопротивление движению почвенного пласта и рациональную высоту подъема массы. Рациональное значение угла наклона лемеха определено с учетом условия, что сила подпора пласта должна быть минимальной.

Результаты исследования. Предложена математическая зависимость определения рационального значения угла наклона лемеха, обуславливающего минимальное значение силы подпора пласта, действующей вдоль лемеха. В результате исследований построены графические зависимости рационального значения угла наклона лемеха от коэффициента трения почвы о лемех и высоты подъема пласта почвы лемехом от оптимального значения угла наклона при фиксированной длине лемеха.

Обсуждение и заключение. При проведении теоретических исследований подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата учитывались тип почвы и коэффициент трения почвенного пласта о лемех. Определен рациональный угол наклона лемеха, при котором будет обеспечен оптимальный развал пласта с минимальным сгруживанием. Это обеспечит снижение потерь урожая.

Ключевые слова: сепарация почвы, картофелеуборочный агрегат, элеватор, угол наклона лемеха, сила подпора пласта, эрозия почвы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гаджиев П. И., Шестакова Е. В., Рамазанова Г. Г. Теоретическое исследование подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 263–278. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.263-278>

© Гаджиев П. И., Шестакова Е. В., Рамазанова Г. Г., 2022




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

Theoretical Research of the Potato Harvester Lifting Plowshare to Reduce Yield Losses and Soil Erosion

P. I. Gadzhiev , E. V. Shestakova, G. G. Ramazanova

Russian State Agrarian Correspondence University
(Balashikha, Russian Federation)

 pgadjiev@yandex.ru

Abstract

Introduction. The potato harvester operation quality depends not only on the design features, but also on the method for harvesting of potatoes. Cultivation of potatoes involves the implementation of a set of measures aimed at improving and preserving the quality of commercial products when harvesting of potatoes. In this regard, to reduce yield losses and prevent wind erosion of soil, a unit and method for harvesting of potatoes is proposed. To reduce the number of clods commensurate with the size of tubers, there are installed ripper tines ahead of the potato harvester tool. The aim of the work is to conduct a theoretical research of the tool of the potato harvester to reduce yield losses and soil erosion.

Materials and Methods. The lifting plowshare operation has been analyzed. Its angle to the horizon determines the least displacement of the lifting plowshare, the minimum resistance to the soil layer movement and optimal height of lifting soil mass. The optimal value of the plowshare inclination angle has been determined taking into account the condition that the back pressure of the soil layer should be minimal.

Results. There has been proposed a mathematical dependence for determining the optimal value of the angle of plowshare inclination, which determines the minimum value of the soil layer back pressure acting along the plowshare. As a result of the research, there have been plotted graphical dependences of the optimal value of the plowshare inclination angle on the coefficient of soil friction on the plowshare and dependences of the height of a soil layer lifting with the plowshare on the inclination angle optimal value at a fixed plowshare length.

Discussion and Conclusion. In carrying out the theoretical research of the potato harvester plowshare, the soil type and coefficient of a soil layer friction on the plowshare were taken into account. There has been determined the optimal angle of plowshare inclination to provide optimal breaking down of soil with minimum soil bulldozing, thus ensuring reduction in yield losses.

Keywords: soil separation, potato harvester, elevator, plowshare angle, layer back pressure, soil erosion

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gadzhiev P.I., Shestakova E.V., Ramazanova G.G. Theoretical Research of the Potato Harvester Lifting Plowshare to Reduce Yield Losses and Soil Erosion. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):263–278. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.263-278>

Введение

Качество убранный картофеля зависит не только от работы картофелеуборочных машин и их конструктивных особенностей, почвенно-климатических условий, но и от самих технологий возделывания картофеля [1–3]. Недостатком подкапывающего рабочего

органа картофелеуборочных машин является то, что почва при подкопе вместе с клубненой массой разваливается по сторонам. В результате этого происходит повреждение клубней рабочими органами комбайна [4–6]. Для устранения этой проблемы разработан агрегат и предложен способ уборки картофеля,

при котором перед подкапывающим органом устанавливаются дополнительные рыхлительные лапы [7]. Потеря при уборке картофеля в основном происходит ввиду повреждения клубней при протаскивании их с почвенными комками на сепарирующем элеваторе. Чтобы уменьшить количество комков, соизмеримых с размерами клубней, предлагается установить рыхлительные лапы в междурядьях агрегата [8; 9].

По данным Приморского ГСХА, «рыхление междурядий перед уборкой на глубину 14–16 см снижает содержание примесей в ворохе на 10 %, а повреждение клубней 1,5 раза»¹. Ветровая эрозия почвы отрицательно влияет на педосферу. В результате применения тяжелой сельскохозяйственной техники и многоходовых проходов при уборке картофеля плодородный слой почвы расплывается и сдувается ветром [10–13]. При этом «увеличивается деградация почв и уменьшается площадь почвенного покрова из-за превращения плодородных почв в пустыни» [14]. Эрозия почвы уничтожает верхние гумусовые горизонты, в которых сосредоточено почвенное плодородие. С развитием индустрии тяжелой сельскохозяйственной техники предотвращение ветровой эрозии является актуальным вопросом [15–17].

Цель исследования – провести теоретическое исследование подкапывающего рабочего органа картофелеуборочного агрегата, чтобы рекомендовать конструктивные и технологические параметры, которые позволят снизить потери урожая в виде повреждения клубней и заблаговременно предотвратить ветровую эрозию почвы во время уборки картофеля.

Обзор литературы

Н. М. Кандаулов условно разделил профиль картофельной грядки по связности на 6 зон и для каждой определил разрушающее усилие для почвенных образцов:

1. Корковая зона с толщиной 10–15 мм, требуемое разрушающее усилие 7,86–10,78 Н.

2. Зона, которая расположена ниже по всему периметру корковой, называется рыхлым слоем. Она разрушается при слабом прикосновении.

3. Зона ниже рыхлой зоны названа переходной. Требуемое разрушающее усилие относительно невелико: 2,9–4,9 Н. В зону входит пахотный слой, не подверженный деформации от тракторных колес.

4. Плотная зона расположена по бокам грядки. Для нее разрушающее усилие равно 3,88–3,72 Н.

5. Для зоны междурядий необходимое усилие 7,86–9,80 Н.

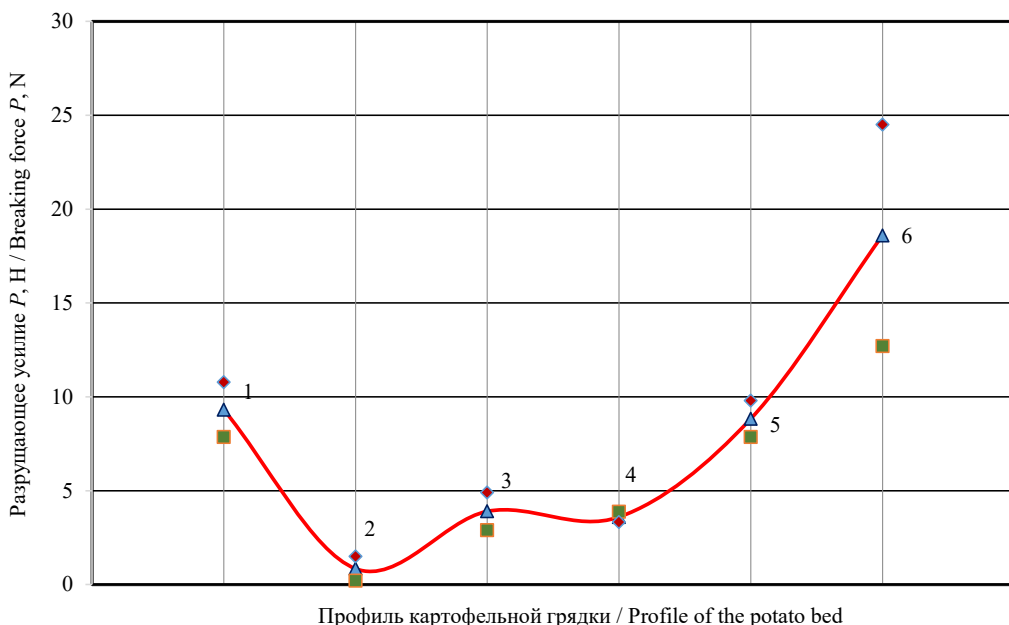
6. Зона наибольшей плотности находится на нижнем слое грядки. Для данной зоны разрушающее усилие высокое и колеблется в пределах 12,7–24,5 Н².

Как видно из анализа исследований, самые большие разрушающие усилия для улучшения разрыхления почвы потребуются в четвертой и шестой зоне картофельной грядки, где больше всего прикасаются колеса трактора (рис. 1).

Для осуществления данной технологии при уборке картофеля предложен картофелеуборочный агрегат, общий вид которого показан на рисунке 2а; на рисунке 2б – технологическая схема картофелеуборочного агрегата; на рисунке 2с – фрагменты расположения рыхлительных лап в междурядьях и подкапывающего лемеха

¹ Бочкарев В. В., Кияшко Н. В., Обухов В. П. Уборка и хранение картофеля, корнеплодов и овощей : учебн. пособие. Усурийск, 2015. 132 с.

² Кандаулов Н. М. Исследование связности картофельной грядки и ее влияния на выбор технологических и конструктивных параметров картофелеуборочных машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1964. 20 с.



Р и с. 1. Требуемое разрушающее усилие в зависимости от профиля картофельной грядки: 1 – корковая зона; 2 – рыхлый слой; 3 – переходная зона; 4 – плотная зона; 5 – зона междурядий; 6 – зона наибольшей плотности

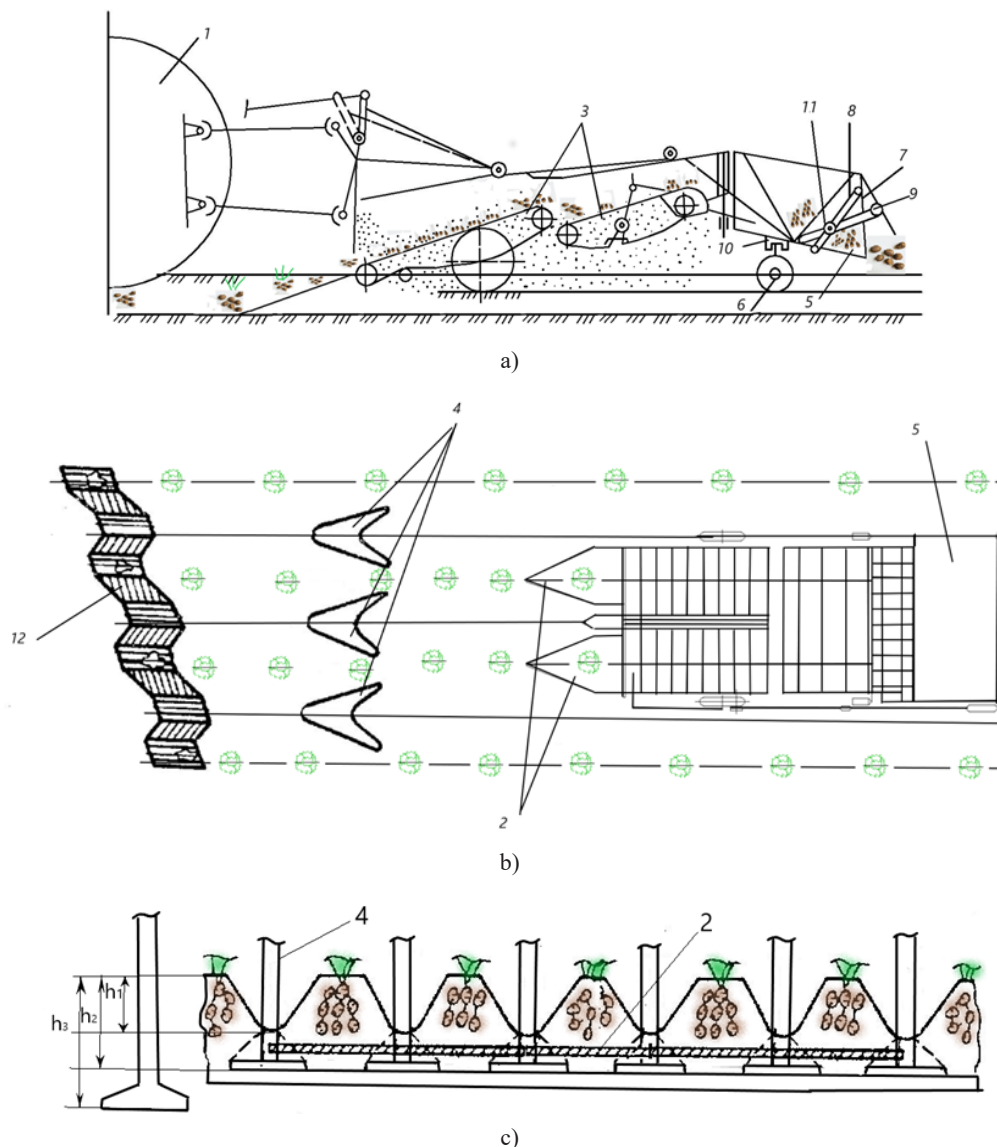
F i g. 1. Required breaking force depending on the profile of the potato bed: 1 – crust zone; 2 – loose layer; 3 – transition zone; 4 – dense zone; 5 – row spacing zone; 6 – highest density zone

соответственно. Установленные рыхлительные лапы непосредственно обрабатывают эти зоны между грядками.

Отличие работы картофелекопателя по предложенному способу заключается в том, что перед выкапыванием клубней идет рыхление междурядий в области залегания клубней. После выкапывания картофеля происходит сепарация вороха, отсеянные клубни от почвы и других примесей накапливаются в емкости, а в последующем порциями выгружаются на убранное поле.

Работа картофелеуборочного агрегата происходит следующим образом. При проходе агрегат выкапывает клубни с разрыхленной грядки и передает на сепарирующие элеваторы. Причем перед выкапыванием клубней грядка рыхлится рыхлительными лапами, установленными перед выкапывающими лемехами. Для создания

противоэрозионной преграды одна лапа рыхлителя установлена на большую глубину, чем остальные. Выкопанный клубненосный пласт проходит через сепарирующие элеваторы, отсепанная почва возвращается на поверхность поля, а клубни картофеля поступают в дозатор-накопитель, установленный за вторым элеватором [7]. «При достаточном наполнении накопителя оператор из кабины трактора через систему рычагов воздействует шарнирным толкателем 11 на выгрузную стенку 7, при этом установлен толкатель так, что своим плечом воздействует на фиксатор 9, который выходит из замка защелки 10, выгрузная стенка открывается, и накопленный картофель в большом количестве разгружается на почву в определенных местах и впоследствии подбирается и отправляется на стационар для дальнейшей обработки и переработки» [7].



Р и с. 2. а) Общий вид картофелеуборочного агрегата; б) технологическая схема картофелеуборочного агрегата; в) фрагменты расположения рыхлительных лап в междурядьях и подкапывающего лемеха соответственно; 1 – энергосредство; 2 – подкапывающий лемех; 3 – сепарирующие элеваторы; 4 – рыхлительные лапы; 5 – дозатор-накопитель; 6 – самоустанавливающееся колесо; 7 – выгрузная стенка; 8 – шарнирное закрепление стенки; 9 – фиксатор выгрузной стенки; 10 – защелка; 11 – шарнирный толкатель; 12 – выкапывание клубней

Fig. 2. a) General view of the potato harvester; b) process scheme of the potato harvester; c) fragments of the location of ripper tines in between the rows and the lifting plowshare respectively; 1 – power tool; 2 – lifting plowshare; 3 – separating elevators; 4 – ripper tines; 5 – metering pump; 6 – self-aligning wheel; 7 – ejector wall; 8 – hinged wall fastening; 9 – ejector wall fastening; 10 – latch; 11 – hinged pusher; 12 – tubers digging out

Как было указано, задачей картофелеуборочного агрегата также являются противоэрозионные мероприятия для предотвращения ветровой эрозии почвы. Известно, что в природе под воздействием атмосферных осадков и ветра, а также механического влияния происходит полное или частичное уничтожение почвенного и растительного покровов в виде эрозии почвы [11; 12; 18]. Ее объем в большей степени зависит от способа обработки почвы и в меньшей от свойств самой почвы. Для защиты пахотных земель от ветровой эрозии применяют комплекс противоэрозионных мероприятий, включающий в себя систему безотвальной обработки почвы, сокращение числа проходов сельскохозяйственных и транспортных машин по полям. Наиболее распространенными рабочими органами противоэрозионных почвообрабатывающих орудий являются плоскорежущие глубокорыхлительные лапы. Подрезанный пласт почвы разрыхляется и падает без оборота, при этом стерня остается на поверхности поля, мелкие фракции поверхностного слоя почвы просыпаются во внутренние слои пласта, способствуя эрозионным процессам [19; 20]. «Такое выполнение картофелеуборочного агрегата и способ уборки картофеля позволяют уменьшить использование транспортной техники, которая воздействует на эрозию почвы, повысить производительность, уменьшить использование ручного труда и уменьшить эрозию почвы» [7].

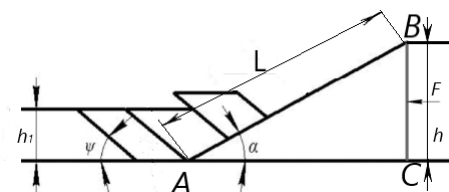
Материалы и методы

Одним из основных параметров подкапывающего лемеха картофелеуборочных машин является угол его наклона к горизонту α . Угол обуславливает наименьшее сгуживание лемеха, минимальное сопротивление движению почвенного пласта и высоту h подъема массы.

Для определения рационального значения угла α сделаем следующие допущения:

- длина лемеха постоянна $L = \text{const}$;
- сгуживание и развал подкапываемого пласта на лемехе отсутствуют.

Применяя теорию клина академика В. П. Горячкина, исследуем основные параметры подкопа пласта (рис. 3).



Р и с. 3. Схема взаимодействия клина с почвой:

F – тяговое усилие трактора, Н; α – угол наклона лемеха, град; ψ – угол скола пласта, град; h_1 – толщина клубненосного пласта, м

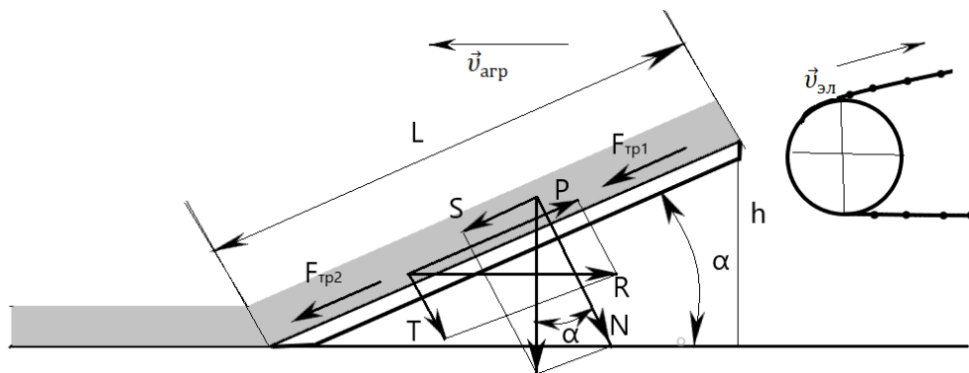
F i g. 3. Scheme of wedge-soil interaction:
 F – tractor pulling force, Н; α – angle of plowshare inclination, deg.; ψ – slope angle, deg.;
 h_1 – tuber layer thickness, m

Если принять длину лемеха постоянной, то высота h подъема пласта лемехом будет линейно зависеть от угла наклона лемеха α . Из треугольника АСВ (рис. 3)

$$h = L \sin \alpha. \quad (1)$$

При равномерном движении лемеха на пласт почвы, находящийся на нем, действуют следующие силы: G – сила тяжести пласта почвы, которая раскладывается на две составляющие N (нормальную к поверхности лемеха) и S (действующую вдоль лемеха вниз), Н; R – сила подпора со стороны пласта, которая раскладывается на T (нормальную, действующую перпендикулярно поверхности лемеха) и P (силу подпора пласта, действующую вдоль лемеха вверх), Н (рис. 4).

Нормальные составляющие силы N и T вызывают трение между почвенным



Р и с. 4. Схема сил, действующих на почвенный пласт
F i g. 4. Scheme of forces acting on a soil layer

пластом и лемехом, которое определяется формулами $F_{\text{тр}1} = fN$ и $F_{\text{тр}2} = fT$, где f – коэффициент трения между почвенным пластом и лемехом.

Рациональное значение угла наклона лемеха α определим с учетом условия, что сила подпора пласта P , действующая вдоль лемеха, должна быть минимальна. Это условие обеспечит минимальный развал пласта на лемехе.

Условия равновесия сил, действующих на почвенный пласт

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F}_{\text{тр}1} + \vec{F}_{\text{тр}2} + \vec{S} + \vec{N} = 0. \quad (2)$$

Проектируя силы на плоскость лемеха, получим уравнение

$$P - fN - fT - S = 0, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения между почвенным пластом и лемехом; $N = G \cos \alpha$; $S = G \sin \alpha$; $T = Ptg \alpha$. Подставим эти равенства вместо N , S , T в (3) и получим

$$P - fG \cos \alpha - fPtg \alpha - G \sin \alpha = 0. \quad (4)$$

Из равенства (4) выразим силу подпора почвенного пласта P :

$$P = \frac{G(f \cos \alpha + \sin \alpha)}{1 - ftg \alpha}. \quad (5)$$

Силу тяжести (вес) почвенного пласта можно определить формулой:

$$G = h_1 b L \gamma = h_1 b \frac{h}{\sin \alpha} \gamma, \quad (6)$$

где h_1 – толщина клубненосного пласта, м; b – ширина почвенного пласта, м; γ – объемный вес почвенного пласта, кг/м³.

Подставив в равенство (5) вместо веса почвенного пласта G выражение из формулы (6), получим зависимость силы подпора P почвенного пласта от угла α наклона лемеха.

$$P = \frac{h_1 b \frac{h}{\sin \alpha} \gamma (f \cos \alpha + \sin \alpha)}{1 - ftg \alpha}.$$

После преобразования имеем

$$P = h_1 b h \gamma \frac{(f \text{ctg} \alpha + 1)}{1 - ftg \alpha}. \quad (7)$$

Для определения оптимального значения угла α наклона лемеха, соответствующего минимальному значению силы подпора P почвенного пласта, продифференцируем выражение (7):

$$\frac{dP}{d\alpha} = \frac{d \left[h_1 b h \gamma \frac{(f \operatorname{ctg} \alpha + 1)}{1 - f \operatorname{tg} \alpha} \right]}{d\alpha} =$$

$$= h_1 b h \gamma \frac{\frac{f}{\cos^2 \alpha} + \frac{2f^2}{\cos \alpha \sin \alpha} - \frac{f}{\sin^2 \alpha}}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha)^2}.$$

Приравняем производную к нулю и решим полученное квадратное уравнение (8) относительно $\operatorname{tg} \alpha$:

$$h_1 b h \gamma \frac{\frac{f}{\cos^2 \alpha} + \frac{2f^2}{\cos \alpha \sin \alpha} - \frac{f}{\sin^2 \alpha}}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha)^2} = 0,$$

$$\frac{f}{\cos^2 \alpha} + \frac{2f^2}{\cos \alpha \sin \alpha} - \frac{f}{\sin^2 \alpha} = 0,$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha + 2f^2 \operatorname{tg} \alpha - 1 = 0. \quad (8)$$

Получим, что оптимальное значение угла наклона лемеха зависит от коэффициента трения почвенного пласта о лемех:

$$\operatorname{tg} \alpha = -f + \sqrt{f^2 + 1}. \quad (9)$$

Результаты исследования

Эффективность работы картофелеуборочных комбайнов в целом зависит от физико-механических свойств почвы. Учеными доказано, что при работе картофелеуборочных машин, на ряду с механическим составом, влажность почвы играет главную роль, поскольку влияет на коэффициент трения почвы

о подкапывающий лемех. Коэффициент трения почвы, в свою очередь, влияет на скорость перемешивания клубненосной массы по лемеху. С увеличением влажности до определенного предела коэффициент трения повышается, затем по мере дальнейшего увлажнения почвы снижается³. Почвы имеют разный коэффициент трения: для супесчаных 0,30–0,35; для суглинистых 0,35–0,50; для глины 0,5–0,6.

В результате проведенного теоретического исследования получено равенство (9), из которого можно определить оптимальное значение угла наклона лемеха:

$$\alpha = \operatorname{arctg}(-f + \sqrt{f^2 + 1}).$$

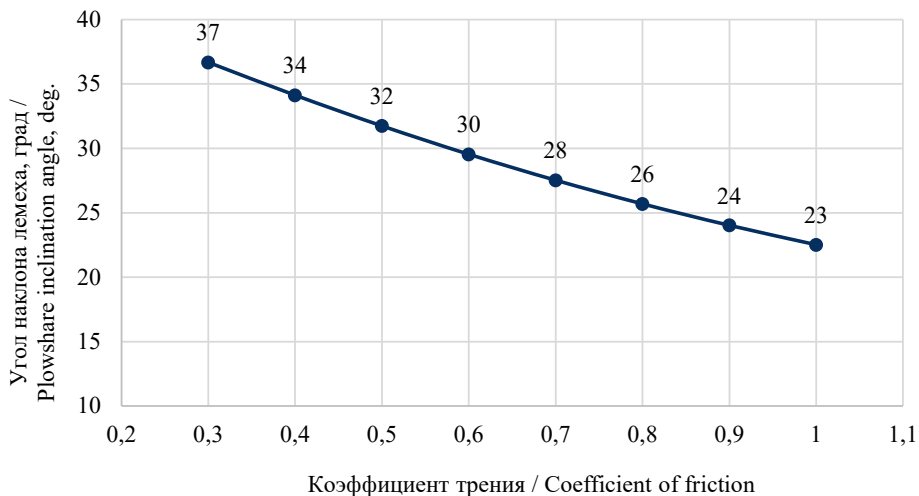
Как видно из полученного равенства, величина угла установки лемеха как одного из основных параметров подкапывающего лемеха зависит от коэффициента трения почвы о лемех обратно пропорционально. Определенное таким образом значение угла обеспечит наименьшее сгруживание лемеха, минимальное сопротивление движению почвенного пласта, снижение повреждаемости клубней.

Зависимость оптимального значения угла наклона лемеха от коэффициента трения почвы о лемех показано на графике (рис. 5). Из графика следует, что с увеличением коэффициента трения почвы о лемех угол наклона лемеха уменьшается.

С учетом оптимального значения угла наклона лемеха по формуле (1) построим график зависимости высоты подъема пласта почвы лемехом от оптимального значения угла наклона при фиксированной длине L лемеха (рис. 6).

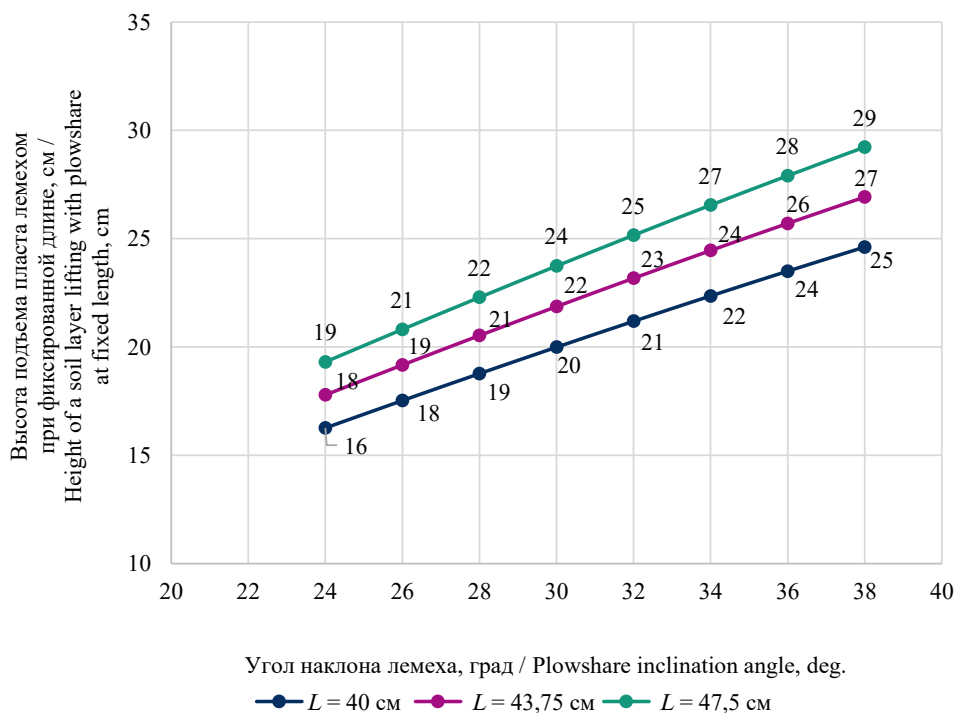
Полученные параметры подкапывающего лемеха (угол наклона, длина лемеха L) в основном обеспечивают

³ Петров Г. Д. Картофелеуборочные машины. М. : Машиностроение, 1984. 320 с.



Р и с. 5. График зависимости оптимального значения угла наклона лемеха от коэффициента трения почвы о лемех

F i g. 5. Graph of the dependence of the optimal value of the plowshare inclination angle on the coefficient of soil friction on the plowshare



Р и с. 6. График зависимости высоты подъема пласта почвы лемехом от оптимального значения угла наклона при фиксированной длине L лемеха

F i g. 6. Graph of the dependence of the height of lifting the soil layer with a plowshare on the optimal value of the inclination angle at a fixed length L of the plowshare

лучшее перемещение клубненосного пласта по лемеху. При повышенной влажности для уменьшения сгуживания лемеха и для улучшения сепарации почвы угол наклона лемеха следует увеличить относительно горизонтали. При меньшей влажности угол наклона лемеха уменьшается во избежание развала по бокам почвенного пласта для снижения потерь урожая.

Для подтверждения теоретических исследований влияния угла установки лемеха, высоты подъема пласта почвы лемехом и почвенно-клубненосной массы на сгуженность лемеха при условии, что длина L постоянна, разработан план проведения полнофакторного эксперимента. Для этого были приняты наиболее значимые факторы, влияющие на результат работы лемеха, обеспечивающие минимальный развал пласта: угол установки лемеха α (x_1), высота подъема пласта h (x_2) и почвенно-клубненосная масса m (x_3). В зависимости от условий проведения каждого опыта меняли верхний и нижний

уровень факторов. В таблице представлены уровни и интервалы варьирования факторов.

При проведении исследования процесса сгуживания лемеха почвенно-клубненосной массой в качестве критерия оптимизации (функции отклика) рассматривалась сила подпора пласта P , действующая вдоль лемеха.

По результатам проведенного полнофакторного эксперимента получено уравнение регрессии для определения эффективности сгуживания лемеха:

$$P = 1\,003,33 + 0,663x_1 + 0,64x_2 + 9,038x_3 - 30,072x_1^2 + 51,912x_2^2 + 16,067x_3^2 - 10,967x_1x_2 + 12,41x_1x_3 - 13,353x_2x_3, \quad (10)$$

По критерию Фишера уравнение регрессии (10) является адекватным и применимо для решения производственных задач. Определим значение факторов, обеспечивающих эффективное сгуживание лемеха без развала пласта.

Т а б л и ц а
T a b l e

Факторы и интервалы их варьирования
Factors and their variation intervals

Факторы / Factors	Нижний уровень (-1) / Lower level (-1)	Основной уровень (0) / Basic level (0)	Верхний уровень (+1) / Upper level (+1)	Интервал варьирования / Variation interval	Наименование фактора / Factor name
x_1 (α)	22	40	58	18	Угол установки лемеха, град / Plowshare inclination angle, deg.
x_2 (h)	0,2	0,3	0,4	0,1	Высота подъема пласта, м / Height of a soil layer lifting, m
x_3 (m)	250	300	350	50	Почвенно-клубненосная масса на лемехе, кг / Soil and tuber mass on the plowshare, kg

Для полученного уравнения регрессии (10) были построены поверхности откликов, показывающие влияние факторов на силу подпора пласта (рис. 7–9).

1. Если в качестве постоянного фактора принять угол установки лемеха $x_1 = 0$ ($\alpha = 40^\circ$), то уравнение регрессии (10), с учетом постоянного фактора, запишется в виде

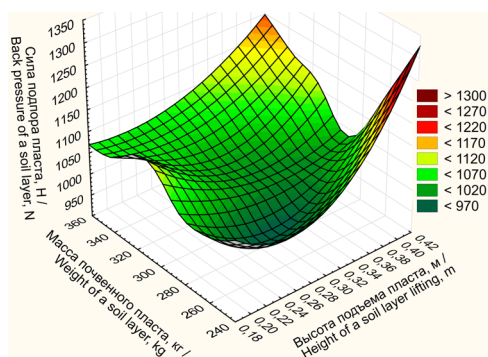
$$P = 1\,003,325 + 0,64x_2 + 9,038x_3 + 51,912x_2^2 + 16,067x_3^2 - 13,353x_2x_3. \quad (11)$$

Из анализа графиков отклика (рис. 7) видно, что экстремум функции

отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Оптимальное значение силы подпора пласта составляет $P_{\text{opt}} = 1\,001,96$ Н и достигается при $x_2 = -0,045$ (высота подъема пласта 0,296 м), $x_3 = -0,3$ (почвенно-клубненосная масса 285 кг) и $x_1 = 0$ (угол установки лемеха $\alpha = 40^\circ$).

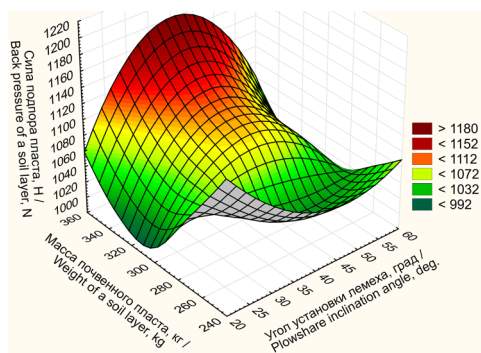
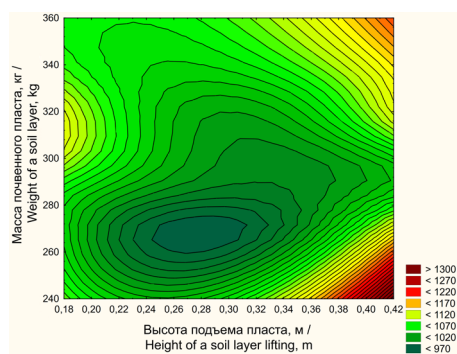
2. Если в качестве постоянного фактора принять высоту подъема пласта $x_2 = 0$ ($h = 0,2$ м), то уравнение регрессии (10), с учетом постоянного фактора, запишется в виде

$$P = 1\,003,325 + 0,663x_1 + 9,038x_3 - 30,072x_1^2 + 16,067x_3^2 + 12,41x_1x_3. \quad (12)$$



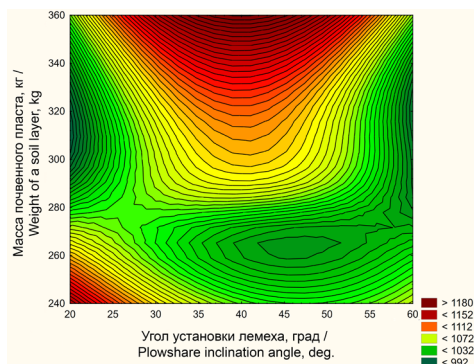
Р и с. 7. Зависимость силы подпора пласта от высоты подъема пласта x_2 и от массы почвенно-клубненосного пласта x_3

F i g. 7. Dependence of the back pressure of a soil layer on the height of the formation x_2 and on the mass of the soil-tuberous layer x_3



Р и с. 8. Зависимость силы подпора пласта от угла установки лемеха x_1 и массы почвенно-клубненосного пласта x_3

F i g. 8. Dependence of the back pressure of a soil layer on the plowshare installation angle x_1 and the mass of the soil-tuberous layer x_3



Из анализа графиков отклика (рис. 8) видно, что экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Оптимальное значение силы подпора пласта составляет $P_{opt} = 1\,002,12$ Н и достигается при значениях факторов $x_1 = 0,044$ (угол установки лемеха $\alpha = 39,21^\circ$), $x_3 = 0,264$ (почвенно-клубненосная масса $m = 286,8$ кг) и $x_2 = 0$ (высота подъема пласта $h = 0,3$ м).

3. Если в качестве постоянного фактора принять почвенно-клубненосную массу $x_3 = 0$ ($m = 300$ кг), то уравнение регрессии (10), с учетом постоянного фактора, запишется в виде

$$P = 1\,003,325 + 0,663x_1 + 0,64x_2 - 30,072x_1^2 + 51,912x_2^2 - 10,967x_1x_2. \quad (13)$$

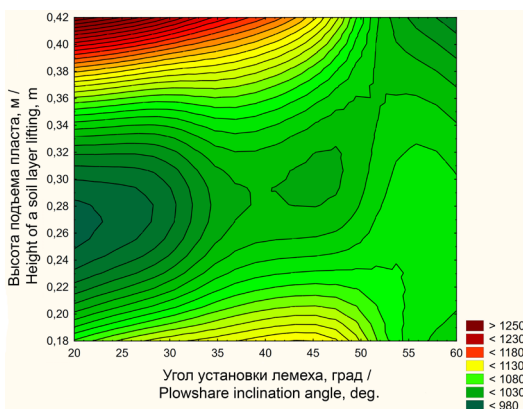
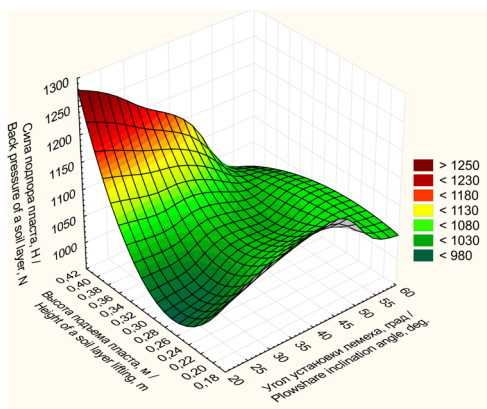
Из анализа графиков отклика (рис. 9) видно, что экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Оптимальное значение силы подпора пласта составляет $P_{opt} = 1\,003,33$ Н и достигается при $x_1 = 0,012$ (угол установки лемеха $40,22^\circ$), $x_2 = -0,005$ (высота подъема пласта $0,299$ м) и $x_3 = 0$ (почвенно-клубненосная масса 300 кг).

Полученные данные полнофакторного исследования подтверждают,

что минимальная сила сгруживания $P_{min} = 1\,001,96$ Н лемеха достигается при угле установки лемеха $\alpha = 40^\circ$ и высоте подъема пласта $h = 0,3$ м. При этом длина лемеха $L = const$.

Обсуждение и заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований можно выбрать рациональный угол наклона лемеха, при котором будут обеспечены минимальные развал пласта на лемехе и сгруживание с учетом типа почвы в зависимости от коэффициента трения почвенного пласта о лемех. Это позволит снизить потери урожая. Предложенные агрегат и способ уборки картофеля минимизируют повреждение клубней и защищают почву от ветровой эрозии. Установленная накопительная емкость в конце агрегата исключает многоразовый проезд транспортной техники по полю и способствует уменьшению уплотнения почвы и снижению ветровой эрозии почвы. Рыхлительные лапы проводят безотвальную обработку почвы, что хорошо предотвращает эрозию. Одна лапа, установленная глубже других, создает противоэрозионную преграду и позволяет сохранить стерни и пожнивные остатки на поверхности поля.



Р и с. 9. Зависимость силы подпора пласта от угла установки лемеха x_1 и высоты подъема пласта x_2
 Fig. 9. Dependence of the back of a soil layer pressure on the plowshare installation angle x_1 and the height of a soil layer lifting x_2

Рациональные значения угла наклона лемеха, при котором будут обеспечены минимальные развал пласта на лемехе и сгруживание, колеблются в зависимости от типа почв в следующих пределах:

- для супесчаных (при коэффициенте трения 0,30–0,35) от 35 до 37°;
- для суглинистых (при коэффициенте трения 0,35–0,50) от 32 до 35°;
- для глины (при коэффициенте трения 0,50–0,58) от 30 до 32°.

При предложенном способе уборки картофеля по оптимальному значению угла наклона лемеха можно определить максимальную высоту подъема пласта почвы и задать рациональную глубину

погружения лапы-рыхлителя и удельное сопротивление почвы.

В дальнейшем для повышения эффективности сгруживания лемеха можно разработать систему автоматического контроля режимных и технологических параметров (угла установки и высоты подъема почвенного пласта лемехом) в зависимости от массы сгруженного почвенно-клубненоносного пласта и типа почв.

Данное исследование является перспективным направлением, поскольку позволяет не только снизить потери урожая и эрозию почвы, но и сократить уплотняющее воздействие транспортно-технологических машин на почву при уборке картофеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин / И. А. Успенский [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 2. С. 27–31. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
2. Starovoitova O. A., Starovoitov V. I., Manokhina A. A. The Study of Physical and Mechanical Parameters of the Soil in the Cultivation of Tubers [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1172. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012083>
3. Джаббаров Н. И., Захаров А. М., Зыков А. В. Метод определения показателей оценки эффективности обработки картофеля аэродинамическим способом // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 77–90. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.077-090>
4. Гаджиев П. И., Рамазанова Г. Г., Манасенков К. А. Повышение эффективности обработки почвы для комбайновой уборки картофеля // Наука в центральной России. 2020. № 4. С. 33–40. doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-4-33-40>
5. Обоснование параметров комкоразрушающего битерного барабана машины для предпосадочной подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля / П. И. Гаджиев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 8. С. 15–18. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-8-15-18>
6. Результаты лабораторных исследований просеваемости почвы пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей и регулируемым углом наклона полотна / А. С. Дорохов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 380–402. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.380-402>
7. Способ уборки картофеля и агрегат для ее осуществления : патент 1720551 СССР / Гаджиев П. И. [и др.]. № 4774881 ; заявл. 29.12.1989 ; опубл. 23.03.1992. 9 с. URL: <https://findpatent.ru/patent/172/1720551.html> (дата обращения: 15.01.2022).
8. Исследование крошения почвы при ее предпосадочной подготовке к последующей комбайновой уборке картофеля / П. И. Гаджиев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 4. С. 20–23. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-20-23>
9. Comparative Study of the Force Action of Harvester Work Tools on Potato Tubers / A. Siberev [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2019. Issue 3. P. 85–90. doi: <https://doi.org/10.17221/96/2018-RAE>
10. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M. R. Aerodynamic Properties of Potato Tubers to Airflow Separation from Stones and Clods // International Journal of Vegetable Science. 2019. Vol. 25, Issue 1. P. 87–94. doi: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920>

11. Study of Soil Separation at a Potato Chain with a Cross Rotating Agitator [Электронный ресурс] / М. Y. Kostenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (17–18 October 2019). Vol. 422. Voronezh, 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012032>
12. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers / М. К. Edrriis [et al.] // International Journal of Agricultural & Biological Engineering. 2020. Vol. 13, Issue 2. P. 163–167. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.4818>
13. Validating the Parameters of the Rotary Device for Potato Haulm Removal / N. V. Byshov [et al.] // Bioscience Biotechnology Research Communications. 2019. Vol. 12, Issue 5. P. 312–322. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41357405> (дата обращения: 15.01.2022).
14. Ковалев И. В. Ковалева Н. О. Эколого-функциональная роль почв в развитии цивилизации // История и современность. 2009. № 1. С. 93–114. URL: <https://clck.ru/gffZo> (дата обращения: 15.01.2022).
15. Research of Constructive and Regulatory Parameters of the Assembly Working Parts for Potato Harvesting Machines / S. M. Hrushetsky [et al.] // Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 101–110.
16. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И. А. Успенский [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1. С. 262–269. URL: <https://clck.ru/gfacw> (дата обращения: 15.01.2022).
17. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology / Z. Wei [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2019. Vol. 12, Issue 5. P. 71–80. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (дата обращения: 15.01.2022).
18. Features of Applying Biological Preparations in the Technology of Potato Growing on Gray Forest Soils / D. V. Vinogradov [et al.] // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7, Issue 4. P. 242–246. URL: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/23752> (дата обращения: 15.01.2022).
19. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas / J. G. Zhou [et al.] // INMATEH Agricultural Engineering. 2021. Vol. 64, Issue 2. P. 151–158. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Improving the Working Bodies of the Harvesting Machines by Means of the Use of Composite Materials [Электронный ресурс] / N. Zhanov [et al.] // BIO Web of Conferences. 2020. Vol. 17. URL: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7400387> (дата обращения: 15.01.2022).

Поступила 20.01.2022; одобрена после рецензирования 18.02.2022; принята к публикации 03.03.2022

Об авторах:

Гаджиев Парвиз Имранович, декан факультета электроэнергетики и технического сервиса Российского государственного аграрного заочного университета (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: [DNC-7890-2022](https://orcid.org/0000-0001-5643-4930), pgadjiev@yandex.ru

Шестакова Елена Владимировна, врио ректора Российского государственного аграрного заочного университета (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5643-4930>, missislysik@mail.ru

Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна, доцент кафедры природообустройства и водопользования Российского государственного аграрного заочного университета (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: [CPQ-5874-2022](https://orcid.org/0000-0003-2758-9479), Scopus ID: [56072031000](https://orcid.org/0000-0003-2758-9479), gulbike@yandex.ru



Заявленный вклад авторов:

П. И. Гаджиев – научное руководство, постановка задачи исследования.

Е. В. Шестакова – литературный и патентный анализ данных, формулирование основной концепции исследования.

Г. Г. Рамазанова – разработка математической зависимости, критический анализ полученных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Creating an Integrated System of Potato Harvesters and Transport Vehicles. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021.(2):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>

2. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A. The Study of Physical and Mechanical Parameters of the Soil in the Cultivation of Tubers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1172. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012083>

3. Dzhabborov N.I., Zakharov A.M., Zykov A.V. Method to Determine the Efficiency Assessment Indicators of Potato Treatment by the Aerodynamic Method. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(1):77–90. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.077-090>

4. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Manaenkov K.A. Improving the Efficiency of Tilling the Soil for Combine Harvesting Potatoes. *Science in the Central Russia*. 2020;(4):33–40. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-4-33-40>

5. Gadzhiev P.I., Shikalov M.S., Ramazanova G.G., Alekseev A.I. Substantiation of the Parameters of a Lump Crushing Beater Drum of a Machine for Preplanting Soil Preparation for Potato Combine Harvesting. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019.(8):15–18. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-8-15-18>

6. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Results of Laboratory Studies of Soil Sifting in a Rod Elevator with Asymmetric Arrangement of Web Agitators and Adjustable Elevator Apron Angle. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):380–402. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.380-402>

7. Gadzhiev P.I., Akhmedov I.I., Sorokin A.A., et al. [Potato Harvesting Method and Machine for Its Implementation]. Patent 1,720,551 USSR. 1992 March 23. 9 p. Available at: <https://findpatent.ru/patent/172/1720551.html> (accessed 15.01.2022). (In Russ.)

8. Gadzhiev P.I., Shikalov M.S., Ramazanova G.G., Alekseev A.I. The Study of Soil Crumbling during Its Preplant Preparation for the Subsequent Combine Harvesting of Potatoes. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(4):20–23. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-20-23>

9. Sibirev A., Aksenov A., Dorokhov A., Ponomarev A. Comparative Study of the Force Action of Harvester Work Tools on Potato Tubers. *Research in Agricultural Engineering*. 2019;(3):85–90. doi: <https://doi.org/10.17221/96/2018-RAE>

10. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M.R. Aerodynamic Properties of Potato Tubers to Airflow Separation from Stones and Clods. *International Journal of Vegetable Science*. 2019;25(1):87–94. doi: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920>

11. Kostenko M.Y., Ruzimurodov A.A., Byshov D.N., et al. Study of Soil Separation at a Potato Chain with a Cross Rotating Agitator. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (17–18 October 2019). Vol. 422. Voronezh; 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012032>

12. Edris M.K., Al-Gaadi K.A., Hassaballa A.A., et al. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*. 2020;13(2):163–167. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.4818>

13. Byshov N.V., Borychev S.N., Abramov Yu.N., et al. Validating the Parameters of the Rotary Device for Potato Haulm Removal. *Bioscience Biotechnology Research Communications*. 2019;12(5):312–322. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41357405> (accessed 15.01.2022).
14. Kovalev I.V. Kovaleva N.O. [The Ecological and Functional Role of Soils in the Development of Civilization]. *Istoriya i sovremennost*. 2009;(1):93–114. Available at: <https://clck.ru/gffZo> (accessed 15.01.2022). (In Russ.)
15. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., et al. Research of Constructive and Regulatory Parameters of the Assembly Working Parts for Potato Harvesting Machines. *Agricultural Engineering*. 2019;59(3):101–110.
16. Uspenskiy I.A., Rymbalovich G.K., Kostenko M.U., Beznosyuk R.V. Assessment of Prospective Technological Schemes Potato Harvester. *News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2018;(1):262–269. Available at: <https://clck.ru/gfacw> (accessed 15.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Wei Z., Li H., Mao Y., et al. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019;12(5):71–80. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (accessed 15.01.2022).
18. Vinogradov D.V., Terekhina O.N., Byshov N.V., et al. Features of Applying Biological Preparations in the Technology of Potato Growing on Gray Forest Soils. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018;7(4):242–246. Available at: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/23752> (accessed 15.01.2022).
19. Zhou J.G., Yang Sh.M., Li M.Q., et al. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2021;64(2):151–158. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Zhanov N., Byshov N., Kostenko N., et al. Improving the Working Bodies of the Harvesting Machines by Means of the Use of Composite Materials. *BIO Web of Conferences*. 2020;17. Available at: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7400387> (accessed 15.01.2022).

Submitted 20.01.2022; approved after reviewing 18.02.2022; accepted for publication 03.03.2022

About the authors:

Parviz I. Gadzhiev, Dean of the Faculty of Electric Power Engineering and Technical Services, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru

Elena V. Shestakova, Acting Rector, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), Cand.Sci. (Agric.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5643-4930>, missislysik@mail.ru

Gyulbike G. Ramazanova, Associate Professor of the Chair of Environmental Engineering and Water Management, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: CPQ-5874-2022, Scopus ID: 56072031000, gulbike@yandex.ru

Contribution of the authors:

P. I. Gadzhiev – scientific guidance, formulation of the research task.

E. V. Shestakova – literature and patent data analysis, formulation of the main research concept.

G. G. Ramazanova – development of mathematical dependence, critical analysis of the obtained results.

All authors have read and approved the final manuscript.