Оригинальное исследование

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-631713 EDN: CNTXOL

Особенности взаимодействия клубней картофеля с рабочими органами картофелеуборочных машин

Н.Г. Байбобоев, Ш.А. Тоштиллаев, Ж.У. Умирзоков

Наманганский инженерно-строительный институт, Наманган, Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для успешного отделения клубней картофеля от почвы необходимо учитывать взаимодействие этих клубней с рабочими органами картофелеуборочных машин. Важно определить силы, действующие на клубень в грядке, а также параметры, которые могут способствовать повреждению клубней во время механизированной уборки. Необходимо выявить критерии повреждаемости и оптимизировать рабочие процессы для уменьшения потерь клубней из-за недостаточной сепарации почвенной массы и других факторов.

Цель работы — расчёт напряжений в клубне от воздействия рабочих органов и теоретическое определение контактного давления, действующего на клубень со стороны почвы из условия повреждаемости клубней картофеля.

Методы. Применяется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет провести детальный анализ распределения напряжений при контактах между клубнем и рабочими органами.

Результаты. Теоретически изучены возможности применения контактной задачи Герца к расчёту допустимых параметров нагрузки на клубень и определены значения допускаемого контактного давления при металлическом рабочем органе $q_к = 0{,}034$ МПа, при эластическом $q_к = 0{,}15$ МПа. При этом повреждения клубней картофеля оборудованным эластичным рабочим органом значительно снижаются.

Заключение. Контактные нагружения, возникающие в клубнях во время взаимодействия с рабочими металлическими органами, превосходят допустимые напряжения на клубень, что вызывает повреждения клубней. Для устранения этого недостатка поверхность металлических рабочих органов следует выполнять эластичной.

Ключевые слова: картофелеуборочная машина; клубень; контактное напряжение; давление; упругость; нагрузка; картофельная грядка; почва.

Как цитировать:
Байбобоев Н.Г., Тоштиллаев Ш.А., Умирзоков Ж.У. Особенности взаимодействия клубней картофеля с рабочими органами картофелеуборочных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 1. С. 68–73. DOI: 10.17816/0321-4443-631713 EDN: CNTXOL

Рукопись получена: 06.05.2024 **Рукопись одобрена:** 15.03.2025 **Опубликована online:** 17.03.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Original Study Article
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-631713 EDN: CNTXOL

Features of the interaction of potato tubers with the working parts of potato harvesters

Nabijon G. Bayboboev, Shokhrukh A. Toshtillaev, Zhurabek U. Umirzokov

Namangan Engineering-Construction Institute, Namangan, Uzbekistan

ABSTRACT

BACKGROUND: For the successful separation of potato tubers from the soil, it is necessary to consider the interaction of these tubers with the working bodies of potato harvesters. It is important to determine the forces acting on the tuber in the bed, as well as the parameters that may contribute to the damage of the tubers during mechanized harvesting. It is necessary to identify the damage criteria and to optimize work processes for reducing the loss of tubers due to insufficient separation of soil mass and other factors.

AIM: Calculation of the tuber stress caused by the influence of the working parts and theoretical determination of the contact pressure acting on the tuber from the soil considering the condition of damageability of potato tubers.

METHODS: The finite element method (FEM), which allows performing a detailed analysis of stress distribution at contacts between the tubers and working bodies, is used.

RESULTS: The possibilities of applying the Hertz contact problem to the calculation of permissible parameters of load on a tuber were theoretically studied and the values of the permissible contact pressure were determined: $q_к = 0.034$ MPa for a metal working body, $q_к = 0.15$ MPa for an elastic one. At the same time, damage to potato tubers equipped caused by an elastic working body is significantly reduced.

CONCLUSION: Contact loads that occur in tubers during interaction with metal working parts exceed the permissible stresses on the tuber, which causes damage to the tubers. To eliminate this drawback, the surface of metal working parts should be made elastic.

Keywords: potato harvester; tuber; contact stress; pressure; elasticity; load; potato bed; soil.

To cite this article:
Bayboboev NG, Toshtillaev ShA., Umirzokov ZhU. Features of the interaction of potato tubers with the working parts of potato harvesters. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2025;92(1):68–73. DOI: 10.17816/0321-4443-631713213 EDN: CNTXOL

Received: 06.05.2024 **Accepted:** 15.03.2025 **Published online:** 17.03.2025

moscow polytech
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2025
ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ряда авторов [1-6] показали, что типичные диаграммы «усилие-деформация» и «напряжение-деформация» для клубня картофеля имеют небольшой прямолинейный участок, который позволяет при определении контактных напряжений в пределах упругости клубней картофеля использовать решение контактной задачи Герца.

Возможность применения контактной задачи Герца к определению допустимых параметров нагружения клубня более подробно проанализирована в трудах [7–9]. Авторы этих считают, что решение Герца целесообразно использовать для анализа повреждаемости клубней картофеля.

Поэтому взаимодействия комкоразрушающих рабочих органов с клубнем картофеля, находящимся в верхней части грядки, могут привести к контактным задачам теории упругости (например, взаимодействие соприкасающихся шара с цилиндром прижатых друг к другу). По законам теории упругости можно определить контактное напряжение в клубнях картофеля в зависимости от действия рабочих органов картофелеуборочных машин.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При расчете оптимальных параметров комкоразрушающих копирующих катков, влияющих на повреждение клубней картофеля, кроме диаметра, ширина катка и нагрузки на него, следует учитывать твердость и упругость клубней, давление испытываемого ими при разрушении грядки катками.

В этом направлении проведено мало теоретических исследований, а параметры рабочего органа приняты на основе анализа экспериментальных данных.

Имеющиеся данные по усилиям разрушения почвенных комков и повреждениям клубней картофеля получены, в основном, путем сжатия их между плоскостями и при ударе. Однако, для описания процесса разрушения почвенных комков и клубненосном пласте и обоснования рациональных параметров катков этих данных недостаточно, так как разрушение пласта производится катками без непосредственного контакта с клубнями картофеля.

В связи с этим рассмотрим напряженное состояние клубней картофеля, находящихся в грядке под воздействием катка.

Для анализа распределения давления на клубень были приняты следующие допущения:

1. форма клубня шарообразная;
2. на клубень действует вертикальная сила;
3. в плоскости, проходящей через середину клубня перпендикулярно линии действия нагрузки, давления можно принять равными нулю, так как нагрузка передаётся только в одном направлении, а давление по поверхности клубня изменяется по закону косинуса:

$$q = q_{\max} \cdot \cos\ \theta \qquad (1)$$

где $q_{\max}$ — максимальное давление, действующее от почвы на клубень по оси Y; q — давление на клубень в произвольной точке; θ — угол между направлением давления и произвольной точке клубня и осью Y.

Распределение давления по закону косинуса наиболее вероятно и широко применяется в подобных случаях нагружения тел.

В соответствии с этим на рис. 1 представлена эпюра давлений, действующих на клубень находящийся в грядке под нагрузкой.

Рассмотрим два случая распределения давлений по поверхности клубня:

1. по закону косинуса (см. рис. 2, *a*);
2. равномерное (см. рис. 2, *b*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

В первом случае для определения суммарного вертикального усилия P спроектируем все давления,

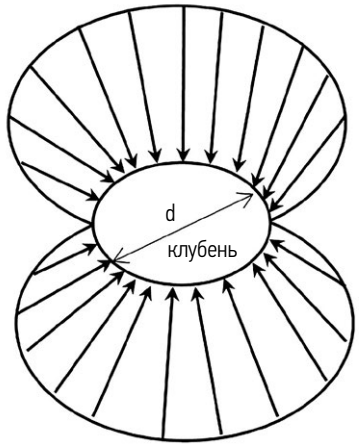

Рис. 1. Эпюра давлений на клубень, находящийся в грядке.
Fig. 1. Diagram of pressure distribution on a tuber located in a bed.

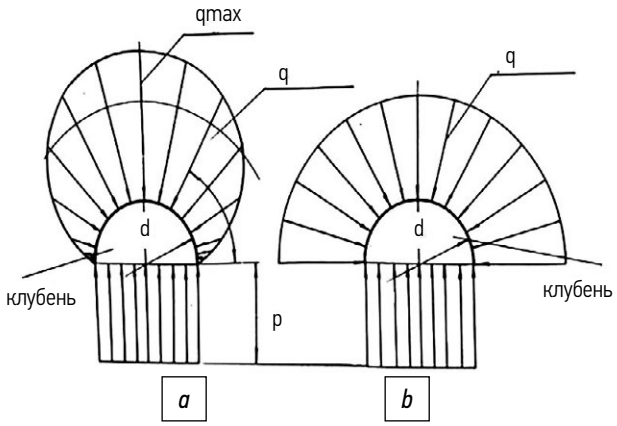

Рис. 2. Эпюры нагружения клубня в грядке: *a* — по закону косинуса; *b* — равномерное.
Fig. 2. Diagrams of load distribution on a tuber in a ridge: *a* — by the law of cosine; *b* — uniformly.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-631713

действующие на поверхность клубня на вертикаль. Примем клубень за шар диаметром d и выделим на его поверхности элементарную площадку S в виде кольца, ограниченную углом $d\theta$ и расположенную под углом θ к вертикали. На этой площадке действует давление q.

Очевидно, что площадь S выделенного элементарного кольца определяется произведением:

$$S = 2\pi\frac{d^2}{4}\sin\theta\cdot d\theta, \quad (2)$$

а элементарное усилие в проекции на вертикаль

$$dP = S\cdot q\cdot\cos\ \theta. \quad (3)$$

С учётом выражения (1) вертикальное усилие P, действующее на клубень, определится выражением:

$$P = \frac{\pi d^2}{2}q_{\max}\int_0^{\pi/2}\cos^2\theta\sin\theta\cdot d\theta. \quad (4)$$

По выражению (4) можно определить максимальную нагрузку $P_{\max}$ на клубень, находящийся в почве картофельной грядки. Если принять по данным Н.И. Верешагина [3] допустимое нормальное напряжение на клубень $q_{доп}$ = 0,8 МПа, то по выражению (4) допустимая нагрузка на крупный клубень (диаметром 80 мм) в почве $P_{\max}$ = 2,68 кН.

Широко принято, что допустимая нагрузка на клубень, находящийся на плоскости с резиновым покрытием, равна 200 Н [1, 3, 10]. Следовательно, при сжатии клубня в почве допустимая нагрузка может быть принята в 13,4 раза больше.

Из выражения (4) также следует, что:

$$q_{\max} = 1,5\cdot q_{ср} \quad (5)$$

где $q_{ср} = \frac{4P}{\pi\cdot d^2}$ — среднее значение давления.

С другой стороны, в диаметральном (среднем) сечении клубня суммарное вертикальное усилие равно:

$$P = \frac{p\pi d^2}{4}, \quad (6)$$

где p — давление в диаметральном сечении клубня, равное $q_{ср}$.

Из выражений (4) и (5) получим: $p = \frac{2}{3}q_{\max}$

Во втором случае (рис. 2), когда q = const, условие равновесия будет

$$P = \int_0^{\pi/2}\frac{\pi d^2}{2}q\cdot\cos^2\theta\cdot\sin\theta\cdot d\theta.$$

После интегрирования и подстановки пределов интегрирования

$$P = q\cdot\frac{\pi d^2}{2} \quad (7)$$

С учетом (6) имеем:

$$P = q = \text{const}.$$

Условие неповреждаемости клубня, находящегося в грядке, можно записать в виде:

$$q_{\max} \le q_{доп} \quad (8)$$

где $q_{доп}$ — допустимое давление на клубень (по Н.И. Верешагину 0,8 МПа (8 кг/см^2)).

С учетом условия (8) допустимая вертикальная сила на клубень в грядке под действием нагрузки от катка:

- для 1-го случая (см. рис. 2, *a*) $P_{1доп} = q_{доп}\cdot\frac{\pi d^2}{6}$;
- для 2-го случая (см. рис. 2, *b*) $P_{2доп} = q_{доп}\cdot\frac{\pi d^2}{4}$.

По данным испытаний твердость почвы на картофельной грядке в зависимости от глубины доходит до 2.0–2.5 МПа, а величина допустимого нормального напряжения на клубень равна 0,8 МПа. Следовательно, при невыполнении неравенства (8) клубни могут повреждаться, не вдавливаясь в почву, т.к. давления 0.8 вполне могут быть обеспечены сопротивлением почвы.

При перекатывании катка картофелеуборочной машины по грядке возможно контактирование поверхности катка с клубнями, находящимися в верхней части грядки. В этом случае максимальная сила P от реакции почвы на клубень, определяемая выражением (4) с учетом твердости почвы картофельной грядки, вызывает повреждения комкоразрушающего катка с металлической поверхностью.

На рис. 3 показаны эпюра давлений, действующих со стороны почвы на клубень снизу, и эпюра контактных давлений, возникающих от действия на клубень комкоразрушающего катка радиусом R.

Как показано выше, равнодействующая эпюры контактных давлений от действия катка равна $P = \frac{\pi d^2\cdot q_{\max}}{6}$. Максимальное контактное давление (напряжение) $q_к$ в МПа от действия катка на клубень может быть определено по формуле, учитывающей взаимодействие шара с цилиндром [10]:

$$q_к = \sqrt[3]{\frac{6P(R+d)}{\pi^3R^2d^2\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}\right)+\left(\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}} \quad (9)$$

или с учетом того, что R значительно больше d,

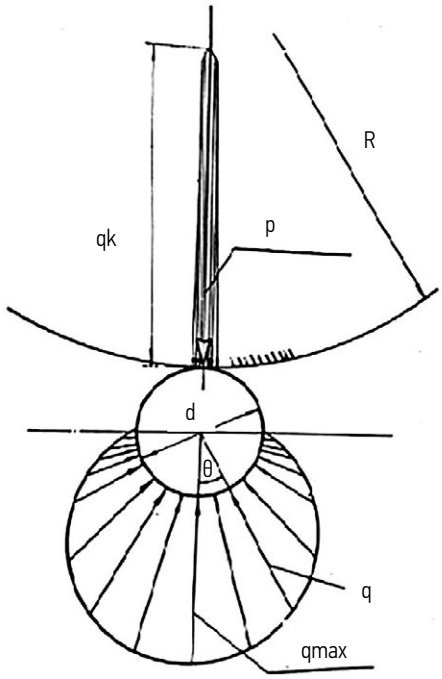

Рис. 3. Эпюры нагружения клубня, находящегося в грядке при взаимодействии с рабочим органом.
Fig. 3. Diagrams of load distribution on a tuber located in a bed when interacting with the working body.

$$q_к = 0{,}918 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{d^2\left(K_1 + K_2\right)^2}}, \qquad (10)$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты, определяемые по формулам: $K_1 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}$, $K_1 = \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$; E_1 — модуль упругости клубня, $E_1 = 5 \cdot 10^6$ Н/м^2; μ_1 — коэффициент Пуассона для клубней, $\mu_1 = 0{,}4$; E_2 — модуль упругости материала катка; μ_2 — коэффициент Пуассона материала катка.

Для металлического (стального) катка $E_2 = 21 \cdot 10^{10}$ Н/м^2, $\mu_2 = 0{,}25$ соответственно величины $K_1 = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ м^2/Н; $K_2 = 4{,}7 \cdot 10^{-12}$ м^2/Н.

Следовательно, величина K_1 значительно больше, чем K_2. Поэтому в случае металлического катка последней можно пренебречь.

Так как усилие, действующее на клубень со стороны почвы, равно усилию, действующему сверху — со стороны катка, то подставив в формулу (10) значение силы P получим формулу для определения значения контактного давления:

$$q_к = 0{,}918 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot q_{\max}}{6K_1^2}}. \qquad (11)$$

Очевидно, что величина $q_к$ не должна быть больше допустимого контактного напряжения в клубне, т.е. $q_к < 0.8$ МПа. Подставив это значение в выражение (11) получим $q_{\max} = 0.034$ МПа.

Так как твердость почвы в грядке значительно больше и даже на глубине 5 см составляет 0,3–0,5 МПа, то контактные напряжения в клубне от действия металлического катка будут больше допускаемых, и клубни будут повреждаться. Для устранения повреждений клубней каток необходимо выполнять эластичным, а не стальным и тем более не следует делать поверхность катка из стальных прутков.

Расчёт напряжений в клубне от действия эластичного катка следует проводить по формуле (10) с учетом величины K_2, определяемой характеристиками упругости E_2, μ_2 поверхности эластичного катка.

При выполнении поверхности катка эластичной, например, из прорезиненной транспортерной ленты с резиновой обкладкой, можно принять величину $K_2 \approx K_1 = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ м^2/Н;. тогда выражение (10) с учетом (4) примет вид:

$$q_к = 0{,}918 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{4d^2K_2^2}} = 0{,}918 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot d^2 \cdot q_{\max}}{4 \cdot 6 \cdot d^2 \cdot K_2^2}},$$

откуда

$$q_к = 0{,}466 \cdot \sqrt[3]{\frac{q_{\max}}{K_2^2}},\ q_к^3 = \frac{0{,}1 \cdot q_{\max}}{K_2^2},\ q_{\max} = 10 \cdot K_2^2 \cdot q_к^3.$$

Очевидно, что величину $q_к$ следует принимать не более 0,8 МПа ($0.8 \cdot 10^6$ Н/м^2).

$$q_{\max} = 0{,}15 \cdot 10 \text{ Н/м}^2.$$

Таким образом, если металлический каток при $q_{\max} = 0.8$ МПа допускает $q_к = 0.034$ МПа, то эластичный каток из прорезиненной ленты допускает $q_к = 0.15$ МПа, что в 4,4 раза больше. При этом повреждения клубней, убираемых комбайном, оборудованным эластичным катком значительно, снижаются.

ВЫВОДЫ

1. Допустимая нагрузка на клубень, находящийся в почве картофельной грядки в 13,4 раза превосходит допустимую нагрузку на клубень, расположенный между плоскостями, и обычно принимаемую равной 200 Н.
2. Контактные напряжения, возникающие в клубнях, находящихся в верхней части картофельной грядки, от взаимодействия их с металлическими комкоразрушающими катками превосходят допустимые напряжения, что вызывает повреждения клубней. Для устранения этого недостатка поверхность катков следует выполнять эластичной.
3. Контактное напряжение, возникающее в клубне от действия комкоразрушающего катка, не зависит от диаметра клубня.
4. При расчете движения катка с образованием колеи необходимо учитывать действующие на него силы трения, так как они существенно влияют на тяговое сопротивление катка и на его нагрузку.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Ш.А. Тоштиллаев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Ж.У. Умирзоков — редактирование текста рукописи, создание изображений; Н.Г. Байбобоев — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. Sh.A. Toshtillaev — search for publications, writing the text of the manuscript; J.U. Umirzokov — editing the text of the manuscript, creating images; N.G. Bayboboev — expert opinion, approval of the final version. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Disclosure of interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding sources. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Bulgakov V, Nikolaenko S, Adamchuk V, Olt J. Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research.* 2018;16(1):52–63. doi: 10.15159/AR.18.037

2. Sorokin AA. *Theory and calculation of potato harvesting machines.* M.: VIM; 2006. (In Russ.) doi: 10.1234/abcd.efgh

3. Vereshagin NI. Modern machine technologies for potato production. *Rural technology and equipment.* 2004;(8):16–19. (In Russ.)

4. Bayboboev NG, Muxamedov JM, Goyipov UG, Akbarov SB. Design of small potato diggers. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022;1010(1). doi: 10.1088/1755-1315/1010/1/012080

5. Bayboboev NG, Rembalovich GK, Murodov RH, et al. Justification of the technological scheme of the separating working body of potato digger. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022;1112(1). doi: 10.1088/1755-1315/1112/1/012082

6. Byshov NV, Borychev SN, Uspensky IA. Reducing energy costs in agricultural production (using the example of potatoes). *Scientific journal of KubSAU.* 2016;(6):375–398. (In Russ.)

7. Sukhanova MV, Zabrodin VP. Damage to seeds by the working bodies of continuous machines. *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.* 2019;8(5):373–380. (In Russ.) doi: 10.22314/2073-7599-2019-13-5-63-68

8. Kolchin NN. *To analyze damage to root crops and root crops in the post-harvest cycle and develop recommendations for their reduction.* Moscow: VISKHOM; 2002. (In Russ.)

9. Bayboboev NG, Goyipov UG, Tursunov AA, Akbarov ShB. Calculation of the chain drum with elastic fingers of potato harvesting machines. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021;845(1). doi: 10.1088/1755-1315/845/1/012133

10. Murodov RKh, Nishonov KhKh, Mamadaliev AM. Influence of elevator parameters with centrifugal separation on soil separation from potato tubers. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022;1112(1). (In Russ.) doi: 10.1088/1755-1315/1112/1/012072

ОБ АВТОРАХ

*** Тоштиллаев Шохрух Азаматович,**
докторант кафедры «Механизация сельского хозяйства»;
адрес: Республика Узбекистан, 160100, Наманган,
ул. Ислама Каримова, д. 12;
ORCID: 0009-0004-6711-5715;
eLibrary SPIN: 5317-2723;
e-mail: wohruhkhan@gmail.com

Байбобоев Набижон Гуломович,
д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры «Механизация сельского хозяйства»;
ORCID: 0000-0001-8681-0052;
eLibrary SPIN: 8513-5030;
e-mail: ngbayboboev@gmail.com

Умирзоков Журабек Умирзок угли,
докторант кафедры «Механизация сельского хозяйства»;
ORCID: 0009-0008-5652-9065;
e-mail: jurabek97u@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Shokhrukh A.Toshtillayev,**
Postgraduate of the Agricultural Mechanization Department;
address: 12 Islam Karimov st, Namangan,
Republic of Uzbekistan, 160100;
ORCID: 0009-0004-6711-5715;
eLibrary SPIN: 5317-2723;
e-mail: wohruhkhan@gmail.com

Nabijon G. Bayboboev,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Professor of the Agricultural Mechanization Department;
ORCID: 0000-0001-8681-0052;
eLibrary SPIN: 8513-5030;
e-mail: ngbayboboev@gmail.com

Zhurabek U.u. Umirzokov,
Postgraduate of the Agricultural Mechanization Department;
ORCID: 0009-0008-5652-9065;
e-mail: jurabek97u@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author