

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
УНИВЕРСАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВИТАМИННО-КОРМОВЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ САПРОПЕЛЯ****THE RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTS OF MULTIFUNCTIONAL CRUSHING MIXER  
FOR PRODUCTION OF SAPROPEL-BASED VITAMIN FEED SUPPLEMENT**

**Ключевые слова:** сапропель, витаминно-кормовая добавка, шнек, лопатки, сапропелезерновая смесь, многофункциональный смеситель-измельчитель.

Дан анализ результатов экспериментального исследования работы универсального смесителя-измельчителя для производства витаминно-кормовых добавок сельскохозяйственным животным. Целесообразно, на наш взгляд, использовать в качестве основного компонента витаминно-кормовой добавки местный ресурс органического сырья – сапропель, богатый витаминами и минеральными веществами. Наиболее перспективной, в целях повышения витаминного питания животных, является технология проращивания зерна, в этом случае происходит обогащение корма каротином и витамином С. Кроме того, это приближает рационы зимнего кормления животных к летним. Недостаточное оснащение сельскохозяйственных предприятий многофункциональными агрегатами, способными выполнять сразу несколько операций технологического процесса, препятствует росту продуктивности выращиваемого поголовья, значительной трудоемкости и увеличению календарных сроков работ. Универсальный смеситель-измельчитель выполняет широкий диапазон задач (дозированная подача зерна, смешивание и измельчение компонентов витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля). На основе проведенного научного анализа доказана целесообразность оснащения универсального смесителя-измельчителя объемным дозатором, с целью обеспечения поточности и равномерности высева семян зерновых на пласт сапропеля. Применяя методы математического моделирования, изучен процесс производства витаминно-кормовой добавки с целью его теоретического обоснования и повышения эффективности. Обоснованы конструктивные и технологические параметры устройства для перемешивания семян ячменя и сапропеля перед проращиванием, после выращивания определены факторы, влияющие на смешивание сапропелерастительной смеси (зеленой массы побегов ячменя и сапропеля, связанных между собой корневой структурой) и измельчение компонентов витаминно-кормовой добавки. Исследованы основные физико-механические, химические, биоэнергетические характеристики витаминно-кормовой добавки и дана оценка питательной ценности этого продукта. Разработана конструктивно-технологическая схема смесителя-измельчителя витаминно-кормовой добавки и про-

ведена проверка его работы, изучено влияние основных факторов на показатели технологического процесса. Экспериментально получены рекомендуемые конструктивные параметры рабочих органов универсального смесителя-измельчителя для получения необходимой однородности продукта скармливания.

**Keywords:** *sapropele, vitamin feed supplement, screw, blades, sapropel-grain mix, multifunctional crushing mixer.*

The paper discusses the results of experimental tests of multifunctional crushing mixer for production of sapropel-based vitamin feed supplement for farm animals. It is appropriate to use local organic resources such as sapropel rich in vitamins and minerals as the main component of vitamin feed supplements. The technology of grain sprouting is a promising one to enrich the vitamin content of feeds as the latter receive additional carotene and vitamin C, thus equalizing winter and summer diets. Agricultural enterprises are not sufficiently equipped with multifunctional devices that are able to perform several operations of the technological chain; this slows the growth of livestock production, requires more labor and extends the production schedule. The multifunctional crushing mixer performs a wide range of operations (grain feed dosing, mixing and chopping the supplement components based on sapropel). The research analysis conducted proves that the multifunctional crushing mixer should be supplied with a volume batcher which makes it possible to provide a continuous and uniform grain seeding onto the sapropel layer. We have studied the process of vitamin feed supplement production by using mathematical modeling methods which helped to define the design and technological parameters of the machinery to mix barley grains and sapropel before the sprouting process as well as those factors that affect sapropel-and-green mass mixing after the sprouting (green mass of barley sprouts and sapropel which are interconnected due to the sprout root system). The main physical, mechanical, chemical and bioenergy processes were taken into account. The design and technological layout of the vitamin feed supplement crushing mixer was developed and tested taking into account the influence of main factors of the operating procedure. The experiments revealed the optimal design and technical parameters of the working tools of the vitamin feed supplement to obtain the required homogeneity of the final product.

**Игнатенков Валерий Геннадьевич**, к.т.н., доцент, зав. каф. «Эксплуатация и ремонт МТП», Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: well\_79@mail.ru.

**Лаппо Евгений Леонидович**, аспирант, Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: evgenij\_lappo@yandex.ru.

**Быченков Дмитрий Михайлович**, магистрант, Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: dimon\_mega@mail.ru.

**Ignatenkov Valeriy Gennadyevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Machinery and Tractor Fleet Operation and Repair, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: well\_79@mail.ru.

**Lappo Yevgeniy Leonidovich**, post-graduate student, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: evgenij\_lappo@yandex.ru.

**Bychenkov Dmitriy Mikhaylovich**, master's degree student, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: dimon\_mega@mail.ru.

### Введение

Рассмотрим процесс смешивания сапропеллево-зерновой смеси с использованием универсального смесителя-измельчителя (рис. 1).

Выделяют следующие пять основных процессов, протекающих при смешивании [1-3]: образование в массе слоя скользящих друг по другу плоскостей – срезающее смешивание; перемещение групп частиц из одного положения в другое – конвективное смешивание; перемена позиции единичными частицами слоя – диффузионное смешивание; рассеяние единичных частиц под влиянием их столкновений или ударов о стенки аппарата – ударное смешивание; деформация и растирание частиц.

В зависимости от типа смесителя и структурно-механических свойств компонентов получает преобладающее значение один или несколько из перечисленных процессов [4, 5].

В случае перемешивания составляющих сапропеля и семян ячменя, сапропелерастительных компонентов витаминно-кормовой добавки доминирующее значение примут процессы рассеяния зерен ячменя и растительных частиц в массе сапропеля, под действием столкновений о стенки устройства и о его рабочие органы (шнек, лопатки), а также будет происходить деформация сапропелевого пласта с разрушением корневой структуры добавки и перетиранием растительных включений [6, 7].

Известно, что полного смешивания можно достигнуть только в идеальной системе. В реальных системах наблюдаются два взаимно противоположных процесса – смесеобразование и сегрегация (обратное разделение смеси на составляющие компоненты). В то же время приготовленная добавка должна быть определенной степени однородности, то есть она должна соответствовать зоотехническим требованиям к продукту скармливания для конкретного вида животных.

Учитывая физико-механические свойства сапропеля и связанной с ним корневой структурой

растительной массы, необходимо выбрать рациональные конструктивные параметры рабочих органов смешивания. Сложность такого выбора состоит и в том, что сапропель обладает адгезионными и абразивными свойствами, которые будут влиять на износостойкость деталей и узлов агрегата. Кроме того, необходимо учитывать требования по минимальной энерго- и металлоемкости, удобной подаче компонентов витаминно-кормовой добавки к рабочим органам.

Одним из основных параметров, влияющих на процесс смесеобразования в смесителе, является частота вращения шнека. Сложность обоснования этого фактора состоит в том, что на валу шнека закреплены лопатки смешивания, и частота их вращения зависит от частоты вращения шнека. При этом количество лопаток смешивания будет влиять как на степень однородности корма, так и на энергозатраты на процесс смесеобразования. Важна и форма лопаток, их установка, это повлияет на эффективность перемешивания компонентов витаминно-кормовой добавки.

Процесс смешивания составляющих витаминно-кормовой добавки, в силу специфических особенностей сапропелерастительной массы, является сложным и малоизученным. Технологические режимы и параметры смесеобразования кормов базируются в основном на экспериментальных исследованиях, полученных на известных смесителях и в заданных условиях.

В нашем случае проведены исследования для обоснования основных параметров рабочих органов смешивания зерен ячменя и сапропеля, компонентов добавки для интенсификации технологического процесса создания кормовой смеси.

Для получения продукта скармливания высокого качества (определенного гранулометрического состава и степени однородности), отвечающего всем предъявляемым зоотехническим требованиям, необходимо универсальное устройство [8, 9].



**Рис. 1. Общий вид установки универсального смесителя-измельчителя**

**Цель** исследований – повышение эффективности производства витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля путем совершенствования конструктивных и технологических параметров универсального смесителя-измельчителя.

**Объекты и методы**

В результате многофакторного регрессионного анализа, выполненного на основании результатов исследований, установлена зависимость однородности сапропелезерновой смеси от факторов:  $b_1$  – частота вращения шнека ( $n_{ш}$ ),  $b_2$  – частота вращения высевающих катушек ( $n_{к}$ ),  $b_3$  – длина шнека ( $l_{ш}$ ). После проведения повторного многофакторного регрессионного анализа было получено уравнение регрессии:

$$\lambda = 56 - b_1 - 16 \cdot b_2 + 7 \cdot b_3 - b_1 \cdot b_2 - b_1 \cdot b_3 + 9 \cdot b_2 \cdot b_3 + 7,5 \cdot b_1^2 + 1,5 \cdot b_2^2 + 5,5 \cdot b_3^2, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – степень однородности сапропелезерновой смеси, %.

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что модель (1) информационно способна, т.к. коэффициент детерминации параметров достаточно велик (R-квадрат равен 90%), полученная модель объясняет 95% изменения  $\lambda$ . Рассматриваемая модель значима, т.к. существует статистически значимое отношение между переменными. Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрицах нет, т.к. статистика Durbin-Watson (DW) больше 0,05.

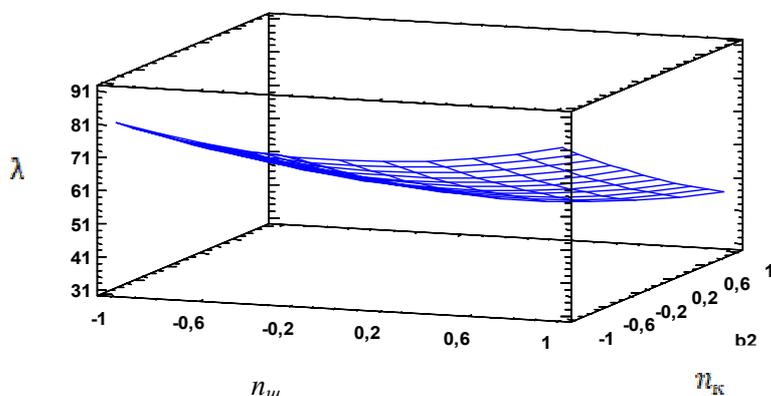
Принимая во внимание значение коэффициентов получаемой математической модели, анализируя поверхность отклика (рис. 2), отмечаем снижение показателя однородности смеси при увеличении частоты оборотов шнека и высевающих катушек. В большей степени на степень однородности сапропеле-зерновой смеси оказывает влияние частота вращения шнека.

Наибольшая степень однородности наблюдается при частоте вращения шнека 150 мин.<sup>-1</sup> и частоте вращения высевающих катушек 60 мин.<sup>-1</sup>.

В результате многофакторного регрессионного анализа, выполненного на основании результатов исследований, установлена зависимость производительности универсального смесителя-измельчителя от факторов:  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ . После проведения повторного многофакторного регрессионного анализа было получено уравнение регрессии:

$$Q = 12,7481 + 3,11873 \cdot b_1 + 1,3366 \cdot b_2 - 5,5065 \cdot b_3 - 1,78214 \cdot b_1 \cdot b_3 - 8,88178E^{-16} \cdot b_2 \cdot b_3 - 0,55755 \cdot b_1^2 - 0,1593 \cdot b_2^2 + 2,75325 \cdot b_3^2, \quad (2)$$

где  $Q$  – производительность универсального смесителя-измельчителя, кг/мин.



**Рис. 2. Зависимость однородности смеси от частоты вращения шнека и высевающих катушек**

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что модель (2) информационно способна, т.к. коэффициент детерминации параметров достаточно велик (R-квадрат равен 99,5%), полученная модель объясняет 98,7% изменения  $Q$ . Рассматриваемая модель значима, т.к. существует статистически значимое отношение между переменными. Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрицах, нет, т.к. статистика Durbin-Watson (DW) больше 0,05.

Принимая во внимание значение коэффициентов получаемой математической модели, анализируя поверхность отклика (рис. 3), отмечаем увеличение показателя производительности универсального смесителя-измельчителя при увеличении частоты оборотов шнека и снижение производительности при увеличении длины шнека. В большей степени на степень однородности сапропелезерновой смеси оказывает влияние частота вращения шнека.

Наибольший показатель производительности универсального смесителя-измельчителя наблюдается при частоте вращения шнека 150 мин.<sup>-1</sup> и длине шнека 2,6 м.

Для оценки затрат энергии установлена зависимость удельных энергозатрат на производство витаминно-кормовой добавки. В результате многофакторного регрессионного анализа, выполненного на основании результатов исследований, установлена зависимость затрат мощности на производство витаминно-кормовой добавки от

факторов:  $b_1, b_2, b_3$ . После проведения повторного многофакторного регрессионного анализа было получено уравнение регрессии:

$$N = 695,861 + 28,188 \cdot b_1 + 32,886 \cdot b_2 + 0,0 \cdot b_3 + 9,396 \cdot b_1 \cdot b_2 + 9,396 \cdot b_1^2 + 9,396 \cdot b_2^2 - 2,30926E^{-13} \cdot b_3^2, \quad (3)$$

где  $N$  – затраты мощности на производство витаминно-кормовой добавки, Вт.

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что модель (3) информационно способна, т.к. коэффициент детерминации параметров достаточно велик (R-квадрат равен 98,9%), полученная модель объясняет 97,7% изменения  $Q$ . Рассматриваемая модель значима, т.к. существует статистически значимое отношение между переменными. Заметной корреляции между опытными значениями, размещенными в матрицах, нет, т.к. статистика Durbin-Watson (DW) больше 0,05.

Принимая во внимание значение коэффициентов получаемой математической модели, анализируя поверхность отклика (рис. 4), отмечаем увеличение затрачиваемой мощности на производство витаминно-кормовой добавки при увеличении частоты оборотов шнека и длины шнека. В большей степени на степень однородности сапропелезерновой смеси оказывает влияние частота вращения шнека.

Наибольший показатель производительности универсального смесителя-измельчителя наблюдается при частоте вращения шнека 150 мин.<sup>-1</sup> и длине шнека 2,6 м.

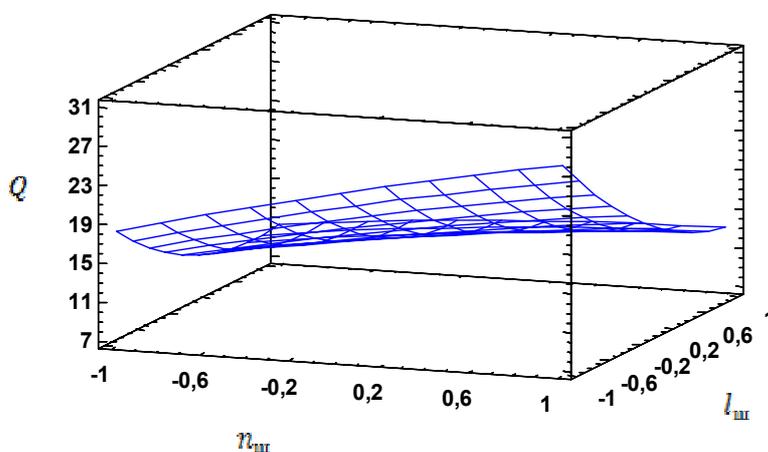


Рис. 3. Зависимость производительности установки от частоты вращения шнека и длины шнека

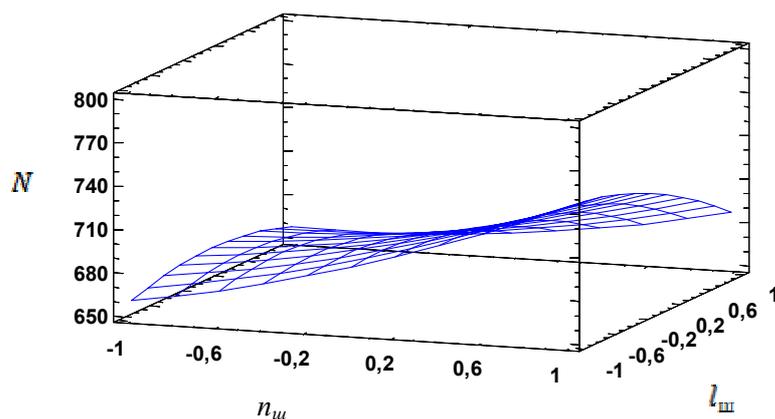


Рис. 4. Зависимость затрачиваемой мощности от частоты вращения шнека и длины шнека

### Вывод

Проведенный анализ математической статистики обработки экспериментов доказывает правильность выбора уровня факторов и их влияние на выходные параметры.

Рациональными конструктивными параметрами универсального смесителя-измельчителя будут: частота вращения высевающих катушек 60 мин.<sup>-1</sup> (из-за согласования скорости ленты транспортера с возможностями приемного бункера и рекомендованной пропорции сапропеля, и зерна – 1:4); длина шнека 2,6 м. (высокая производительность при незначительном времени технологического цикла); частота вращения шнека 150 мин.<sup>-1</sup> (высокая производительность при минимальных энергозатратах).

### Библиографический список

1. Малышев И.Г. Перспективность использования сапропелей в сельском хозяйстве // Химия в сельском хозяйстве. – 1986. – № 2. – С. 8-11.
2. Verstraeten L.M.J., Livens J. New fertilizer materials // Soil Org. Matter Stud. – 1977. – Vol. 1. – P. 66-78.
3. Ляпушкин С.В. Повышение эффективности управления электроприводом автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Томск, 2015.
4. Сеницын Б.Н., Ерохин А.С. Дозаторы непрерывного действия – средства автоматизации процессов дозирования. Обзорная информация. – М., 1982.
5. Согоин А.В., Шапкин В.А. Современная технология получения сапропелевых удобрений из локальных водоемов // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова: науч.-техн. журнал. – М.; Н. Новгород, 2004. – Т. 8. – С. 77-88.

6. Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное использование. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 374 с.

7. Игнатенков В.Г. Повышение эффективности производства витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля путем обоснования конструктивных и технологических параметров смесителя-измельчителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Великие Луки, 2005. – 180 с.

8. Морозов В.В. Технология и комплекс машин для послойной разработки сапропеля на удобрения: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01. – СПб., 1995.

9. Игнатенков В.Г. Повышение эффективности производства витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля путем обоснования конструктивных и технологических параметров смесителя-измельчителя: дис. канд. техн. наук: 05.20.01. – Великие Луки, 2005.

### References

1. Malyshev I.G. Perspektivnost ispolzovaniya sapropely v selskom khozyaystve // Khimiya v selskom khozyaystve. – 1986. – № 2. – S. 8-11.
2. Verstraeten L.M.J., Livens J. New fertilizer materials // Soil Org. Matter Stud. – 1977. – Vol. 1. – P. 66-78.
3. Lyapushkin S.V. Povyshenie effektivnosti upravleniya elektroprivodom avtomatizirovannogo kompleksa dozirovaniya sypuchikh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. – Tomsk, 2015.
4. Sinitsyn B.N., Yerokhin A.S. Dozatory nepreynvogo deystviya - sredstva avtomatizatsii protsessov dozirovaniya. Obzornaya informatsiya. – M., 1982.
5. Sogin A.V., Shapkin V.A. Sovremennaya tekhnologiya polucheniya sapropelevykh udobreniy iz

lokalnykh vodoemov // Izvestiya akademii inzhenernykh nauk im A.M. Prokhorova: nauch.-tekhn. zhurnal. – M. - Nizhniy Novgorod, 2004. – T. 8. – S. 77-88.

6. Shtin S.M. Ozernye sapropeli i ikh kompleksnoe ispolzovanie. – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 374 s.

7. Ignatenkov V.G. Povysenie effektivnosti proizvodstva vitaminno-kormovoy dobavki na osnove sapropelya putem obosnovaniya konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov smesitelya-

izmelchitelya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01. – Velikie Luki, 2005. – 180 s.

8. Morozov V.V. Tekhnologiya i kompleks mashin dlya posloynnoy razrabotki sapropelya na udobreniya: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.20.01 – SPb., 1995.

9. Ignatenkov V.G. Povysenie effektivnosti proizvodstva vitaminno-kormovoy dobavki na osnove sapropelya putem obosnovaniya konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov smesitelya-izmelchitelya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01 – Velikie Luki, 2005.



УДК 631.316.6

Ю.Н. Сыромятников  
Yu.N. Syromyatnikov

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ РЫХЛИТЕЛЬНО-СЕПАРИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ

### IMPROVEMENT OF ROTOR WORKING PARTS OF A TILLAGE RIPPING-SEPARATING MACHINE

**Ключевые слова:** почва, крутящий момент, работа ножа, энергия, сепарирующая решетка, ротор.

Предметом исследования является процесс функционирования рабочих органов ротора почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины, изменяющей структуру и плотность обрабатываемого слоя почвы в соответствии с требованиями агрономической науки. Рассмотрена работа ножа ротора рыхлительно-сепарирующей машины в положениях относительно почвы и сепарирующей решетки. Три фазы работы ножа ротора: от момента вхождения ножа в почву до сепарирующей решетки, момента движения ножа над сепарирующей решеткой, от момента движения ножа над сепарирующей решеткой до выхода ножа из почвы. Объектом исследования является нож ротора, форма рабочей кромки которого обеспечивает минимальную затрату энергии на работу как отдельного ножа, так и ротора в целом. При выполнении работы применены теоретические исследования с использованием механико-математического моделирования взаимодействия рабочих органов с почвой. Исходная информация для обоснования исследования получена путем анализа литературных источников. Дано обоснование геометрической формы профиля рабочей части ножа ротора рыхлительно-сепарирующей машины, совершающего минимум работы на выполнение одного полного цикла. Актуальность состоит в том, что теоретически обоснованная форма профиля рабочей части ножа ротора позволит

усовершенствовать методы предпосевной обработки почвы для улучшения ее агротехнических качеств, с минимальными затратами энергии. Целевая группа потребителей информации – конструкторы, специалисты, занимающиеся разработкой почвообрабатывающих рабочих органов.

**Keywords:** soil, torque, knife operation, energy, separating grid, rotor.

The research area is the process of functioning of the rotor working parts of the tillage ripper-separating machine that changes the structure and density of the tilled soil layer in accordance with the requirements of the agronomical science. The operation of the rotor knife of the ripping-separating machine is considered in positions relative to the soil and separating grid. Three phases of operation of the rotor knife are as following: from the moment the knife enters the soil to the separating grate, the moment the knife moves above the separating grate, from the moment the knife moves over the separating grid to the knife exit from the soil. The research target is the rotor knife, the shape of the working edge which ensures minimal energy consumption for the operation of a separate knife and the rotor as a whole. The research involved the theoretical studies using mechanical-mathematical modeling of the interaction of working parts with soil. The initial information for the study substantiation was obtained by analyzing the literature sources. The substantiation of the geometrical shape of the profile of the work-