

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 631.363.28

И.Я. Федоренко, А.А. Смышляев
I.Ya. Fedorenko, A.A. Smyshlyayev

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ СЛОЯ КОРМОВОГО МАТЕРИАЛА

MODELING OF SHOCK LOADING OF FEED MATERIAL LAYER

Ключевые слова: аперiodические колебания, деформация, диссипация, измельчение, коэффициент затухания, коэффициент восстановления скорости при ударе, нагружение, напряжение, прессование, удар.

Динамическое поведение слоя кормового материала при ударном воздействии представляет интерес для процессов измельчения и прессования кормов. Наиболее успешно удар можно применить при измельчении фуражного зерна. Уравнение движения штемпеля при ударе о слой кормового материала по форме совпадает с уравнением свободных затухающих колебаний, в котором основную роль играет коэффициент затухания b , отражающий диссипацию энергии в слое материала. Оптимальная величина коэффициента затухания b соответствует варианту, когда штемпель при падении совершает аперiodическое движение и не отрывается от слоя материала. Данное положение может быть обосновано в терминах коэффициента восстановления нормальной скорости при ударе R , который связан с коэффициентом затухания b зависимостью $R \sim b/\omega$. Процесс измельчения при прессовании будет эффективным, если коэффициент восстановления нормальной скорости удара $R \leq 0,14$. опыты показывают, что при ударе штемпеля о слой фуражного зерна без его разрушения коэффициент восстановления R составляет 0,32–0,5, а с разрушением зерна $R = 0,06–0,08$. Коэффициент полезного действия единичного удара составит $\eta = 1 - R^2 = 1 - 0,06^2 \approx 0,96$. Исходя из этого процесс измельчения фуражного зерна падающим штемпелем за один удар энергетически эффективнее, чем измельчение несколькими ударами. Это положение подводит теоретическую базу под разработку оборудования, позволяющего

осуществлять процессы прессования и измельчения за один рабочий ход штемпеля.

Keywords: aperiodic oscillations, deformation, dissipation, crushing, damping coefficient, coefficient of restitution, loading, tension, compaction, shock.

The dynamic behavior of feed material layer when exposed to applied stroke is of interest for feeding-stuffs crushing and dumping processes. The widest application of applied stroke may be found for the process of feed grain grinding. The equation of motion for stamp in the moment of concussion of feed material layer is in shape with the equation of damping, where b is the damping coefficient reflecting the dissipation of energy in the layer of material. The optimal value of the damping coefficient b corresponds to the variant when the stamp executes an aperiodic motion and does not separate away from the layer of material. This stipulation can be argued in terms of the coefficient of restitution R , which is connected with the damping coefficient b by the dependency $R \sim b/\omega$. Grinding in the process of damping being effective if the coefficient of restitution $R \leq 0.14$. The experiments revealed that in the moment of stamp concussion of feeding grain layer without breaking down of grain the coefficient of restitution $R = 0.32–0.5$, while with breaking down of grain $R = 0.06–0.08$. The efficiency of a single stroke $\eta = 1 - R^2 = 1 - 0.06^2 \approx 0.96$. Reasoning from this fact, the process of feeding grain grinding by means of falling stamp in a single stroke is more energetic than grinding in several strokes. This stipulation brings theoretical foundation for developing the equipment for compaction and grinding in a single stamp stroke.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., проф., зав. каф. «Механизация животноводства», Алтайский государственный аграрный университет. Тел/факс: (3852) 62-83-26. E-mail: IIFedorenko@mail.ru.

Смышляев Андрей Алексеевич, к.т.н., доцент, зав. каф. «Профессиональное обучение, инженерная графика и САПР», Алтайский государственный аграрный университет. Тел/факс: (3852) 62-83-84. E-mail: an_smish_asau@mail.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Animal Farming Mechanization, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-26. E-mail: IIFedorenko@mail.ru.

Smyshlyayev Andrey Alekseyevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Professional Education, Engineering Graphics and CAD, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-84. E-mail: an_smish_asau@mail.ru.

Введение

Динамическое поведение слоя кормового материала при ударном воздействии представляет интерес для процессов измельчения и прессования кормов. Первые и пока еще единственные (по нашим сведениям) исследования на эту тему изложены В.И. Особовым и др. [1] применительно к процессу брикетирования сено-соломистых материалов. На наш взгляд, более успешно ударную нагрузку можно применить при подготовке к скармливанию фуражного зерна.

Исходя из этого, целью исследования является интеграция теории прессования кормового материала с теорией разрушения зерна в контексте совмещения процесса прессования и измельчения за один рабочий ход штемпеля.

Объекты и методы исследования

Рассмотрим простейшую схему ударного нагружения слоя кормового материала при помощи падающего груза, который будем называть штемпелем (рис. 1, позиция 1). Кормовой материал 2 расположен в матрице 3, которая опирается на жесткое основание 4 с бесконечно большой массой. Считаем, что рабочие органы 1 и 3 являются абсолютно жесткими, а направляющие 5 – идеальными в смысле малости трения.

Как известно, слой кормового материала обладает весьма сложными реологическими свойствами. В данном случае пригодна реологическая модель, показанная на рисунке 2.

Модель включает массу m , упругий элемент, отображенный при помощи тела Гука с упругостью c , а также элемент μ , моделирующий вязкие свойства слоя. Наконец, пластичность, т.е. не восстанавливаемость деформации, демонстрируется элементом сухого трения F , который демпфируется с упрочнением.

Аналитическая запись для силовой функции жестко-пластичного элемента с упрочнением имеет вид

$$F = F_0 + bx, \quad (1)$$

где F_0 – предел текучести;

b – эмпирический коэффициент.

Реологическая модель слоя качественно характеризует все особенности его динамического поведения, в том числе упругие и пластические свойства, расширение после

снятия нагрузки (обратную ползучесть), релаксацию напряжений, увеличение сопротивления при увеличении скорости нагружения и нарастании деформации (рис. 2). Однако эта модель характеризуется пятью параметрами: F , b , c , m и μ , что создает непреодолимые математические трудности при моделировании фаз удара.

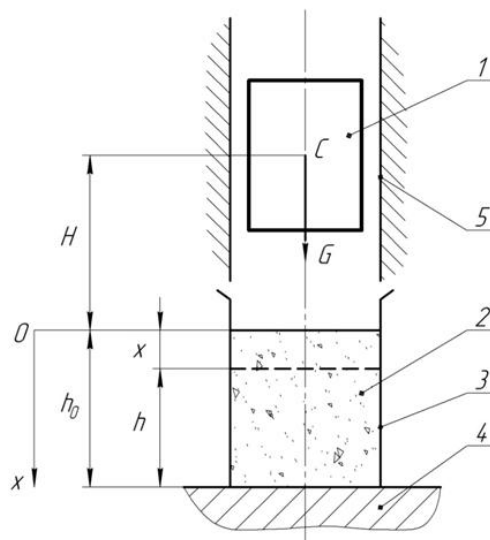


Рис. 1. Схема ударного нагружения слоя кормового материала:
1 – штемпель; 2 – кормовой материал;
3 – рабочая матрица; 4 – основание;
5 – направляющие

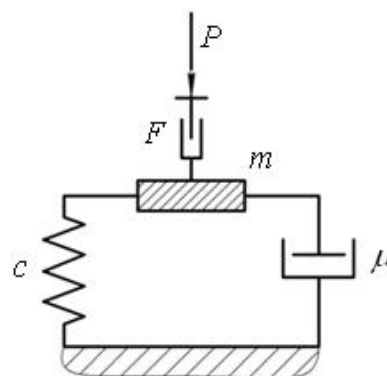


Рис. 2. Реологическая модель ударного нагружения слоя кормового материала

В связи со сказанным аппроксимируем сопротивление слоя P при ударе более простым выражением, исходя из уравнения прессования кормовых материалов [2]:

$$P = a\varepsilon^n, \quad (2)$$

где P – давление прессования;
 a, n – эмпирические коэффициенты;
 ε – относительное приращение плотности слоя при его упрочнении.

В данном случае применение зависимости (2) оправдывается тем, что статическое и динамическое прессование слоя органического материала следует одним и тем же зависимостям, различающимся лишь количественно [1].

Относительное приращение плотности слоя рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}, \quad (3)$$

где ρ_0 – начальная плотность слоя;
 ρ – текущая плотность слоя, достигнутая при деформировании.

Учитывая (рис. 1), что

$$\rho_0 = \frac{m}{S \cdot h_0}; \quad \rho = \frac{m}{S \cdot h},$$

где S – поперечное сечение слоя, находим

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h} = \frac{x}{h_0 - x}. \quad (4)$$

Следовательно, выражение (2) можем переписать в виде

$$P = a \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n. \quad (5)$$

Соответственно, полное усилие P , с которым слой сопротивляется деформированию, составляет

$$P = S \cdot a \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n. \quad (6)$$

Коэффициенты a и n могут быть определены при испытаниях на установке (рис. 1). Методика таких испытаний известна [3].

Обозначив $Sa = A$, окончательную зависимость сопротивления слоя от перемещения штемпея запишем в виде

$$P = A \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n. \quad (7)$$

Исследование фаз удара проведем по классической методике [4-6].

Составим дифференциальное уравнение движения штемпея, который, будучи опущенным с высоты H , вошел в контакт со слоем:

$$(M + m)\ddot{x} = G - P(x), \text{ или} \\ (M + m)\ddot{x} = Mg - A \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n, \quad (8)$$

где M – масса штемпея;
 m – масса кормового материала.

Разделив все члены уравнения (8) на $(M+m)$ и обозначая

$$\frac{M}{M+m} = \lambda; \quad \frac{A}{M+m} = \xi, \quad (9)$$

будем иметь уравнение

$$\ddot{x} = \lambda g - \xi \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n. \quad (10)$$

Полученное выражение характеризует первую фазу удара: от соприкосновения штемпея со слоем до остановки штемпея.

Для решения уравнения (10) выразим ускорение \ddot{x} в виде

$$\ddot{x} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot v, \quad (11)$$

где v – скорость деформации слоя в месте контакта его со штемпелем (или скорость последнего).

С учетом выражения (11) уравнение (10) примет вид

$$v dv = \left[\lambda g - \xi \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n \right] dx. \quad (12)$$

Первый интеграл будет иметь вид

$$\frac{v^2}{2} = \lambda g x - \xi \int_0^x \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n dx + C. \quad (13)$$

Постоянную интегрирования найдем из условия, что при $t = 0$: $x = 0$; $\dot{x} = v_0$. Подстановка этих значений в уравнение (13) дает результат

$$C = \frac{v_0^2}{2}. \quad (14)$$

Следовательно, имеем

$$v^2 - v_0^2 = 2\lambda g x - 2\xi \int_0^x \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n dx. \quad (15)$$

Интеграл в этом выражении аналитически не решается, а вычисляется численными методами, что в настоящее время не составляет труда.

Обозначая

$$\int_0^x \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n dx = I(x), \quad (16)$$

продолжим наше исследование.

При максимальной сжатии $v = 0$, следовательно, максимальное продвижение штемпея x_{max} может быть определено из выражения

$$2\lambda g x_{max} - 2\xi \int_0^{x_{max}} \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n dx + v_0^2 = 0. \quad (17)$$

Поскольку неизвестная величина x_{max} входит в том числе в предел интегрирования, то данное уравнение может быть решено только численно.

Соответственно, контактная сила определится так

$$P_{max} = A \left(\frac{x_{max}}{h_0 - x_{max}} \right)^n. \quad (18)$$

Время удара определим из уравнения (15). Последовательно находим следующие переменные

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2\lambda g x - 2\xi I(x)}; \quad (19)$$

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{v_0^2 + 2\lambda g x - 2\xi I(x)}. \quad (20)$$

Разделяя переменные, получим продолжительность первой фазы удара τ_1 :

$$\tau_1 = \int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{\sqrt{v_0^2 + 2\lambda g x - 2\dot{I}(x)}}. \quad (21)$$

Время τ_1 называют еще временем активной фазы удара, а саму первую фазу – передним фронтом удара.

$$I(x) = \int_0^x \left(\frac{x}{h_0 - x} \right)^n dx$$

Интеграл $I(x)$ при произвольном n аналитически не интегрируется в элементарных функциях и может быть определен одним из численных методов.

Для использования численного метода введем новую переменную

$$z = \frac{x}{h_0}, \quad (22)$$

тогда $dz = \frac{dx}{h_0}$; $dx = h_0 dz$, а интеграл примет следующий вид

$$I(z) = h_0 \int_0^z \left(\frac{z}{1-z} \right)^n dz. \quad (23)$$

Чтобы различить переменную z и верхний предел интегрирования, обозначим последний через u : $u \equiv z = x / h_0$.

Интеграл

$$I(z) = h_0 \int_0^u \left(\frac{z}{1-z} \right)^n dz \quad (24)$$

подвергнем численному интегрированию, для чего воспользуемся программой MathCAD. Результаты вычислений представлены в [7].

При анализе второй фазы удара, когда штемпель отскакивает под действием упругости слоя, нужно учесть, что пластичный элемент F является не активным (рис. 2). Поэтому дифференциальное уравнение принимает вид

$$(M + m)\ddot{x} = G - cx - \mu\dot{x}. \quad (25)$$

Или в другой форме

$$\ddot{x} + 2b\dot{x} + \omega_0^2 x = \lambda g, \quad (26)$$

$$\text{где } 2b = \frac{\mu}{M+m}; \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{M+m}}; \lambda = \frac{M}{M+m}. \quad (27)$$

Член λg не зависит от переменной x . Его можно исключить преобразованием координат

$$x = X + x_0; \dot{x} = \dot{X}; \ddot{x} = \ddot{X}. \quad (28)$$

Тогда уравнение (25) преобразуется к окончательному виду

$$\ddot{X} + 2b\dot{X} + \omega_0^2 X = 0. \quad (29)$$

Уравнение (29) по форме совпадает с уравнением свободных затухающих колебаний и хорошо изучено. Величина $2b$ называется коэффициентом затухания, которая отражает рассеяние (диссипацию) энергии в системе. Величина ω_0 – частота свободных колебаний системы.

Составляя характеристическое уравнение, полагаем $X = e^{qt}$

$$q^2 + 2bq + \omega_0^2 = 0 \quad (30)$$

и находим корни этого уравнения

$$q_{1,2} = -b \pm \sqrt{b^2 - \omega_0^2}.$$

В зависимости от соотношения величин b и ω_0 могут быть три различных случая поведения системы:

1. При малом сопротивлении, когда $b < \omega_0$ – движение системы представляет собой затухающие колебания (рис. 3, кривая 1).

2. При $b = \omega_0$ наблюдается предельный случай аperiodического движения (рис. 3, кривая 2), когда оно только возникает.

3. При большом сопротивлении, когда $b > \omega_0$ – система совершает аperiodическое движение (рис. 3, кривая 3).

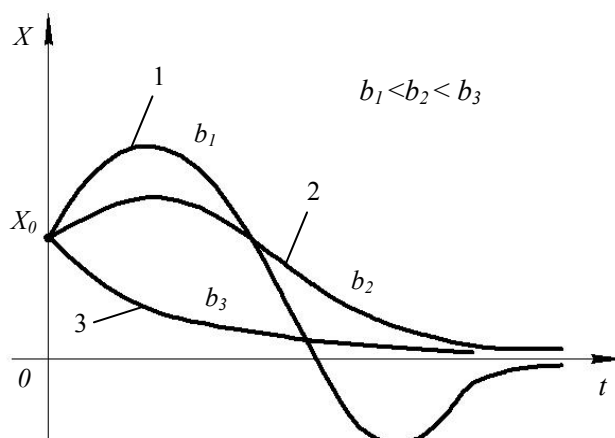


Рис. 3. Возможные типы движения штемпеля во второй фазе удара

Для моделирования процесса ударного нагружения слоя кормового материала наибольший интерес представляет третий случай поведения системы, когда происходит диссипация энергии в слое кормового материала и рабочий орган, совершая аperiodическое движение, не отрывается от слоя материала. Особенно это важно для случая уплотнения материала.

Данное положение может быть также обосновано в терминах коэффициента восстановления нормальной скорости при ударе

$$R = \frac{v_{0+}}{v_{0-}}, \quad (31)$$

где v_{0+} , v_{0-} – скорости штемпеля в моменты прохождения координаты $X = 0$, после удара (+) и до удара (-).

Очевидно, что величина R связана с коэффициентом сопротивления b . Для случая вязкоупругого удара $R \sim b/\omega$ [5].

Для интересующего нас начала наступления аperiodического движения штемпеля $b/\omega_0 = 1$. Этому случаю соответствует значение $R = 0,1353$ [5] (табл. 8).

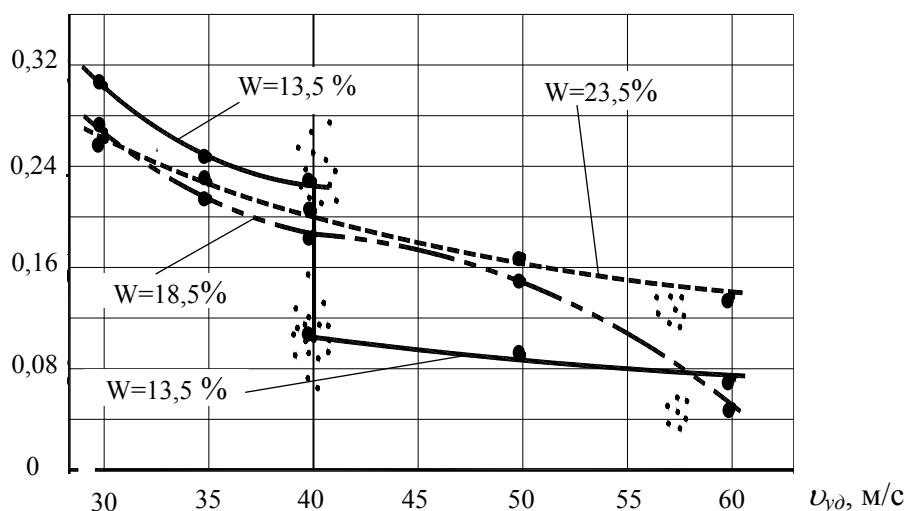


Рис. 4. Зависимость коэффициента восстановления R от скорости удара $v_{уд}$ и влажности зерна W для пшеницы

Исходя из этого технологический процесс будет эффективным, если устройство обеспечивает коэффициент восстановления скорости при ударе $R < R_0 = 0,1353$.

Опыты показывают, что при ударе штемпеля о слой фуражного зерна без его разрушения коэффициент восстановления R составляет 0,32-0,5, а с разрушением зерна $R = 0,06-0,08$ (рис. 4).

Закключение

Таким образом, разрушение зерна падающим штемпелем является эффективным. При этом коэффициент полезного действия единичного удара составит $\eta = 1 - R^2 = 1 - 0,06^2 \approx 0,96$.

При ударе зерна влет, что реализуется в молотковых дробилках, $\eta = 0,84 - 0,91$ [8, 9]. Следовательно, процесс измельчения зерна падающим штемпелем за один удар энергетически эффективней, чем измельчение несколькими ударами. Данные выводы согласуются с более ранними предпосылками об эффективности процесса измельчения зерна за 1-2 удара [9, 10].

Подводится теоретическая база под разработку конструкции оборудования, позволяющего осуществлять процессы прессования и измельчения за один рабочий ход штемпеля.

Библиографический список

1. Особов В.И., Васильев Г.К., Голяновский А.В. Машины и оборудование для уплотнения сено-соломистых материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
2. Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов: учеб. пособие. – М.: Форум, 2011. – 176 с.

3. Федоренко И.Я., Наумов И.А. Метод определения коэффициентов основного уравнения прессования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2007. – № 8. – С. 51-55.

4. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.

5. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 224 с.

6. Батуев Г.С. и др. Инженерные методы исследования ударных процессов. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.

7. Федоренко И.Я. Альтернативная теория прессования кормов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 3. – С. 95-98.

8. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – Л.: Колос, 1978. – 560 с.

9. Guritno P., Haque E. Relationship between energy and size reduction of grains using a three-roller mill // Trans. ASAE. – 1994. – Vol. 37 (4). – P. 1243-1248.

10. Федоренко И.Я., Золотарев С.В., Смышляев А.А. Влияние числа ударов, необходимых для разрушения зерна, на энергетику процесса измельчения // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 6. – С. 53-54.

References

1. Osobov V.I., Vasil'ev G.K., Golyanovskii A.V. Mashiny i oborudovanie dlya uplotneniya seno-solomistykh materialov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 231 s.
2. Fedorenko I.Ya. Tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov: ucheb. posobie. – M.: Forum, 2011. – 176 s.
3. Fedorenko I.Ya., Naumov I.A. Metod opredeleniya koeffitsientov osnovnogo

uravneniya pressovaniya // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2007. – № 8. – S. 52-55.

4. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy. – M.: Vysshaya shkola, 1980. – 408 s.

5. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara. – M.: Nauka, 1977. – 224 s.

6. Batuev G.S. i dr. Inzhenernye metody issledovaniya udarnykh protsessov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 240 s.

7. Fedorenko I.Ya. Al'ternativnaya teoriya pressovaniya kormov // Vestnik Altaiskogo

gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 3. – S. 95-98.

8. Mel'nikov, S.V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm. – L.: Kolos, 1978. – 560 s.

9. Guritno P., Haque E. Relationship between energy and size reduction of grains using a three-roller mill // Trans. ASAE. – 1994. – Vol. 37 (4). – P. 1243-1248.

10. Fedorenko I.Ya., Zolotarev S.V., Smyshlyaev A.A. Vliyanie chisla udarov, neobkhodimyykh dlya razrusheniya zerna, na energetiku protsessa izmel'cheniya // Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya. – 2001. – № 6. – S.53-54.



УДК 631.171.(07308)

В.А. Завора
V.A. Zavora

ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЗАХВАТА МОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА

FUNDAMENTALS OF THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE OPTIMAL OPERATING WIDTH OF MOBILE MACHINERY UNITS USED IN CROP PRODUCTION

Ключевые слова: внешние производственные условия, оптимальная ширина захвата агрегата, мощность двигателя, машины, технико-экономическая целесообразность ширины захвата мобильного агрегата.

Ширина захвата мобильных агрегатов при выполнении технологических операций по возделыванию и уборке сельскохозяйственных культур является важнейшим параметром высокопроизводительного использования машинно-тракторных агрегатов, что достигается при определенных значениях мощности двигателя, массе и скорости движения. Проводится аналитическое исследование зависимости между основными показателями внешних производственных условий и основными параметрами агрегата – шириной захвата, массой, энергонасыщенностью, кинематическая характеристика. Скорость агрегата должна устанавливаться с учетом качества работы, однако во многих случаях скорость (км/ч), определяемая энергонасыщенностью агрегата, не может быть реализована ввиду агротехнических ограничений, и тогда определяющим критерием, отражающим всю совокупность факторов, действующих при

функционировании мобильного агрегата, – приведенные издержки на единицу площади.

Keywords: external production conditions, optimal operating width, engine power, machinery, technical and economic feasibility.

The operating width of mobile machinery units performing crop cultivation and harvesting operations is the most important parameter of highly productive use of machinery and tractor units; this is achieved at certain values of engine power, weight and speed. The paper presents an analytical study of the relation between the main indices of the external operating conditions and the main parameters of the unit as operating width, weight, power/weight ratio and kinematic characteristics. The speed of the unit should be determined with the account of the work quality, but in many cases the speed (km/h) determined by the unit's power/weight ratio cannot be realized due to agronomic limitations, and then the determining criterion which reflects all the factors arising at the operation of a mobile unit are the total costs per area unit.

Завора Виктор Алексеевич, к.т.н., проф., каф. безопасности жизнедеятельности, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-99-59. E-mail: vystsergej@yandex.ru.

Zavora Viktor Alekseyevich, Cand. Tech. Sci., Prof., Chair of Life Safety, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-99-59. E-mail: vystsergej@yandex.ru.