

**В.Д. Валяжонков, Ю.А. Добрынин, А.А. Моштаков**

## **МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАЦИОНАЛЬНОСТИ КОМПЛЕКТОВАНИЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ**

*Введение.* Выбор наилучшего варианта машинно-тракторного агрегата (МТА) обычно выполняют с помощью тягового коэффициента полезного действия трактора  $\eta_t$  или КПД агрегата  $\eta_a$ . Применение данных показателей при составлении агрегатов не совсем удачно. С помощью  $\eta_t$  можно дать энергетическую оценку только базовому трактору, но не агрегату в целом, так как он вскрывает полезную долю мощности не на рабочем органе агрегируемого орудия, а на крюке трактора. Мощность, подводимая к рабочему органу орудия, учитывает  $\eta_a$ , но нет надежного метода ее измерения. Однако главным недостатком данных показателей является то, что они не отражают очень важную сторону явления – какое количество технологической работы можно создать на полезно затрачиваемую энергию.

Наиболее приемлемым является комплексный показатель «удельная энергопроизводительность»  $K$ , представляющий собой отношение технической производительности при выполнении технологической операции  $\Pi_t$  к текущей мощности двигателя базового трактора  $N_c$  [Прохоров, 1978]:

$$m(K) = m(\Pi_t) / m(N_c). \quad (1)$$

Учитывая, что выполнение технологической операции зависит от влияния множества случайных факторов, показатели в данном выражении и далее представлены в виде математических ожиданий исследуемых параметров.

Показатель  $m(K)$  отражает количество выполненной работы при затрате единицы мощности, т. е. дает возможность оценить с энергетической точки зрения конструктивное совершенство лесохозяйственных агрегатов и их приспособляемость к выполнению технологической операции как основы реализуемого процесса.

*Цель исследования* – разработка математической модели, открывающей возможность установления эффективного использования энергии вырабатываемой двигателем МТА под влиянием основных действующих факторов при выполнении технологической операции, для выявления пределов рациональности использования энергии при комплектowaniu агрегатов.

Моделирование рационального использования энергии выполнено на примере работы МТА для полосной расчистки вырубков от валежа и порубочных остатков при выполнении лесовосстановительных работ, составленного из лесохозяйственного трактора ЛХТ-100А и клина для расчистки полос КРП-2,5.

*Методика исследования.* Метод исследования – математическое моделирование. Для построения модели преобразуем выражение (1):

$$m(\Pi_T) = 3,6 \times 10^3 m(B_p)m(v_d), \text{ м}^2/\text{ч} \quad \text{и} \quad m(N_c) = m(P_k)m(v_T)m(\eta_M^{-1}), \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $m(B_p)$  – ширина расчищаемой полосы, га;  $m(v_d)$  и  $m(v_T)$  – действительная и теоретическая скорость движения МТА соответственно, м/с;  $\eta_M$  – механический КПД;  $m(P_k)$  – касательная сила тяги трактора, кН, выражаемая зависимостью

$$\begin{aligned} m(P_k) &= m(P_{op}) + m(P_f) + m(P_\alpha) = \\ &= m(B_p) + m(f)m(G_{Tp}) + m(G_{ar})\sin m(\alpha), \text{ кН}. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом преобразований (2) и (3) выражение (1) примет вид:

$$m(K) = \frac{3,6 \cdot 10^3 m(B_p)m(v_d)}{m(P_k)m(v_T)m(\eta_M^{-1})} = \frac{3,6 \cdot 10^3 m(B_p)m(\eta_\delta)m(\eta_M)}{m(P_k)}. \quad (4)$$

Но при этом учтено, что коэффициент буксования  $\eta_\delta = v_d/v_T$ .

Из специфики условий работы МТА на вырубках известно, что они, в основном, не имеют сцепок. В этом случае сопротивление  $P_{op}$  равно тяговому усилию на крюке трактора  $P_{кр}$ , которое можно представить в следующем виде:

$$m(P_{кр}) = m(\varphi_{кр}) m(G_{Tp}),$$

где  $\varphi_{кр}$  – коэффициент использования сцепного веса трактора;  $G_{Tp}$  – вес трактора.

С учетом этого математическое ожидание касательной силы тяги будет складываться из математических ожиданий формирующих ее параметров:

$$\begin{aligned} m(P_k) &= m(P_{op}) + m(P_f) + m(P_\alpha) = m(\varphi_{кр})m(G_{Tp}) + \\ &+ m(f)m(G_{Tp}) \pm m(G_{ar})\sin m(\alpha), \text{ кН}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $P_f$ ,  $P_\alpha$  – соответственно сила сопротивления самопередвижению трактора и сила движения при подъеме МТА;  $G_{Tp}$  и  $G_{ar}$  – соответственно вес трактора и агрегата;  $f$  – коэффициент сопротивления самопередвижения трактора;  $\alpha$  – угол подъема, для нашего случая  $\alpha = 0$ .

Используя выражение (5), перепишем выражение (4) в следующем виде:

$$m(K) = \frac{3,6 \cdot 10^3 m(B_p)m(\eta_\delta)m(\eta_M)}{m(P_{кр}) + m(P_f)} = \frac{3,6 \cdot 10^3 m(B_p)m(\eta_\delta)m(\eta_M)}{m(\varphi_{кр})m(G_{тр}) + m(f)m(G_{тр})}. \quad (6)$$

Введя в рассмотренное математическое ожидание коэффициент расхода механической энергии, необходимой для функционирования навесного орудия при расчистке единицы площади,  $m(k_{ор}) = m(B_p)m(\varphi_{кр})m(G_{тр})$  и разделив числитель и знаменатель выражения (6) на  $m(\varphi_{кр})m(G_{тр})$ , получим модель математического ожидания удельной энергопроизводительности МТА:

$$m(K) = \frac{3,6 \cdot 10^3 m(\eta_\delta)m(\eta_M)}{m(k_{ор}) \left[ 1 + \frac{m(f)}{m(\varphi_{кр})} \right]}. \quad (7)$$

*Результаты исследования.* По полученной математической модели (7) проведен анализ изменения среднего значения удельной энергопроизводительности агрегата  $K$  в зависимости от средних значений коэффициента использования сцепного веса трактора  $\varphi_{кр}$ , сопротивления его самопередвижению  $f$  и сопротивления орудия  $k_{ор}$ . Данные коэффициенты отражают как условия эксплуатации МТА, так и его конструктивные параметры. Анализ выполнен с использованием информации, приведенной в [1–7]. Результаты анализа представлены в виде зависимостей (рис. 1 и 2).

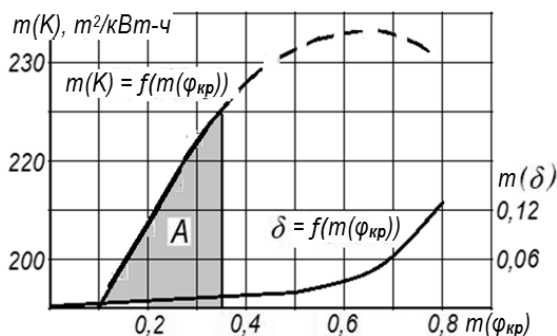


Рис. 1. Изменение удельной энергопроизводительности  $m(K)$  и буксования трактора  $\delta$  в зависимости от сцепного веса трактора  $m(\varphi_{кр})$

Fig. 1. The change in the specific power production rate  $m(K)$  and the tractor slippage  $\delta$  depending on the tractor's traction weight  $m(\varphi_{кр})$

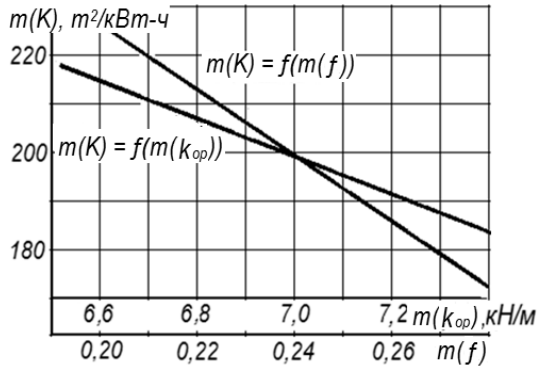


Рис. 2. Изменение удельной энергопроизводительности  $m(K)$  в зависимости от удельного сопротивления орудия  $m(k_{op})$  и коэффициента сопротивления самопередвижению трактора  $m(f)$

Fig. 2. The change in the specific energy productivity  $m(K)$  as a function of the resistivity of the tool  $m(k_{op})$  and the coefficient of resistance to self-movement of the tractor  $m(f)$

Линии зависимостей на рисунках отражают взаимосвязи между математическими ожиданиями переменных. При этом поле изменчивости энергопроизводительности составляет  $m(K) \pm 3\sigma$ . Характер изменения  $m(K) = f(m(\varphi_{кр}))$  показывает, что с увеличением  $m(\varphi_{кр})$  до 0,6 происходит нарастание значений  $m(K)$ , достигающих своего максимума при  $m(\varphi_{кр}) = 0,65$ , когда функция  $m(\delta(\varphi_{кр}))$  переходит от плавного нарастания к интенсивному. Интенсивное буксование гусеничного движителя, которое возникает при  $m(\delta) = 0,05-0,06$ , вызывает нарушение силового взаимодействия трактора с почвой, что отражается на падении скорости движения МТА и сопровождается потерей энергии на бесполезную работу.

Изменение удельной энергопроизводительности агрегата ЛХТ-100А + КРП-2,5 отражено на графике зависимости  $m(K) = f(m(\varphi_{кр}))$  прямолинейным участком в диапазоне изменения  $m(\varphi_{кр})$  0,1–0,35. При дальнейшем росте  $\varphi_{кр}$  развитие зависимости  $m(K) = f(m(\varphi_{кр}))$  протекает по кривой (штриховая линия). Данный участок зависимости указывает на получение наилучших значений показателя  $m(K)$  при правильном составлении МТА. Рабочая зона (А) рассматриваемого и существующих лесохозяйственных МТА находится далеко от максимальных значений  $m(K)$ , которые можно получить только при оптимальных значениях коэффициента использова-

ния сцепного веса трактора  $m(\varphi_{\text{кр}}^{\text{опт}})$ . Это объясняется низкой энергонасыщенностью применяемых тракторов в лесном хозяйстве, что негативно сказывается на составлении МТА. В нашем случае около 40% затрат энергии расходуется не на выполнение технологической работы, а на перемещение избыточного веса трактора.

Анализ зависимостей  $m(K) = m(k_{\text{оп}})$  и  $m(K) = m(f)$  показывает, что на значения удельной энергопроизводительности большое влияние оказывают конструктивное совершенство и техническое состояние трактора и орудия. С ростом значений коэффициентов  $m(k_{\text{оп}})$  и  $m(f)$  показатель  $m(K)$  снижается по линейной зависимости.

Таким образом, разработанная модель (7) дает широкие возможности для анализа и установления направлений повышения эффективности использования энергии, вырабатываемой двигателем базового трактора при выполнении технологической операции лесохозяйственных работ. Кроме того, оценка приспособляемости агрегата к выполнению технологической операции с помощью удельной энергопроизводительности дает наиболее объективное представление об уровне рациональности комплектования лесохозяйственного МТА.

#### *Выводы.*

1. Разработанная математическая модель позволяет установить эффективность использования энергии, вырабатываемой двигателем базового трактора лесохозяйственного МТА под влиянием основных действующих факторов при выполнении технологической операции с целью выявления рационального уровня комплектования агрегата.

2. Анализ реализации технологической операции полосной расчистки сплошных вырубок агрегатом ЛХТ-100А + КРП-2,5, выполненный с использованием созданной модели, показал, что около 40% затрат энергии расходуется не на выполнение технологической работы, а на перемещение избыточного веса трактора.

#### **Библиографический список**

*Прохоров В.Б.* Эксплуатация машин в лесозаготовительной промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 304 с.

*Стахеев Ю.И., Орловский С.Н.* Оборудование трактора ТТ-4 для лесохозяйственных работ // Лесное хозяйство. 1976. № 9. С. 61–63.

*Ярков В.И.* Трактор ТДТ-55 с устройством ТК-1 для полосной расчистки вырубок // Лесная промышленность. 1989. №4. С. 1.

*Ууситало Й.* Основы лесной технологии. Йозенсуу: ОуFEG, 2004. 228 с.

*Ворожейкин Г.Г., Михайленко А.В.* Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Эксплуатационные свойства машин. Красноярск: СибГТУ, 2005. 290 с.

*Зинин В.Ф., Казаков В.И., Климов О.Г.* Технология и механизация лесохозяйственных работ. М.: Академия, 2004. 320 с.

*Жуков А.В., Провоторов Ю.И., Скотников В.А. и др.* Мелиоративные, строительные и лесные тракторы: учеб. пособие для вузов. Минск: Урожай, 1989. 335 с.

### References

*Prokhorov V.B.* Operation of machines in the logging industry. M.: Forest industry, 1978. 304 p.

*Staheev Y.I., Orlovsky S.N.* Equipment tractor TT-4 for forestry work. *Foresry*, 1976, no. 9, pp. 61–63.

*Yarkov V.I.* The TDT-55 tractor with the TK-1 device for strip clearing felling. *Forest industry*, 1989, no. 4, p. 1.

*Vorozheikin G.G., Mikhaylenko A.V.* Theory and design of machines and equipment industry. Machine performance properties. Krasnoyarsk: SibSTU, 2005. 290 p.

*Zinin V.F., Kazakov V.I., Klimov O.G.* Technology and mechanization of forestry work. M.: Academy, 2004. 320 p..

*Zhukov A.V., Provotorov Y.I., Skotnikov V.A. et al.* Land reclamation, construction and forest tractors: textbook for universities. Minsk: Urajay, 1989. 335 p.

*Материал поступил в редакцию 26.09.2018 г.*

---

**Валяжонков В.Д., Добрынин Ю.А., Моштаков А.А.** Модель энергетической оценки рациональности комплектования лесохозяйственных агрегатов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 226. С. 82–89. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.82-89

Выбор наилучшего варианта машинно-тракторного агрегата (МТА) обычно выполняют с помощью тягового коэффициента полезного действия трактора  $\eta_t$  или коэффициента полезного действия агрегата  $\eta_a$ . Применение данных показателей при составлении агрегатов не совсем удачно. С помощью  $\eta_t$  можно дать энергетическую оценку только базовому трактору, но не агрегату в целом, так как он вскрывает полезную долю мощности не на рабочем органе агрегируемого орудия, а на крюке трактора. Мощность, подводимая к рабочему органу орудия, учитывает  $\eta_a$ , но нет надежного метода ее измерения. Однако главным недостатком данных показателей является то, что они не отражают очень важную сторону явления – какое количество технологической работы можно создать на полезно затрачиваемую энергию. Для оценки рациональности составления машинно-тракторных агрегатов при выполнении

лесохозяйственных работ предлагается использовать комплексный показатель «удельная энергопроизводительность», представляющий собой отношение технической производительности к используемой мощности двигателя базового трактора. Этот показатель отражает количество выполненной технологической работы при затраченной мощности, что дает возможность оценки с энергетической точки зрения конструктивного совершенства лесохозяйственных машинно-тракторных агрегатов и их приспособляемости к выполнению соответствующей технологической операции

**Ключевые слова:** модель, энергетическая оценка, лесохозяйственные работы, рациональность составления машинно-тракторных агрегатов.

**Valyazhonkov V.D., Dobrynin Yu.A., Moshtakov A.A.** Model of energy assessment of the rationality of combining up of forestry machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2019, is. 226, pp. 82–89 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.82-89

The choice of the best version of the machine and tractor unit (MTU) is usually carried out by means of the traction efficiency ( $E$ ) of the tractor  $\eta_m$  or unit efficiency  $\eta_a$ . Application of these indexes by drawing up units is not absolutely successful. With the help  $\eta_m$  it is possible to give a power assessment only to the basic tractor, but not the unit in general as it opens the useful share of power not on an action of the aggregated tool, and on a tractor hook. The power brought to a tool action considers  $\eta_a$ , but there is no reliable method of its measurement. However the main lack of these indicators is that they do not reflect very important party of the phenomenon – what number of technological work can be created on it is useful the spent energy. For assessment of rationality of drawing up machine and tractor units when performing forestry and landscape works the complex index – the specific power efficiency representing the attitude of technical efficiency towards the used engine capacity of the basic tractor is offered to use. This index reflects the number of the performed technological work at the spent power that the design perfection of forestry and landscape machine and tractor units and their adaptability to realization of the corresponding technological operation gives the chance of assessment from the power point of view.

**Keywords:** mathematical model, power assessment, forestry, rationality of combining up machine and tractor units.

---

**ВАЛЯЖОНКОВ Владимир Дмитриевич** – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта лесных машин Санкт-Петербургской государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: valy-vladimir@yandex.ru

**VALYAZHONKOV Vladimir D.** – PhD (Technical), associate professor of Department of Forest Machinery, Service and Repair of Forest Machinery of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5, letter U. St. Petersburg. Russia. E-mail: valyvladimir@yandex.ru

**ДОБРЫНИН Юрий Андреевич** – профессор кафедры механики Санкт-Петербургской государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dobryniniury@yandex.ru

**DOBRYNIN Yuriy A.** – DSc (Technical), professor of Department of Mechanics of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5, letter U. St. Petersburg. Russia. E-mail: dobryniniury@yandex.ru

**МОШТАКОВ Антон Анатольевич** – доцент кафедры профессионального образования Ленинградского областного института развития образования, кандидат педагогических наук.

197136, Чкаловский пр., д. 25а, лит. А, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 79214091650@yandex.ru

**MOSHAKOV Anton A.** – PhD (Education), associate professor of Department of Professional Education of Leningrad Regional Institute of Educational Development.

197136. Chkalovskiy pr. 25A. St. Petersburg. Russia. E-mail: 79214091650@yandex.ru