

УДК 631.372

UDC 631.372

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗГОНА
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С
УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМ МЕХАНИЗМОМ В
ТРАНСМИССИИ ТРАКТОРА КЛАССА 5****STUDY OF ACCELERATION PROCESS OF A
MACHINE-TRACTOR UNIT WITH ELASTIC-
DAMPING MECHANISM IN A CLASS 5
TRACTOR TRANSMISSION**

Кравченко Владимир Алексеевич
доктор технических наук, профессор кафедры тракто-
ров и автомобилей
РИНЦ SPIN-код: 9983-4293

Kravchenko Vladimir Alexeyevich
Doctor of Technical Sciences, Professor of the De-
partment of tractors and vehicles
RISC SPIN-code: 9983-4293

4ye@mail.ru4ye@mail.ru

*Азово-Черноморский инженерный институт – филиал
ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрной
университет» г. Зерноград, Россия, 347740, Зерноград
Ростовской области, ул. Ленина, 21*

*Azov-Black Sea Engineering Institute – branch
FSBEE HE «Donskoy state agrarian university»
Zernograd, Russia,
347740, Zernograd Rostov region, Lenin St, 21*

Целью работы является теоретическое и экспериментальное подтверждение возможности улучшения показателей разгона машинно-тракторных агрегатов за счёт установки в трансмиссию трактора упругодемпфирующего механизма с переменной жёсткостью. Применение скоростных тракторов в сельскохозяйственном производстве встречает ряд трудностей, связанных с неустановившимися процессами при разгоне машинно-тракторных агрегатов. Возникающие значительные инерционные нагрузки при разгоне приводят к потерям части мощности двигателя, из-за чего машинно-тракторный агрегат работает с меньшей производительностью и экономичностью. Анализ опубликованных работ показал, что на показатели разгона машинно-тракторных агрегатов большое влияние оказывает жёсткость и демпфирующие свойства трансмиссии энергетических средств. Предложено для обеспечения плавного разгона агрегата устанавливать в трансмиссию трактора упругодемпфирующий механизм с переменной жёсткостью. В результате этого уменьшается напряженность процесса разгона. Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований по влиянию упругодемпфирующего механизма, устанавливаемого в трансмиссию трактора класса 5, на разгонные характеристики машинно-тракторных агрегатов. Определены оптимальные параметры элементов упругодемпфирующего механизма с переменной жёсткостью для тракторов класса 5. Доказано, что применение в трансмиссии трактора упругодемпфирующего механизма с переменной жёсткостью способствует улучшению показателей разгона

The aim of the work is theoretical and experimental confirmation of the possibility of improving the rate of acceleration of tractor units due to installing of elastic-damping mechanism with variable stiffness in tractor transmission. Speed tractors application in agricultural production meets a number of difficulties associated with the unsteady processes during acceleration of machine and tractor units. The resulting large inertial loads when accelerating result in loss of engine power, due to which the machine-tractor unit is operating at reduced performance and efficiency. An analysis of published studies shows that the acceleration performance of tractor units is greatly influenced by the stiffness and damping properties of the transmission of energy resources. To provide smooth acceleration of the unit it is proposed to install elastic-damping mechanism with variable stiffness in tractor transmission. As a result, the tension of the acceleration process decreases. The results of analytical and experimental studies on the effect of elastic-damping mechanism installed in the class 5 tractor transmission, on acceleration capabilities of tractor units are given. The optimum parameters of elements of elastic-damping mechanism with variable stiffness for class 5 tractors are determined. It is proved that the use of elastic-damping mechanism with a variable stiffness in the tractor transmission improves acceleration indicators

Ключевые слова: МАШИННО-ТРАКТОРНЫЙ АГРЕГАТ, ТРАКТОР, УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИЙ МЕХАНИЗМ, ЖЁСТКОСТЬ ТРАНСМИССИИ РАЗГОН, ВРЕМЯ РАЗГОНА, РАБОТА ТРЕНИЯ МУФТЫ СЦЕПЛЕНИЯ

Keywords: MACHINE AND TRACTOR UNIT, TRACTOR, ELASTIC-DAMPING MECHANISM, TRANSMISSION STIFFNESS, ACCELERATION, ACCELERATION TIME, CLUTCH FRICTION WORK

Doi: 10.21515/1990-4665-121-018

Эффективность агропромышленного комплекса в значительной степени связано с его оснащённостью высокопроизводительной техникой, в том числе скоростными энергонасыщенными тракторами. [1]. Однако для современных тракторов в составе сельскохозяйственных агрегатов характерно повышенное значение приведенных масс, что оказывает негативное влияние на характер его разгона [1]. Поэтому при выполнении сельскохозяйственной операции двигатель трактора работает с низким коэффициентом использования мощности, что приводит к снижению производительности агрегата и увеличению удельного расхода топлива [1].

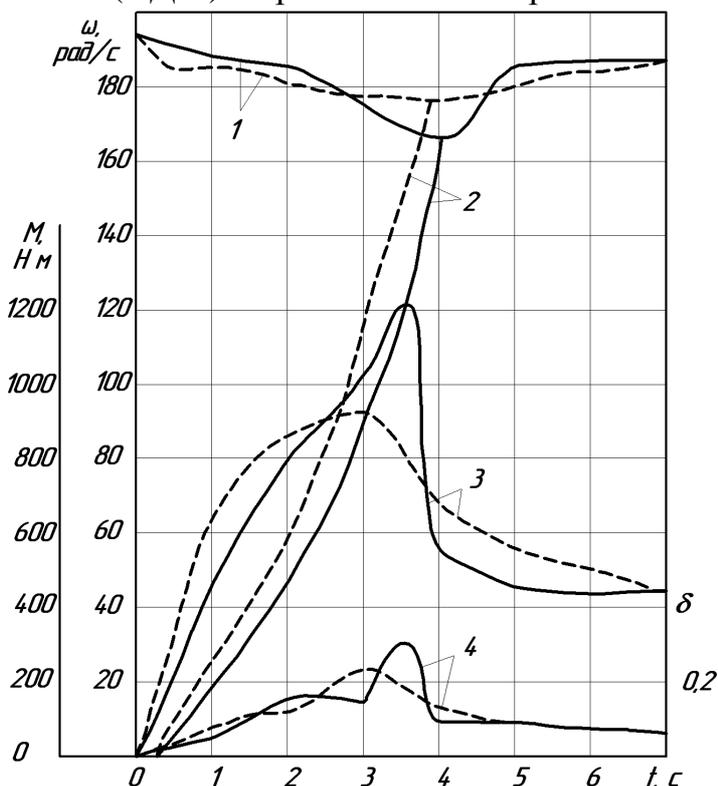
В теории трактора разгон рассматривают лишь для случая ступенчатой механической трансмиссии и поршневого двигателя [3, 7].

Как показали наши исследования, существенное влияние на показатели разгона машинно-тракторного агрегата (МТА) оказывают жёсткость и демпфирующие свойства трансмиссии энергетического средства.

Аналитические исследования математических моделей сельскохозяйственных агрегатов [5] на базе тракторов класса 5 (рисунок 1) показали, что упругодемпфирующий механизм (УДМ) в трансмиссии энергетического средства [2, 5] способствует улучшению показателей разгона МТА.

- — — — — серийный трактор;
- — — — — трактор-макет;
- 1, 2 – угловые скорости вращения вала двигателя и первичного вала коробки передач;
- 3 – ведущий момент;
- 4 – коэффициент буксования

Рисунок 1 – Показатели разгона МТА с опытной и серийной трансмиссиями



При разгоне МТА на базе энергетического средства с серийной трансмиссией наблюдается в течение двух секунд существенное снижение угловой скорости коленчатого вала двигателя (кривая 1). При разгоне агрегата на базе трактора-макета с упругодемпфирующим механизмом в трансмиссии угловая скорость коленчатого вала двигателя также снижается, но по сравнению с серийным энергетическим средством она несколько выше (на 12 рад/с). Это объясняется тем, что УДМ способствует снижению влияния колебаний ведущего момента упругой связи на характер работы двигателя. Длительность первой фазы разгона, при которой наступает равенство угловых скоростей коленчатого вала двигателя и первичного вала коробки передач (кривая 2), для обоих вариантов практически одинакова – 3,5...4,0 с.

Ведущий момент упругой связи в МТА с серийной трансмиссией энергетического средства (кривая 3) в начальный период разгона резко увеличивается, а затем уменьшается до установившейся величины в течение четырёх секунд. Коэффициентом динамичности [5], с помощью которого оценивают динамические нагрузки на двигатель, при разгоне сельскохозяйственного агрегата на базе серийного трактора класса 5 равен 2,8.

В опытной трансмиссии энергетического средства ведущий момент упругой связи имеет сглаженный характер (объясняется работой дросселя и предохранительного клапана), максимальное его значение на 24,5% меньше при таком же установившемся значении, как в серийном варианте (коэффициент динамичности равен 2,2).

Максимальное значение буксования ведущих колёс энергетического средства, определённого при аналитических исследованиях, у МТА на базе серийного трактора (рисунок 1, кривая 4) составляет 27 %, и это больше, чем у МТА с УДМ в трансмиссии трактора (24 %). Значение буксования при установившемся режиме работы равно 3...4 % для обоих вариантов.

По данным аналитических исследований работа трения муфты сцепления значительно ниже для трактора с УДМ в трансмиссии (207,5 кДж для серийной трансмиссии и 154,3 кДж для опытной трансмиссии).

Аналитические исследования разгона МТА с различными вариантами трансмиссий энергетических средств класса 5 показали, что:

- при разгоне МТА с УДМ в трансмиссии минимальное значение угловой скорости коленчатого вала двигателя на 6,4% больше, чем в серийном варианте;

- характер изменения ведущего момента упругой связи при наличии УДМ в трансмиссии энергетического средства отличается плавностью без наличия значительного «выброса», а максимальное значение этого момента на 24,5% меньше, чем у серийного трактора;

- динамические нагрузки в трансмиссии энергетического средства с УДМ снижаются до 25,3 %;

- при установке УДМ в трансмиссию энергетического средства уменьшается значение максимального буксования ведущих колёс и обеспечивается более плавное, по сравнению с исходным агрегатом, изменение кривой буксования.

Так как на показатели разгона МТА с УДМ в трансмиссии трактора определяющими являются объём пневмогидроаккумулятора и площадь сечения дросселя, были определены их оптимальные значения.

Проведённые экспериментальные исследования [4, 6] показали, что значения основных показателей разгона машинно-тракторного агрегата (минимальная угловая скорость коленчатого вала двигателя ω_{\min} , время разгона агрегата T_p и ведущий момент упругой связи M), являющихся случайными величинами, меняются в широких пределах в зависимости от объёма пневмогидроаккумулятора и значения проходного сечения дросселя, поэтому объективная их оценка влияния на разгон МТА может быть получена с помощью статистического анализа.

Оптимальный объём пневмогидроаккумулятора был определён на основе статистического анализа данных его влияния на время разгона T_p , минимальную угловую скорость коленчатого вала двигателя ω_{\min} и работу трения муфты сцепления L_{mp} , предположив, что закон распределения исследуемой величины – нормальный. Для этого были использованы приведённые в таблице 1 экспериментальные данные.

Таблица 1 – Показатели разгона МТА от объёма пневмогидроаккумулятора

Показатели	Объём аккумулятора, м ³				
	0	0,79·10 ⁻³	1,71·10 ⁻³	3,71·10 ⁻³	5,77·10 ⁻³
Среднее \bar{T}_p	4,5	5,0	6,5	7,8	7,5
Дисперсия S_T^2	0,25	0,09	0,46	0,05	0,80
Средняя $\bar{\omega}_{\min}$	115	122	123	124	128
Дисперсия S_ω^2	2,0	7,0	19,3	5,5	5,5
Средний \bar{M}_{\max}	154	119	122	117	109
Дисперсия S_M^2	16,0	2,0	4,6	2,5	24,5

Расчёты, проведённые на основе данных таблицы 1, подтвердили гипотезы о нормальном законе распределения (по критерию ω^2 Мизеса) и однородности дисперсий (по критерий Бартлета), что дало право проведения дисперсионного анализа по оценке влияния объёма пневмогидроаккумулятора на угловую скорость коленчатого вала двигателя ω_{\min} с помощью критерия Фишера F (таблица 2) [5].

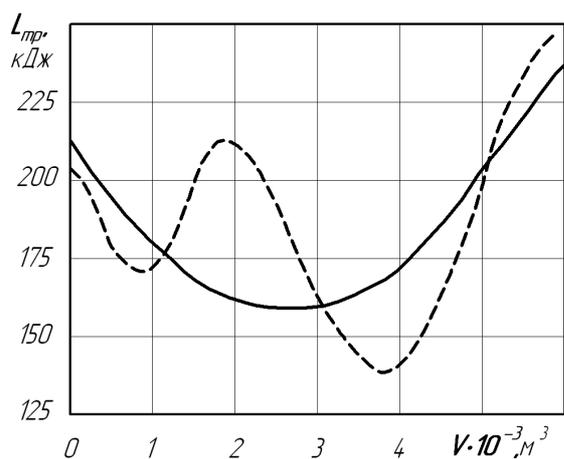
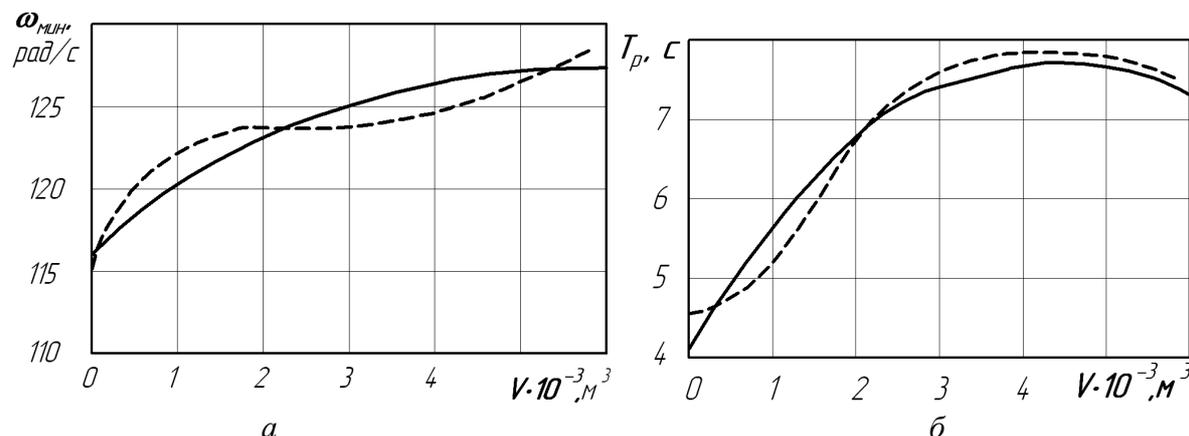
Таблица 2 – Зависимость минимальной угловой скорости коленчатого вала двигателя от объёма пневмогидроаккумулятора

№ серии	Объём аккумулятора V_i , дм ³	Число опытов	Математическое ожидание ω_{\min} , рад/с	Дисперсия S_{li}^2
1	0	5	115	2,0
2	0,79	3	122	7,0
3	1,71	4	123	19,3
4	3,71	5	124	5,5
5	5,77	5	128	5,5

Зависимость минимальной угловой скоростью коленчатого вала двигателя ω_{\min} от объёма пневмогидроаккумулятора V_i описывается следующим уравнением регрессии:

$$\omega_{\min} = 116,94741 + 3,59307 \cdot V - 0,31186 \cdot V^2. \quad (1)$$

Анализ уравнения (1) показал, что наилучшие результаты разгона МТА по величине минимальной угловой скорости двигателя ω_{\min} будут получены при полном объёме пневмогидроаккумулятора (рисунок 2 а).



— кривые регрессии;
 - - - экспериментальные данные

Рисунок 2 – Зависимость минимальной угловой скорости вала двигателя, времени разгона и работы трения муфты сцепления энергетического средства класса 5 от объёма пневмогидроаккумулятора

Взаимосвязь между продолжительностью разгона агрегата и объёмом пневмогидроаккумулятора, установленная на основе данных таблицы 1, описывается следующим уравнением регрессии:

$$T_p = 4,26896 + 1,54716 \cdot V - 0,16954 \cdot V^2. \quad (2)$$

Анализ кривой регрессии (рисунок 2 б) показывает, что оптимальное значение объёма аккумулятора $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, при котором обеспечивается самая большая плавность разгона агрегата.

Дисперсионный анализ, проведённый с помощью критерия Фишера F по данным таблицы 3, показывает на значительное влияние объёма пнев-

могидроаккумулятора на работу трения муфты сцепления, описываемое уравнением регрессии:

$$L_{mp} = 210,6025 - 38,16776 \cdot V + 7,33607 \cdot V^2. \quad (3)$$

Таблица 3 – Зависимость работы трения муфты сцепления при разгоне трактора класса 5 от объёма пневмогидроаккумулятора V_i

Серия опытов	$V_i \cdot 10^3$ м ³	Число опытов	Математическое ожидание работы трения L_{mp} , кДж	Оценка условных дисперсий S_{li}^2 , кДж
1	0	5	202	2,5
2	0,79	3	173	4,0
3	1,71	4	211	4,6
4	3,71	5	136	3,5
5	5,77	5	245	0,5

Как показывает решение уравнения регрессии (3) (рисунок 2 в), оптимальное значение объёма пневмогидроаккумулятора, которое соответствует минимальной работе трения муфты сцепления, равно $3 \cdot 10^{-3}$ м³.

Учитывая решение уравнений (1) и (2), а также данные экспериментальных исследований, оптимальный объём пневмогидроаккумулятора будет находиться в пределах $(3...4) \cdot 10^{-3}$ м³.

Оптимальное значение площади сечения дросселя достаточно определить при оценке влияния этого параметра на минимальную угловую скорость коленчатого вала двигателя ω_{min} с помощью дисперсионного и регрессионного анализов результатов экспериментальных исследований разгона МТА, представленных в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость минимальной угловой скорости коленчатого вала двигателя ω_{min} от площади сечения дросселя f_i .

Площадь сечения дросселя $f_i \cdot 10^5$, м ²	Число опытов	Математическое ожидание ω_{min} , рад/с	Условная дисперсия
3,2	5	157	0,5
4,1	5	154	2,5
5,0	5	149	1,5
6,5	5	146	2,5

Так как критерий Кохрана подтверждает однородность ряда дисперсий, а критерий Фишера – гипотезу о значительном влиянии площади се-

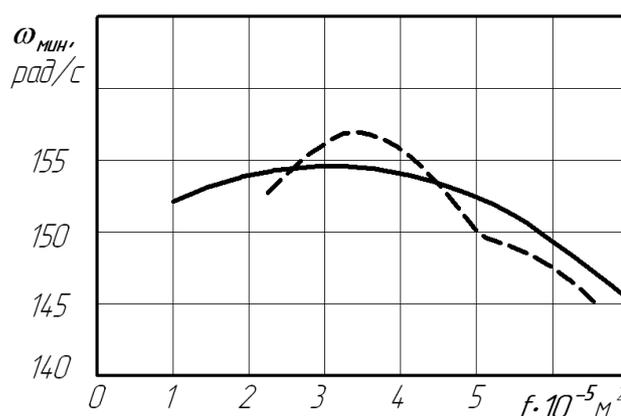
чения дросселя f_i на минимальную угловую скорость коленчатого вала двигателя ω_{\min} при разгоне сельскохозяйственного агрегата, получим на основании данных таблицы 3 уравнение регрессии в следующем виде:

$$\omega_{\min} = 149,67648 + 0,35883f - 0,06538f^2. \quad (4)$$

Решение уравнения регрессии (4) показало, что оптимальная площадь сечения дросселя является $f = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, что соответствует минимальному снижению угловой скорости коленчатого вала двигателя при разгоне МТА (рисунок 3).

— — — — — кривая регрессии;
 - - - - - экспериментальные данные

Рисунок 3 – Зависимость минимальной угловой скорости коленчатого вала двигателя от площади сечения дросселя



Оценка результатов процесса разгона МТА обычно проводится по диаграммам ведущего момента, угловой скорости коленчатого вала двигателя и работы муфты сцепления и сопровождается снижением, построенным по результатам экспериментальных исследований [3, 7].

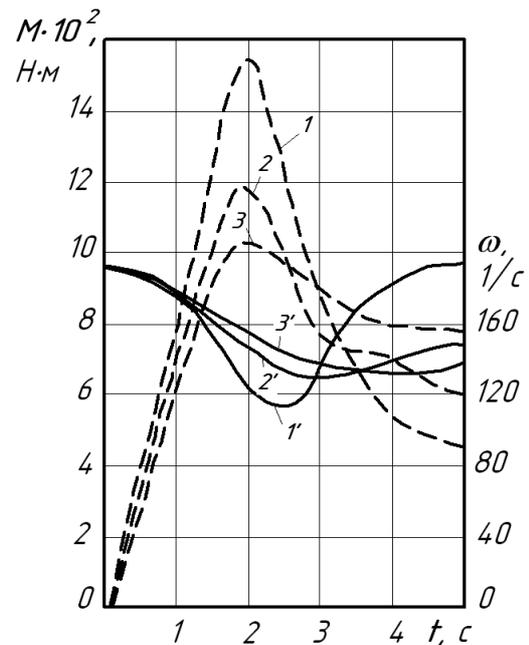
Для определения вышеперечисленных показателей были проведены экспериментальные исследования процесса разгона агрегата на базе опытного энергетического средства класса 5 с различными объемами пневмогидроаккумулятора (таблица 4 и рисунок 4).

Таблица 4 – Показатели разгона агрегата на базе энергетического средства класса 5 с УДМ в трансмиссии

Показатели	Объём, л				
	0	0,79	1,71	3,71	5,77
Продолжительность первой фазы, с	2,3	4,5	5,8	5,7	5,8
Продолжительность второй фазы, с	2,2	0,5	0,7	1,8	1,5
Общее время разгона, с	4,5	5,0	6,5	7,3	7,2
Минимальная угловая скорость вала двигателя, с ⁻¹	113	120	122	125	130
Максимальный ведущий момент, Н·м	1560	1150	1200	1100	1060
Удельная работа трения муфты сцепления, Дж/м ²	1875	384	364	240	440

1 – при $V=0$ (серийный вариант);
 2 – при $V=1,71$ л; 3 – при $V=5,77$ л;

Рисунок 4 – Зависимости ведущего момента M (----) и угловой скорости коленчатого вала двигателя $\omega_{мин}$ (—) от времени разгона при различных объёмах пневмогидроаккумулятора



Анализ аналитических и экспериментальных исследований (таблица 4, рисунок 4) показывает, что при установке УДМ в трансмиссию энергетического средства по сравнению с разгоном серийного агрегата уменьшается на 30...47% «выброс» момента двигателя, увеличивается минимальная угловая скорость коленчатого вала двигателя $\omega_{мин}$ до 15%, снижается работа трения муфты сцепления. Минимальная работа трения муфты сцепления наблюдается при объёме пневмогидроаккумулятора $V=(3...4) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при оптимальном значении площади сечения дросселя $f=3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Сравнение полученных данных полностью подтверждает положительное влияние упругодемпфирующего механизма, устанавливаемого в трансмиссии энергетического средства класса 5, на динамические показатели разгона машинно-тракторного агрегата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтинский, В.Н. Разгон МТА на повышенных скоростях / В.Н. Болтинский // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1961. – № 3. – С. 1...8.
2. Кравченко, В.А. Влияние упругодемпфирующего механизма на показатели пахотного агрегата на базе трактора класса 1,4 / В.А. Кравченко, В.В. Дурягина. // Вестник аграрной науки Дона. – 2015. – № 3 (31). С. 13...21.
3. Кравченко, В.А. Исследование процесса разгона машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4 с переменной вращающейся массой двигателя/ В.А. Кравченко // Поли-

тематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – № 113. – IDA: 1131509077 / Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/77.pdf>. – С.1060...1070.

4. Кравченко, В.А. Математическое моделирование тяговой нагрузки МТА / В.А. Кравченко, В.В. Дурягина, И.Э. Гамолина. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 101. – IDA: 1011407024 / Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/24.pdf>. – С. 459...472.

5. Кравченко, В.А. Повышение эффективности машинно-тракторных агрегатов на базе колёсных тракторов / В.А. Кравченко, В.А. Оберемок, Л.В. Кравченко // Технология колёсных и гусеничных машин. – 2014. – № 6 (16). С. 45...49.

6. Кравченко, В.А. Результаты испытаний машинно-тракторных агрегатов на базе трактора класса 1,4 с переменной вращающейся массой двигателя / В.А. Кравченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 99 (05). – IDA: 0991405015. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/15/pdf/24.pdf>. – С. 223...233.

7. Кутьков, Г.М. Теория трактора и автомобиля / Г.М. Кутьков. – Москва: Колос, 1996. – 287 с.

REFERENCES

1. Boltinskij, V.N. Razgon MTA na povyshennyh skorostjah / V.N. Boltinskij // Mehanizacija i jelektrifikacija socialisticheskogo sel'skogo hozjajstva. 1961, No 3, pp. 1...8.

2. Kravchenko, V.A. Vlijanie uprugodempfirujushhego mehanizma na pokazateli pahotnogo agregata na baze traktora klassa 1,4 / V.A. Kravchenko, V.V. Durjagina. // Vestnik agrarnoj nauki Dona. 2015, No 3 (31), pp. 13...21.

3. Kravchenko, V.A. Issledovanie processa razgona mashinno-traktornogo agregata na baze traktora klassa 1,4 s peremennoj vrashhajushhejsja massoj dvigatelja/ V.A. Kravchenko // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2015, No 113. IDA: 1131509077 / Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/77.pdf>. pp.1060...1070.

4. Kravchenko, V.A. Matematicheskoe modelirovanie tjagovoj nagruzki MTA / V.A. Kravchenko, V.V. Durjagina, I.Je. Gamolina. // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2014. No 101. IDA: 1011407024 / Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/24.pdf>. pp. 459...472.

5. Kravchenko, V.A. Povysenie jeffektivnosti mashinno-traktornyh agregatov na baze koljosnyh traktorov / V.A. Kravchenko, V.A. Oberemok, L.V. Kravchenko // Tehnologija koljosnyh i gusenichnyh mashin. 2014, No 6 (16), pp. 45...49.

6. Kravchenko, V.A. Rezul'taty ispytanij mashinno-traktornyh agregatov na baze traktora klassa 1,4 s peremennoj vrashhajushhejsja massoj dvigatelja / V.A. Kravchenko // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2014. No 99 (05). IDA: 0991405015. / Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/15/pdf/24.pdf>. pp. 223...233.

7. Kut'kov, G.M. Teorija traktora i avtomobilja / G.M. Kut'kov. – Moskva: Kolos, 1996. – 287 s.