

УДК 631.372-621.453.3

Влияние случайной нагрузки на эффективную мощность газотурбинного и дизельного двигателей в составе почвообрабатывающих агрегатов**Influence of accidental load on the effective power of gas-turbine and diesel engines being a part of soil cultivating units**

В. С. ШКРАБАК¹, д-р техн. наук
Н. И. ДЖАББОРОВ², д-р техн. наук
Д. С. ФЕДЬКИН², канд. техн. наук
Р. В. ШКРАБАК¹, канд. техн. наук

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург — Пушкин, Россия, v.shkrabak@mail.ru

² Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Россия, nozimjon-59@mail.ru

V. S. SHKRABAK¹, DSc in Engineering
N. I. DZHABBOROV², DSc in Engineering
D. S. FED'KIN², PhD in Engineering
R. V. SHKRABAK¹, PhD in Engineering

¹ Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg — Pushkin, Russia, v.shkrabak@mail.ru

² Institute for Agricultural Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Saint Petersburg, Tyarlevo, Russia, nozimjon-59@mail.ru

Исследованы закономерности изменения эффективной мощности газотурбинного двигателя ГТД-350Т, двигателя постоянной мощности Д-260.4С2 и дизельного двигателя СМД-62 в зависимости от внешней нагрузки и коэффициента ее вариации. Проведена сравнительная оценка эффективности применения этих двигателей на тракторах в агрегате с почвообрабатывающими машинами, получены экспериментальные данные. При исследовании работы двигателей применялись методы математического моделирования и вероятностно-статистической оценки эксплуатационных показателей почвообрабатывающих агрегатов. Получены зависимости экстремальных значений эффективной мощности двигателей СМД-62, Д-260.4С2 и ГТД-350Т от крутящего момента и коэффициента вариации нагрузки. Установлены экстремальные значения уровня использования эффективной мощности рассматриваемых двигателей в зависимости от коэффициента вариации нагрузки. Исследования показали, что кусочно-линейная характеристика двигателей постоянной мощности более рациональна, чем кусочно-параболическая характеристика дизельных двигателей. Параболическая характеристика газотурбинных двигателей — самая эффективная и менее чувствительная к колебаниям внешней нагрузки. Применение газотурбинных двигателей на тракторах отвечает техническим и технологическим требованиям к сельскохозяйственной технике и имеет большие перспективы. Газотурбинные двигатели могут обеспечить конкурентоспособность отечественных тракторов благодаря повышению их производительности и надежности в 1,2—1,3 раза, снижению затрат труда на 15—20 %, повышению производительности труда в среднем на 18—22 % по сравнению с тракторами, оснащенными дизельными двигателями.

Ключевые слова: крутящий момент на валу двигателя; коэффициент приспособляемости; стендовая характеристика; эффективная мощность; газотурбинный двигатель; двигатель постоянной мощности; дизельный двигатель; технологический процесс; коэффициент вариации нагрузки.

The regularities of effective power change of gas-turbine engine (GTD-350T), constant power engine (D-260.4S2) and diesel engine (SMD-62), depending on external load and the coefficient of its variation are investigated. The comparative estimation of efficiency of these engines' application on tractors in aggregate with soil cultivating machines is carried out; experimental data is received. The methods of mathematical modeling and probabilistic-statistical estimation of the operational parameters of soil cultivating units are applied. The dependencies of extreme values of effective power of abovementioned engines on the shaft torque and coefficient of load variation are obtained. The studies show that the piecewise-linear characteristic of constant power engines is more rational than the piecewise parabolic characteristic of diesel engines. The parabolic characteristic of gas-turbine engines is the most effective one and less sensitive to the fluctuations of external load. The application of gas-turbine engines on tractors meets the technical and technological requirements for agricultural machinery. The gas-turbine engines can improve the competitiveness of domestic tractors by 1.2—1.3 times, reduce the expenditure of labor by 15—20 %, increase the productivity of labor on average by 18—22 % compared with tractors equipped with diesel engines.

Keywords: engine shaft torque; coefficient of flexibility; test-bench characteristic; effective power; gas-turbine engine; constant power engine; diesel engine; technological process; coefficient of load variation.

Введение

Колебательный характер внешней нагрузки — основная причина ухудшения энергетических параметров и технико-экономических показателей работы машинно-тракторных агрегатов (МТА) [1–3].

Учет колебаний внешней нагрузки и ее влияния на основные эксплуатационные показатели позволяет обосновать и достоверно прогнозировать рациональные параметры и режимы работы МТА.

Цель исследования

Исследование проведено с целью определения степени влияния случайной нагрузки на эффективную мощность газотурбинного двигателя (ГТД) с параболической нагрузочной характеристикой, двигателя постоянной мощности (ДПМ) с кусочно-линейной характеристикой и обычного дизельного двигателя с кусочно-параболической характеристикой, а также с целью сравнительной оценки эффективности применения указанных двигателей на тракторах в агрегате с почвообрабатывающими машинами.

Предмет исследования — закономерности изменения эффективной мощности газотурбинного двигателя ГТД-350Т, двигателя постоянной мощности Д-260.4S2 и дизельного двигателя СМД-62 в зависимости от внешней нагрузки и коэффициента ее вариации.

Материалы и методы

Получены экспериментальные данные по результатам лабораторно-полевых исследований работы пахотных агрегатов с тракторами, оснащенными дизельным двигателем, ДПМ и ГТД.

При исследовании работы двигателей в составе почвообрабатывающих агрегатов применялись методы ма-

тематического моделирования и вероятностно-статистической оценки эксплуатационных показателей технических средств. Для определения влияния колебаний внешней нагрузки на эксплуатационные показатели МТА в основном применялся метод функции случайных аргументов [1].

Результаты и их обсуждение

Взаимосвязь между входными и выходными переменными определяется функциями, устанавливаемыми при аппроксимации стеновых нагрузочных характеристик двигателей (рис. 1).

В качестве входной переменной (аргумента) рассматриваются крутящие моменты M_T на валу тяговой турбины ГТД и M_K на коленчатом валу двигателей СМД-62 и Д-260.4S2.

В общем случае плотность распределения вероятностей аргумента определяется зависимостью [1]:

$$\varphi(X) = (\sigma_X \sqrt{2\pi})^{-1} \exp[-(X - m)^2 / (2\sigma_X^2)], \quad (1)$$

где m — математическое ожидание (среднее значение) входного параметра; σ_X — среднее квадратическое отклонение входного параметра; X — значение входного параметра.

В общем случае математическое ожидание выходных показателей МТА определяется по формуле [1, 2]:

$$\bar{Y} = \int_{-\infty}^{\infty} Y\varphi(Y)dY = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x)dx, \quad (2)$$

где $\varphi(Y) = \varphi(x)|dx/dY|$ — плотность распределения вероятностей случайной величины Y (выходного параметра); $\varphi(x)$ — плотность распределения случайной величины x (входного параметра).

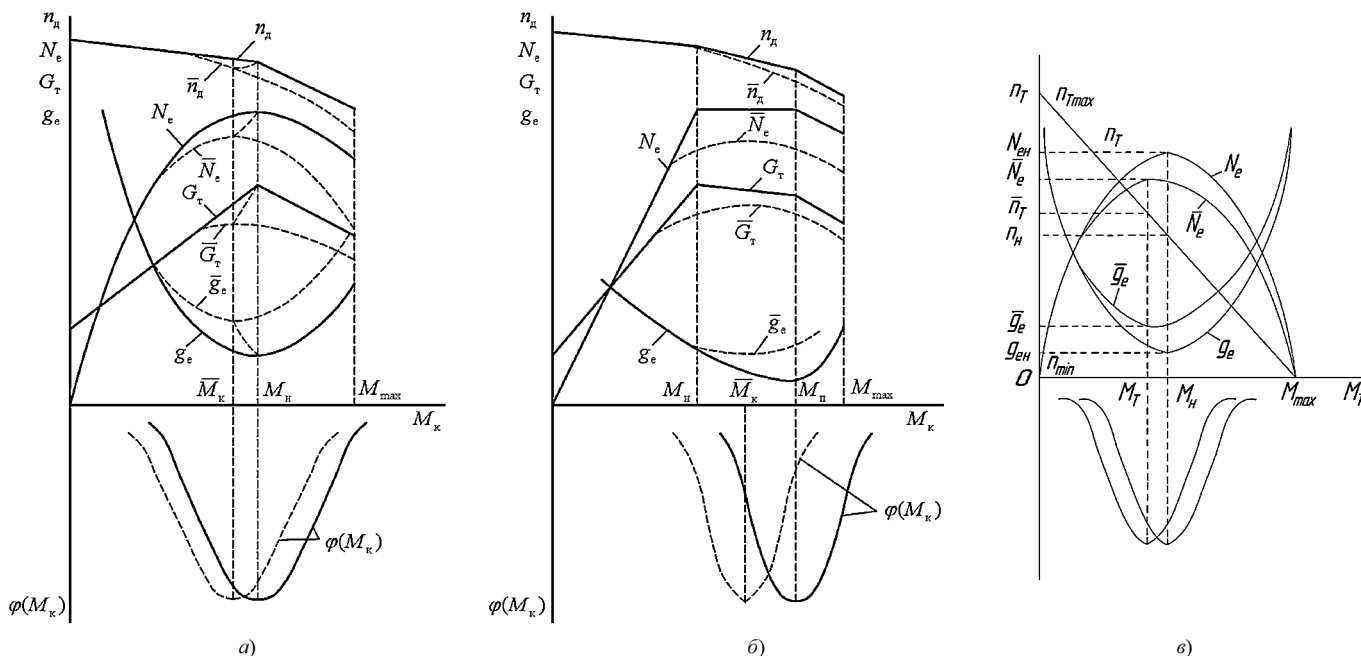


Рис. 1. Схемы к определению энергетических параметров двигателей:

а — для дизельного двигателя СМД-62; б — для двигателя постоянной мощности Д-260.4S2; в — для газотурбинного двигателя ГТД-350Т; n_d — частота вращения вала двигателя; N_e — эффективная мощность двигателя; G_T — часовой расход топлива; g_e — удельный эффективный расход топлива; $\varphi(M_K)$ — плотность распределения вероятностей крутящего момента M_K на валу двигателя; n_T — частота вращения тяговой турбины; M_T — крутящий момент на валу тяговой турбины

Таблица 1

**Постоянные величины и угловые коэффициенты энергетических параметров дизельного двигателя СМД-62
(для определения эффективной мощности и частоты вращения коленчатого вала двигателя)**

A_1^*	A_2^*	B_1^*	B_2^*	a^*	a_1^*	b^*	b_1^*
2280	6160	-0,3261	-7,3551	8440	3880	-7,6812	-7,029

Таблица 2

Постоянные величины и угловые коэффициенты энергетических параметров двигателя постоянной мощности Д-260.4S2

Эффективная мощность											
A_1^*	A_2^*	A_3^*	B_1^*	B_2^*	B_3^*	a^*	a_1^*	a_2^*	b^*	b_1^*	b_2^*
0	147,4	409,2	0,207	0	-0,308	409,2	-147,4	-261,8	-0,101	0,207	0,308
Частота вращения коленчатого вала											
A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	a	a_1	a_2	b	b_1	b_2
2167	3490,508	5990	-0,301	-2,159	-5,1	8157	-1323,507	-2449,493	-5,40056	1,859	2,941

Рассмотрим влияние колебаний внешней нагрузки на эффективную мощность (выходной показатель) дизельного двигателя СМД-62 с кусочно-параболической нагрузочной характеристикой, двигателя постоянной мощности Д-260.4S2 с кусочно-линейной характеристикой и газотурбинного двигателя ГТД-350Т с параболической характеристикой в составе почвообрабатывающих агрегатов с тракторами Т-150К, МТЗ-2022 и газотурбинным трактором типа "Кировец" (ГТТ).

Математическое ожидание эффективной мощности дизельного двигателя СМД-62, зависящее от случайного аргумента — крутящего момента $\bar{M}_K$, с учетом рис. 1, a и выражений (1) и (2) определим по формуле [1, 3]:

$$\bar{N}_e = c\{0,5[a^* + b^* \bar{M}_K + b^* \bar{M}_K^2(1 + v_M^2)] - [a_1^* \bar{M}_K + b_1^* \bar{M}_K^2(1 + v_M^2)\Phi(t_H) + b_1^* \Phi(t_H) \bar{M}_K^2 v_M]\},$$

где $c = 9554^{-1}$ — коэффициент; a^*, a_1^*, b^*, b_1^* — постоянные величины и угловые коэффициенты, устанавливаемые по стендовой характеристике двигателя (табл. 1); $\bar{M}_K$ — математическое ожидание крутящего момента на валу двигателя, Н·м; $\Phi(t_H), \varphi(t_H)$ — интегральная функция Лапласа и плотность распределения вероятностей аргумента t_H ; v_M — коэффициент вариации (мера рассеяния) нагрузки M_K .

$$v_M = \sigma_M / \bar{M}_K,$$

где σ_M — среднее квадратическое отклонение параметра M_K .

$$t_H = (M_H - \bar{M}_K) / \sigma_M, \text{ или } t_H = (M_H - \bar{M}_K) / \bar{M}_K v_M.$$

Математическое ожидание эффективной мощности двигателя Д-260.4S2 с учетом рис. 1, b и выражений (1) и (2) можно определить по формуле [3, 4]:

$$\bar{N}_e = 0,5(a^* + b^* \bar{M}_K) + (a_1^* + b_1^* \bar{M}_K)\Phi(t_H) + (a_2^* + b_2^* \bar{M}_K)\Phi(t_H) - v_M \bar{M}_K [b_1^* \varphi(t_H) + b_2^* \varphi(t_H)],$$

где $a^*, a_1^*, a_2^*, b^*, b_1^*, b_2^*$ — постоянные величины и угловые коэффициенты эффективной мощности ДПМ (табл. 2); $\Phi(t_H), \Phi(t_H)$ — интегральные функции Лапласа; $\varphi(t_H), \varphi(t_H)$ — плотности распределения вероятностей аргументов t_H и t_H .

Математическое ожидание эффективной мощности двигателя ГТД-350Т с учетом рис. 1, a и выражений (1) и (2) можно определить по зависимости [2, 3]:

$$\bar{N}_e = c[A \bar{M}_T + B \bar{M}_T^2(1 + v_M^2)],$$

где $c = 9554^{-1}$; A, B — коэффициенты (табл. 3); v_M — коэффициент вариации нагрузки M_T .

Вероятностный коэффициент $\lambda_{\bar{N}_e}$, учитывающий изменения эффективной мощности двигателей при колебательном характере нагрузки, определяется отношением [1]:

$$\lambda_{\bar{N}_e} = \frac{\bar{N}_e}{N_{en}}.$$

Экстремальные (максимальные) значения эффективной мощности рассматриваемых двигателей определялись методом последовательного приближения с помощью программ для ЭВМ [4, 5].

Таблица 3

Основные параметры, установленные по типовым характеристикам газотурбинного двигателя ГТД-350Т

$\lambda_{\bar{n}_T}$	μ	$A, \text{ мин}^{-1}$	$B, \text{ мин}^{-1}/(\text{Н} \cdot \text{м})$	$N_{en}, \text{ кВт}$
1	2,04	10 820	-11,79	260
0,95	2,045	10 285	-12,24	226

Примечание: $\lambda_{\bar{n}_T} = \bar{n}_T / n_{TH}$ — уровень реализации частоты вращения вала тяговой турбины; $\bar{n}_T, n_{TH}$ — текущее и номинальное значения частоты вращения вала тяговой турбины, мин^{-1} ; $\mu = M_{max} / M_H$ — кратность моментов, или коэффициент приспособляемости ГТД.

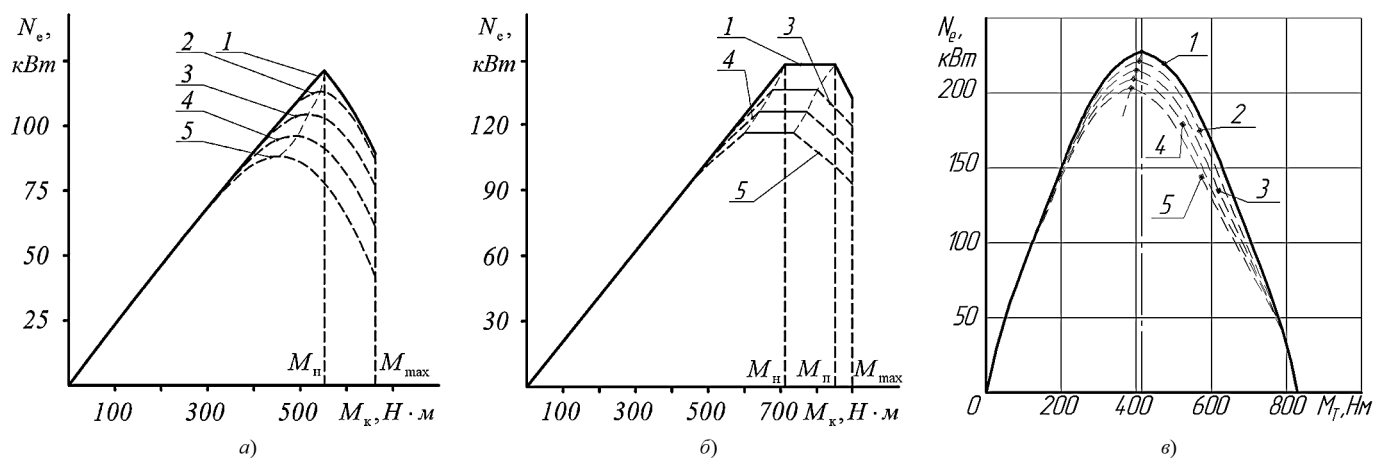


Рис. 2. Зависимости экстремальных значений эффективной мощности двигателей от крутящего момента M_k на их валах (M_T на валу тяговой турбины для ГТД) при различных значениях вариации нагрузки v_M :

а — для СМД-62; б — для Д-260.4S2; в — для ГТД-350Т; 1 — $v_M = 0$; 2 — $v_M = 0,083$; 3 — $v_M = 0,167$; 4 — $v_M = 0,25$; 5 — $v_M = 0,333$

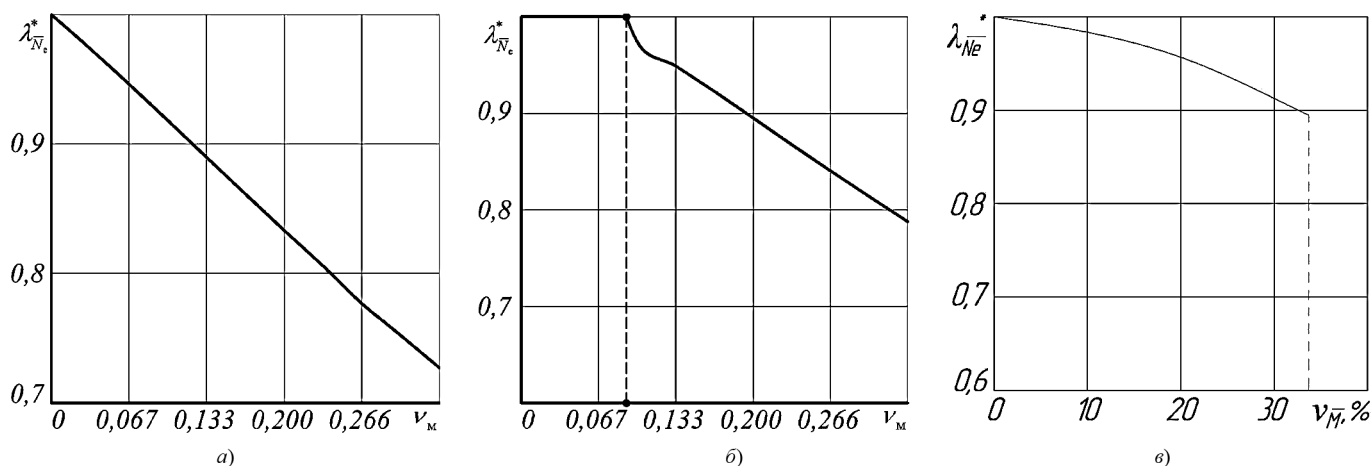


Рис. 3. Зависимости экстремальных значений уровня использования эффективной мощности двигателя $\lambda_{N_e}^*$ от коэффициента вариации нагрузки v_M почвообрабатывающего агрегата:

а — для двигателя СМД-62 в агрегате Т-150К + ПН-5-35; б — для двигателя Д-260.4S2 в агрегате МТЗ-2022 + ППН-8.30/50; в — для ГТД-350Т в агрегате ГТТ + ПНИ-8/9-40

На рис. 2 представлены графические зависимости изменения экстремальных значений эффективной мощности двигателей СМД-62, Д-260.4S2 и ГТД-350Т от нагрузки (момента на валу двигателя).

На рис. 3 представлены зависимости экстремальных значений уровня использования эффективной мощности $\lambda_{N_e}^*$ двигателей СМД-62, Д-260.4S2 и ГТД-350Т в составе почвообрабатывающих агрегатов Т-150К + ПН-5-35, МТЗ-2022 + ППН-8.30/50 и ГТТ + ПНИ-8/9-40.

Результаты исследований показывают, что при колебательном характере внешней нагрузки экстремальные значения уровня использования эффективной мощности двигателей изменяются в следующих пределах (при $0 \leq v_M \leq 0,333$):

— для СМД-62 с кусочно-параболической нагрузочной характеристикой $\lambda_{N_e}^* = 1...0,721$;

— для Д-260.4S2 с кусочно-линейной нагрузочной характеристикой $\lambda_{N_e}^* = 1...0,79$;

— для ГТД-350Т с параболической нагрузочной характеристикой $\lambda_{N_e}^* = 1...0,896$.

Установленные экстремальные значения вероятностного коэффициента $\lambda_{N_e}^*$ также характеризуют потери мощности двигателя от колебаний внешней нагрузки. При максимальном значении коэффициента вариации нагрузки $v_M = 0,333$ эффективная мощность снижается относительно номинального значения: для СМД-62 на 27,9 %; для Д-260.4S2 на 21 %; для ГТД-350Т на 10,4 %.

Выводы

Анализ представленного материала показывает, что кусочно-линейная нагрузочная характеристика ДПМ более рациональна, чем кусочно-параболическая нагру-

зочная характеристика дизельных двигателей. Параболическую нагрузочную характеристику ГТД следует считать самой эффективной и менее чувствительной к колебаниям внешней нагрузки МТА. Эта нагрузка не оказывает непосредственного влияния на процессы в камере сгорания ГТД, так как между роторами турбины компрессора и тяговой турбины существует только газодинамическая связь. Это свидетельствует о том, что применение ГТД на тракторах имеет большие перспективы и позволяет повысить производительность МТА, особенно на энергоемких процессах обработки почвы, в среднем на 18-22 % по сравнению с тракторами, оснащенными дизельными двигателями.

Применение ГТД на тракторах отвечает техническим и технологическим требованиям к с.-х. технике, используемой в растениеводстве и его подотросях.

Тракторы с ГТД по сравнению с тракторами, оснащенными дизельными двигателями, обеспечивают конкурентоспособность отечественных технических средств за счет повышения их производительности и надежности в 1,2—1,3 раза, снижения затрат труда на 15—20 %, повышения уровня энергоэффективности с.-х. производства, что предусмотрено "Государственной программой развития сельского хозяйства" и "Стратегией машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года".

Литература и источники

1. Агеев Л. Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. Л.: Колос, Ленингр. отд-ние, 1978. 296 с.
2. Агеев Л. Е., Шкрабак В. С., Моргулис-Якушев В. Ю. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения. Л.: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. 415 с.
3. Джабборов Н. И. Научные основы энерго-технологической оценки и прогнозирования эффективности использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов. Душанбе: Дониш, 1995. 286 с.

4. Джабборов Н. И., Эвиев В. А., Очиров Н. Г. Оптимальная зона функционирования ДПМ по эффективной мощности // Тракторы и сельхозмашины. 2012, № 5. С. 23—25.

5. Добринов А. В., Попов В. Д., Джабборов Н. И. и др. Расчет и оптимизация энергетических параметров МТА, оснащенных ДПМ. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613646. М.: Роспатент, 2010.

6. Добринов А. В., Попов В. Д., Джабборов Н. И. и др. Расчет и оптимизация энергетических параметров дизельных двигателей в составе МТА. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010615019. М.: Роспатент, 2010.

References

1. Ageev L. E. *Osnovy rascheta optimal'nykh i dopuskaemykh rezhimov raboty mashinno-traktornykh agregatov* [Bases for calculation of optimal and acceptable operation modes of machine-tractor units]. Leningrad, Kolos Publ., Leningrad branch, 1978, 296 p.
2. Ageev L. E., Shkrabak V. S., Morgulis-Yakushev V. Yu. *Sverkhmoshchnye traktory sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [High power tractors of agricultural purpose]. Leningrad, Agropromizdat Publ., Leningrad branch, 1986, 415 p.
3. Dzhabborov N. I. *Nauchnye osnovy energo-tekhnologicheskoy otsenki i prognozirovaniya effektivnosti ispol'zovaniya mobil'nykh sel'skokhozyaystvennykh agregatov* [Scientific bases of energy and technological estimation and forecasting of use efficiency of mobile agricultural units]. Dushanbe, Donish Publ., 1995, 286 p.
4. Dzhabborov N. I., Eviev V. A., Ochirov N. G. Optimal area of sustained power engine operation by the effective power criterion. *Traktory i sel'khomashiny*, 2012, no. 5, pp. 23—25 (in Russ.).
5. Dobrinov A. V., Popov V. D., Dzhabborov N. I., Dement'ev A. M. *Raschet i optimizatsiya energeticheskikh parametrov MTA, osnashchennykh DPM* [Calculation and optimization of energy parameters of machine-tractor units equipped with sustained power engines]. Certificate of registration of the computer program no. 2010613646. Moscow, Rospatent Publ., 2010.
6. Dobrinov A. V., Popov V. D., Dzhabborov N. I., Dement'ev A. M. *Raschet i optimizatsiya energeticheskikh parametrov dizel'nykh dvigateley v sostave MTA* [Calculation and optimization of energy parameters of diesel engines in machine-tractor units]. Certificate of registration of the computer program no. 2010615019. Moscow, Rospatent Publ., 2010.