

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ПАХОТНОГО АГРЕГАТА

д.т.н. Шкрабак В.С.<sup>1</sup>, д.т.н. Джаббаров Н.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБНУ Институт агроинженерных и экологических проблем  
сельскохозяйственного производства, Санкт-Петербург, Россия  
v.shkrabak@mail.ru

В статье изложена методика определения вероятностных оценок удельного расхода топлива газотурбинного двигателя в составе пахотного агрегата. При обосновании математических моделей для определения вероятностных оценок удельного расхода топлива ГТД применялся метод функции случайных аргументов профессора Л.Е. Агеева. Новизна исследований заключается в разработанных математических моделях и порядке расчета средних и оптимальных значений вероятностных оценок – математического ожидания, дисперсии, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации удельного расхода топлива газотурбинным двигателем. Для повышения точности расчетов при определении вероятностных оценок удельного расхода топлива газотурбинного двигателя предложены поправочные коэффициенты (или функции) и формулы для их определения. Математическое ожидание удельного расхода топлива, обратное к нормально распределенному аргументу, в данном случае эффективной мощности газотурбинного двигателя, не равно обратной величине математического ожидания аргумента. Данное неравенство изменяется в зависимости от коэффициента вариации эффективной мощности, что следует учитывать также при определении дисперсии и среднего квадратического отклонения удельного расхода топлива ГТД. Экспериментальные исследования пахотного агрегата, состоящего из газотурбинного трактора (ГТТ) с газотурбинным двигателем марки ГТД-350Т и навесного плуга с изменяемой шириной захвата ПНИ-8/9-40, для проверки достоверности математических моделей вероятностных оценок удельного расхода топлива ГТД проводились на полях учебно-опытного хозяйства Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. Предложенная методика позволяет определить средние и оптимальные значения математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации эффективного удельного расхода топлива ГТД в составе различных сельскохозяйственных агрегатов.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигат, удельный расход топлива, пахотный агрегат, эффективная мощность, газотурбинный трактор.

## Введение

Необходимость повышения эффективности мобильных сельскохозяйственных агрегатов вынуждает постоянно вести поиск путей, которые обеспечили бы решение проблемы. Этот поиск осуществляется по различным направлениям, в числе которых основными являются пути снижения удельного расхода топлива энергетическими установками мобильных агрегатов (их двигателями). В стране и мире постоянно ведутся работы по этой проблеме в направлении совершенствования рабочих процессов современных поршневых двигателей (карбюраторных и дизелей), которые привели к значительным результатам. Однако дальнейшее эффективное продвижение в указанном направлении все более трудоемко, дорого и

мало результативно, а порой и безрезультативно. Кроме того, ряд специалистов обоснованно считают, что потенциальные возможности поршневых двигателей в указанном направлении предельно ограничены и приближаются к их исчерпанию [1].

В связи с изложенным встает вопрос об использовании не раскрытых до конца возможностей на наземных машинах (автомобилях, тракторах, бульдозерах, погрузчиках, зерноуборочных комбайнах, различных стационарных агрегатах с переменной нагрузкой и т.п.) других типов двигателей, которые существенно лучше поршневых по комплексу показателей. В их числе массово-габаритные параметры, простота конструкции и эксплуатации, всеядность по топливу, отсутствие жидкост-

ной системы охлаждения, экологичность, близкие к идеальной тяговые характеристики, существенно (в 2–3 раза) упрощающие трансмиссию мобильных машин. Речь идет о газотурбинных двигателях (ГТД), подтвердивших свою перспективность на экспериментальных (опытных) образцах автомобилей, автобусов, тракторов в Отечестве и за рубежом. Учитывая изложенное и продолжающиеся исследования в рассматриваемом направлении, возникает необходимость рассмотрения вопросов, связанных с удельным расходом топлива ГТД.

Целью исследований является разработка математических моделей и методики определения вероятностных оценок удельного расхода топлива, обеспечивающих контроль и оценку эффективности работы сельскохозяйственных агрегатов с тракторами, оснащенными ГТД, при выполнении технологического процесса.

### Материалы и методы

Эффективность применения газотурбинного двигателя (ГТД) на тракторах сельскохозяйственного назначения доказана исследованиями

профессоров Н.С. Ждановского, А.В. Николаенко, В.С. Шкрабака, Л.Е. Агеева, Н.И. Джабборова и других ученых [1–6]. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют, что ГТД лучше, чем поршневые двигатели, приспособлены к условиям неустановившихся режимов работы различных сельскохозяйственных агрегатов. Для непрерывного контроля и оценки эффективности сельскохозяйственных агрегатов с тракторами, оснащенными ГТД, так называемыми газотурбинными тракторами (ГТТ), необходимо определить оптимальные значения удельного расхода топлива, как основного показателя оценки их экономичности. При обосновании математических моделей для определения вероятностных оценок удельного расхода топлива ГТД применялся метод функции случайных аргументов профессора Л.Е. Агеева [5].

### Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования пахотного агрегата с трактором, оснащенным газотурбинным двигателем ГТД-350Т, для подтверждения

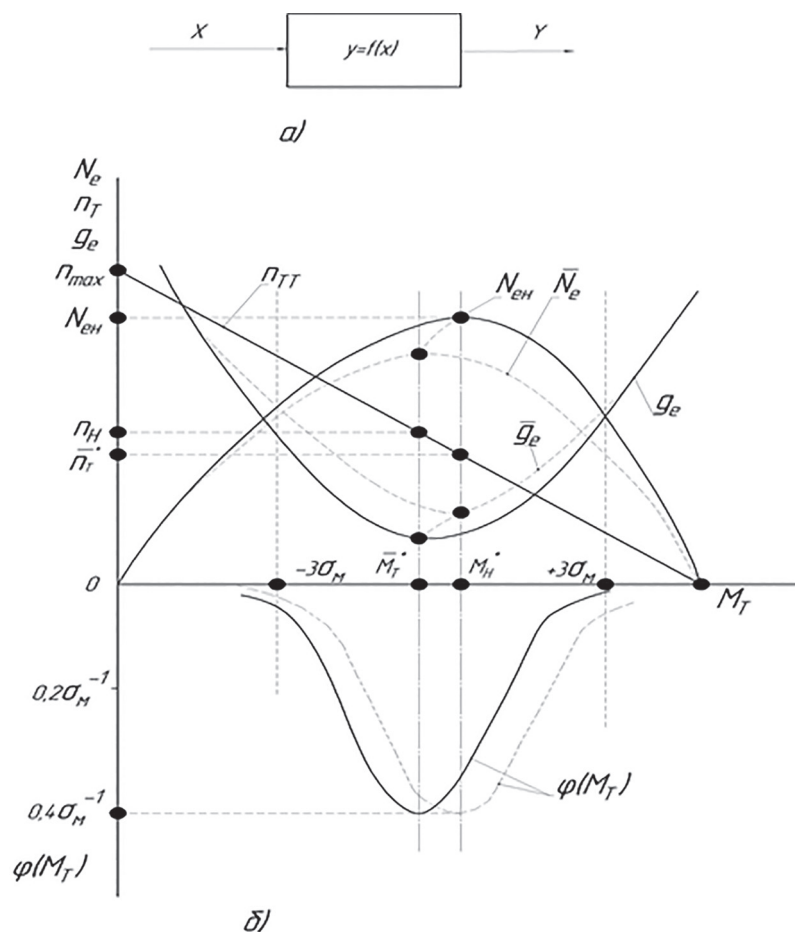


Рис. 1. Одномерная модель «вход-выход» (а) и схема (б) к определению вероятностных оценок энергетических параметров ГТД

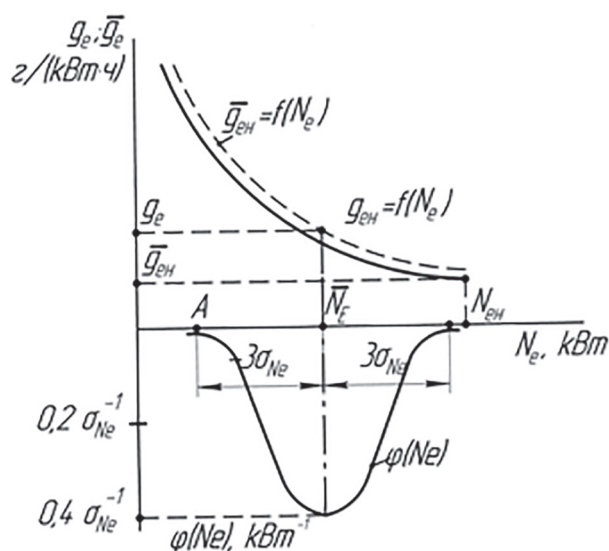


Рис. 2. Схема к определению среднего значения удельного расхода топлива ГТД при вероятностной нагрузке

достоверности разработанных математических моделей вероятностных оценок удельного расхода топлива ГТД проводились на полях учебно-опытного хозяйства Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.

В общем случае энергетические параметры ГТД можно рассматривать в виде одномерной модели с одним входным (аргументом) и одним выходным (функцией) показателем (рис. 1, а).

Основными выходными энергетическими параметрами ГТД являются частота вращения вала тяговой турбины  $n_{TT}$ , эффективная мощность двигателя  $N_e$  и удельный расход топлива  $g_e$ . Входным параметром (аргументом) является момент сопротивления  $M_T$  на валу тяговой турбины ГТД (рис. 1, б).

Для оценки экономичности ГТД в составе сельскохозяйственного агрегата применяется удельный расход топлива  $g_e$ .

1. Математическое ожидание удельного расхода топлива ГТД при вероятностной нагрузке определяется следующим образом. Когда эффективная мощность ГТД соответствует нормальному закону (закону Гаусса, рис. 2), то ее плотность вероятности распределения определяется по формуле:

$$\varphi(N_e) = (\sigma_{N_e} \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-(N_e - \bar{N}_e)^2 / (2\sigma_{N_e}^2)\right]. \quad (1)$$

С учетом выражения (1) и схемы, показанной на рисунке 2, математическое ожидание удельного расхода топлива ГТД определяется по формуле:

$$\bar{g}_e = (E C_v) / \bar{N}_e, \quad (2)$$

где  $E = 10^3 G_T$  – коэффициент, пропорциональный часовому расходу топлива  $G_T$  ГТД при постоянстве частоты вращения турбокомпрессора  $n_{TK} = \text{const}$ , кг/ч;  $C_v = (1 + v_{N_e}^2 + 3 \cdot v_{N_e}^4 + 15 \cdot v_{N_e}^6 + 105 \cdot v_{N_e}^8 + \dots)$  – вероятностный коэффициент (или функция), зависящий от коэффициента вариации эффективной мощности ГТД (рис. 3);  $\bar{N}_e = c \cdot [A \cdot \bar{M}_T + B \cdot \bar{M}_T^2 \cdot (1 + v_M^2)]$  – математическое ожидание эффективной мощности ГТД;  $c = 9554^{-1}$  – коэффициент;  $v_{N_e} = \sigma_{N_e} / N_e$  – коэффициент вариации эффективной мощности, изменяющийся в зависимости от коэффициента вариации  $v_M$  крутящего момента  $M_T$  на валу тяговой турбины ГТД;  $v_M$  – коэффициент вариации крутящего момента на валу тяговой турбины ГТД;  $v_M$  – соответственно, постоянная величина и угловой коэффициент (табл. 1).

При нормальном законе распределения эффективной мощности ГТД вероятностный коэффициент  $C_v$  изменяется от 1,0 до 1,026 при диапазоне изменения коэффициента вариации нагрузки  $0 \leq v_M \leq 0,333$ .

Из выражения (2) можно заключить, что математическое ожидание удельного расхода топлива, обратное к нормально распределенному аргументу, в данном случае эффективной мощности ГТД, не равно обратной величине математического ожидания аргумента, то есть  $M(K / N_e) \neq K / M(N_e)$ . Здесь  $K$  постоянная величина. Данное неравенство изменяется в зависимости от коэффициента вариации  $v_{N_e}$ , что следует учитывать также при определении дисперсии и среднего квадратического отклонения удельного расхода топлива ГТД.

2. Дисперсия удельного расхода топлива ГТД может быть рассчитана по формуле:

$$D(g_e) = (10^3 \cdot G_T C_v^*) / \bar{N}_e^2, \quad (3)$$

где  $C_v^*$ ,  $C_v'$ ,  $C_v$  – функции, зависящие от коэффициента вариации эффективной мощности ГТД;  $C_v^* = C_v' - C_v^2$  – функция;  $C_v = (1 + v_{N_e}^2 + 3 \cdot v_{N_e}^4 + 15 \cdot v_{N_e}^6 + 105 \cdot v_{N_e}^8 + \dots)$  – функция, рис. 3;  $C_v' = (1 + 3 \cdot v_{N_e}^2 + 15 \cdot v_{N_e}^4 + 105 \cdot v_{N_e}^6 + \dots)$  – функция, рис. 4.

3. Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{g_e}$  удельного расхода топлива ГТД можно подсчитать по формуле:

$$\sigma_{g_e} = 10^3 \cdot G_T \cdot (C_v^*)^{1/2} \cdot \bar{N}_e^{-1}. \quad (4)$$

Таблица 1

Основные параметры, установленные по типовым характеристикам ГТД-350Т

$\lambda_{\bar{n}_t}$	$\mu$	$A, \text{мин}^{-1}$	$B, \text{мин}^{-1}/(\text{Н}\cdot\text{м})$	$G_T, \text{кг/ч}$	$N_{\text{сн}}, \text{кВт}$
1,0	2,040	10820	-11,79	94	260
0,90	0,050	9530	-12,18	76	195
0,80	2,060	8220	-12,35	60	143
0,70	2,065	6980	-12,98	40	79
0,60	2,075	4930	-14,39	27	44

где  $\lambda_{\bar{n}_t} = \bar{n}_t / n_{\text{тн}}$  – уровень реализации частоты вращения вала тяговой турбины;  $\bar{n}_t, n_{\text{тн}}$  – соответственно, текущее и номинальное значения частоты вращения тяговой турбины,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\mu = M_{\text{max}} / M_n$  – кратность моментов или коэффициент приспособляемости ГТД;  $M_{\text{max}}, M_n$  – соответственно, максимальное и номинальное значения крутящего момента на валу тяговой турбины,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  $A = n_{\text{max}}, \text{мин}^{-1}$  – постоянная величина, равная максимальной частоте вращения вала тяговой турбины,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $B = -(n_{\text{max}} - n_{\text{min}})(\mu M)^{-1}$  – угловой коэффициент,  $\text{мин}^{-1}(\text{Н}\cdot\text{м})$ ;  $n_{\text{min}}$  – минимальное значение частоты вращения тяговой турбины,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $G_T$  – часовой расход топлива ГТД,  $\text{кг/ч}$ ;  $N_{\text{сн}}$  – номинальная мощность ГТД,  $\text{кВт}$ .

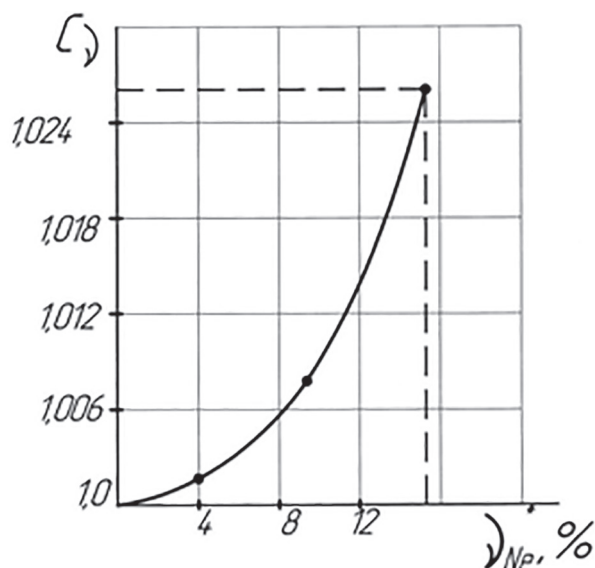


Рис. 3. Зависимость функции  $C_v$  от коэффициента вариации  $v_{N_e}$  эффективной мощности ГТД

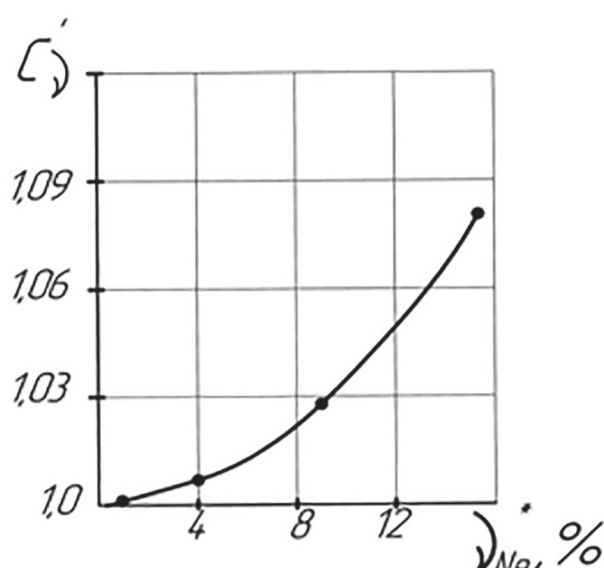


Рис. 4. Зависимость функции  $C_v'$  от коэффициента вариации  $v_{N_e}$  эффективной мощности ГТД

4. Коэффициент вариации  $v_{g_e}$  удельного расхода топлива ГТД определяется по формуле:

$$v_{g_e} = (C_v' / C_v - 1)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $C_v, C_v'$  – функции (см. рис. 3 и 4).

Математические модели для определения вероятностных оценок удельного расхода топлива, установленные по формулам (2)–(5), являются расчетными и не соответствуют эффективной работе ГТД (оптимальным скоростным и нагрузочным режимам работы сельскохозяйственного агрегата с ГТД). Поэтому в расчетах необходимо принять их экстремальные (оптимальные) значения.

1. Оптимальное значение математического ожидания удельного расхода топлива ГТД определяется по формуле:

$$\bar{g}_e = (EC_v) \bar{N}_e^*, \quad (6)$$

где  $\bar{N}_e = c \cdot [A \cdot \bar{M}_T^* + B \cdot \bar{M}_T^{*2} \cdot (1 + v_m^2)]$  – оптимальное значение эффективной мощности ГТД;  $\bar{M}_T^* = -A / [2B \cdot (1 + v_m^2)]$  – экстремальное (оптимальное) значение момента  $M_T$  на валу тяговой турбины ГТД.

2. Оптимальное значение дисперсии удельного расхода топлива ГТД определяется по формуле:

$$D(g_e) = (10^3 \cdot G_T C_v^*) / \bar{N}_e^{*2}. \quad (7)$$



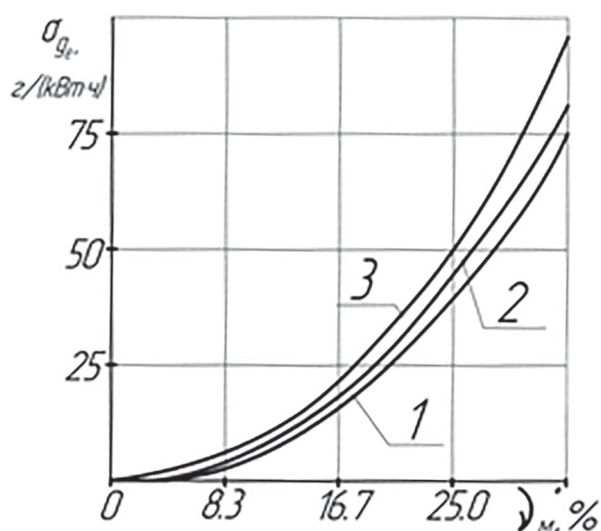


Рис. 5. Зависимости экстремальных (оптимальных) значений среднего квадратического отклонения  $\sigma_{g_e}^*$  удельного расхода топлива ГТД от коэффициента вариации нагрузки  $\nu_m$  пахотного агрегата ГТТ+ПНИ-8/9-40 при фиксированных значениях частоты вращения турбокомпрессора:  
1 –  $n_{TK} = 90\%$  (или  $\lambda_{\bar{n}_T} = 0,9$ ); 2 –  $n_{TK} = 80\%$  (или  $\lambda_{\bar{n}_T} = 0,8$ ); 3 –  $n_{TK} = 70\%$  (или  $\lambda_{\bar{n}_T} = 0,7$ )

3. Оптимальное значение среднего квадратического отклонения  $\sigma_{g_e}$  удельного расхода топлива ГТД можно подсчитать по формуле:

$$\sigma_{g_e} = 10^3 \cdot G_T \cdot (C_v^*)^{1/2} \cdot \bar{N}_e^{*-1}. \quad (8)$$

4. Оптимальное значение коэффициента вариации  $\nu_{g_e}$  удельного расхода топлива ГТД определяется по формуле (4).

В качестве примера на рис. 5 представлены зависимости экстремальных значений среднего квадратического отклонения  $\sigma_{g_e}^*$  удельного расхода топлива ГТД в составе пахотного агрегата, состоящего из газотурбинного трактора (ГТТ) и навесного плуга с изменяемой шириной захвата ПНИ-8/9-40.

### Выводы

1. Предложенная методика позволяет разделить расчетные и оптимальные значения математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации удельного расхода топлива ГТД в составе различных сельскохозяйственных агрегатов.

2. При определении вероятностных оценок удельного расхода топлива для повышения их точности необходимо учитывать значения установленных поправочных коэффициентов

$C_v^*$ ,  $C_v^l$ ,  $C_v$ , зависящих от коэффициента вариации нагрузки  $\nu_m$  и эффективной мощности  $\nu_{Ne}$  ГТД.

### Литература

1. Агеев Л.Е., Шкрабак В.С., Моргулис-Якушев В.Ю. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения. Л.: Агропромиздат. 1986. 415 с.
2. Шкрабак В.С., Джаббаров Н.И. Эффективность применения газотурбинных двигателей на тракторах сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 10. С. 46–48.
3. Шкрабак В.С., Джаббаров Н.И., Шкрабак Р.В., Федькин Д.С. Сравнительная оценка энергетической эффективности пахотных агрегатов на базе тракторов с дизельным и газотурбинным двигателями // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 2. С. 44–46.
4. Шкрабак В.С., Джаббаров Н.И., Федькин Д.С., Шкрабак Р.В. Влияние случайной нагрузки на эффективную мощность газотурбинного и дизельного двигателей в составе почвообрабатывающих агрегатов // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 6. С. 17–21.
5. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. Л.: Колос. 1978. 296 с.
6. Шкрабак В.С. Эксплуатационно-эргономические свойства мобильных агрегатов с газотурбинным двигателем (теория, практика, конструкция). Часть 1 «Теория». С-П. СПбГАУ. 1998. 506 с.

### References

1. Ageev L.E., Shkrabak V.S., Morgulis-Yakushev V.Yu. *Sverkhmoshchnye traktory sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Heavy duty tractors for agricultural purposes]. Leningrad: Agropromizdat Publ. 1986. 415 p.
2. Shkrabak V.S., Dzhabbarov N.I. Efficiency of using gas turbine engines on agricultural tractors. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No 10, pp. 46–48 (in Russ.).
3. Shkrabak V.S., Dzhabbarov N.I., Shkrabak R.V., Fed'kin D.S. Comparative assessment of the energy efficiency of arable aggregates based on tractors with diesel and gas turbine engines. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 2, pp. 44–46 (in Russ.).
4. Shkrabak V.S., Dzhabbarov N.I., Fed'kin D.S., Shkrabak R.V. Effect of a random load on the effective power of gas turbine and diesel engines as part of soil processing units. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 6, pp. 17–21 (in Russ.).

5. Ageev L.E. *Osnovy rascheta optimal'nykh i dopuskaemykh rezhimov raboty mashinotraktornykh agregatov* [Basics of calculating the optimal and allowable modes of operation of machine-tractor units]. Leningrad: Kolos Publ. 1978. 296 p.
6. Shkrabak V.S. *Ekspluatatsionno-ergonomichesk-  
ie svoystva mobil'nykh agregatov s gazoturb-  
nym dvigatelem (teoriya, praktika, konstrukt-  
siya). Chast' I «Teoriya»* [Operational and ergonomic  
properties of mobile units with gas turbine engine  
(theory, practice, design). Part 1 "Theory"]. S-P.  
SPbGAU Publ. 1998. 506 p.

## METHOD FOR DETERMINING PROBABILISTIC ESTIMATES OF THE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION OF A GAS TURBINE ENGINE AS A PART OF ARABLE UNIT

Dr. Eng. V.S. Shkrabak<sup>1</sup>, Dr. Eng. N.I. Dzhabborov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Federal State Budget Scientific Institution "Institute for Engineering and Environmental Problems  
in Agricultural Production – IEEP", Saint-Petersburg, Russia  
v.shkrabak@mail.ru

The article describes the method for determining the probabilistic estimates of the specific fuel consumption of a gas turbine engine as a part of arable unit. When justifying mathematical models for determining probabilistic estimates of the specific fuel consumption of the gas turbine engine, the method of the random argument function of professor L. Ageev was implemented. To improve the accuracy of calculations in determining the probabilistic estimates of the specific fuel consumption of a gas turbine engine correction factors (or functions) and formulas for their determination are proposed. The mathematical expectation of the specific fuel consumption, the inverse of the normally distributed argument, in this case the effective power of the gas turbine engine is not equal to the reciprocal of the mathematical expectation of the argument. This inequality varies depending on the coefficient of variation of effective power, which should also be taken into account when determining the dispersion and the standard deviation of the specific fuel consumption of the gas turbine engine. Experimental studies of arable unit consisting of a gas turbine tractor (GTT) with GTD-350T gas turbine engine and a mounted plow with variable width PNI-8/9-40, to verify the reliability of mathematical models of probabilistic estimates of the specific fuel consumption of the gas turbine engine, were conducted in the fields of training and experimental household of the Saint-Petersburg State Agrarian University. The proposed method allows to determine the average and optimal values of the mathematical expectation, variance, standard deviation and coefficient of variation of the effective specific fuel consumption of the gas turbine engine in the composition of various agricultural units.

**Keywords:** gas turbine engine, specific fuel consumption, arable un, effective power, gas turbine tractor.