УДК 621.43.001

CC BY

DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-13-21

Оперативный контроль состояния рабочих машин по параметрам двигателя внутреннего сгорания

Иван Петрович Добролюбов[1],
доктор технических наук,
профессор;

Геннадий Леонидович Утенков[2],
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;
e-mail: utenkov1951@mail.ru

[1]Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация;
[2]Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий, п. Краснообск, Новосибирская область, Российская Федерация

Реферат. Показали, что несовершенство методов точного земледелия, способов передачи энергии от двигателя трактора к рабочим органам требуют разработки новых методов достоверной и точной идентификации почвы и ее свойств, а также состояния машинно-тракторных агрегатов. (*Цель исследований*) Достоверно и оперативно в эксплуатационных условиях сельскохозяйственного производства определить фактические энергетические и экономические показатели рабочей машины и агрегата по параметрам, тесно связанным с энергетическими показателями двигателя внутреннего сгорания, измерение которых не требует больших затрат. (*Материалы и методы*) Для оперативной оценки использовали 24 косвенных параметра, отражающих мощность и степень нагрузки двигателя. При этом учитывали угловые ускорения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания и ротора турбокомпрессора, в том числе вызванные работой отдельных цилиндров, рабочие процессы генератора (их средние и экстремальные значения), а также амплитудно-частотные спектры этих процессов, скоростные характеристики. Для повышения точности и достоверности оценки энергетических показателей провели селекцию процессов в частотной и фазовой областях. (*Результаты и обсуждение*) Рассмотренные методы апробировали в производственных условиях при основной обработке солонцово-черноземных комплексов Чулымского района Новосибирской области. Выявили, что применение гибкого машинно-тракторного агрегата на базе энергонасыщенного трактора улучшило качество обработки почвы: доля почвенных комков размером менее 5 сантиметров составила 73-80 процентов; производительность почвообрабатывающего агрегата увеличилась на 15-20 процентов. (*Выводы*) Доказали, что с помощью косвенно определяемых показателей мощности и степени нагрузки можно оценить фактические значения энергетических и технико-экономических показателей рабочей машины и агрегата, качество комплектования агрегата, неоднородность почвы значительно проще и дешевле, чем посредством известных силоизмерительных методов. Выявили, что применение цифровых систем автоматического управления агрегатом с использованием указанных параметров позволяет достаточно просто обеспечить задание оптимальной зоны энергетических режимов.

Ключевые слова: агрегат «двигатель внутреннего сгорания – рабочая машина», агрегат «моторно-транспортное средство – рабочая машина», энергетические режимы, оперативный контроль, автоматическое управление, параметры двигателя внутреннего сгорания, косвенные показатели мощности и нагрузки.

Для цитирования: Добролюбов И.П., Утенков Г.Л. Оперативный контроль состояния рабочих машин по параметрам двигателя внутреннего сгорания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 13-21. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-13-21.

Working machines state operational monitoring according to the parameters of the internal combustion engine

Ivan P. Dobrolyubov[1],
Dr.Sc.(Eng.), professor;

Gennady L. Utenkov[2],
Ph.D.(Eng.), leading researcher;
e-mail: utenkov1951@mail.ru

[1]Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russian Federation;
[2]Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation

Abstract. The authors showed that the imperfection of precision farming methods, methods of transferring energy from the tractor engine to the working bodies required the development of new methods for reliable and accurate identification of the soil and its

properties, as well as the state of machine-tractor units. (*Research purpose*) To determine the actual energy and economic indicators of a working machine and unit reliably and promptly in the operating conditions of agricultural production by parameters closely related to the energy indicators of an internal combustion engine, the measurement of which did not require large costs. (*Materials and methods*) 24 indirect parameters reflecting the power and degree of engine load were used for the operational assessment. In this case, the angular accelerations of the internal combustion engine and the turbocharger rotor crankshaft, including those caused by the operation of individual cylinders, the working processes of the generator (their average and extreme values), as well as the amplitude-frequency spectra of these processes, and speed characteristics were taken into account. To improve the accuracy and reliability of the assessment of energy indicators, the authors selected the processes in the frequency and phase domains. (*Results and discussion*) The considered methods were tested in production conditions during the main processing of the alkaline-chernozem complexes of the Chulym district of the Novosibirsk region. The authors found that the use of a flexible machine-tractor unit based on an energy-rich tractor improved the quality of soil cultivation: the share of soil lumps less than 5 centimeters in size was 73-80 percent; the productivity of the tillage machine increased by 15-20 percent. (*Conclusions*) The authors proved that with the help of indirectly determined indicators of power and degree of load, it was possible to estimate the actual values of the energy and technical and economic indicators of the working machine and the unit, the quality of the assembly of the unit, the heterogeneity of the soil was much easier and cheaper than using the known force-measuring methods. It was found that the use of digital systems for automatic control of the unit using the indicated indicators made it possible to provide quite simply the setting of the optimal zone of energy modes.

Keywords: unit “internal combustion engine – working machine”, unit “motor vehicle – working machine”, energy modes, operational control, automatic control, parameters of an internal combustion engine, indirect indicators of power and load.

For citation: Dobrolyubov I.P., Utenkov G.L. Operativnyy kontrol’ sostoyaniya rabochikh mashin po parametram dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Working machines state operational monitoring according to the parameters of the internal combustion engine]. *Sel’skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 13-21 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-13-21.

Интенсификация производства – важное условие повышения его эффективности. В то же время независимо от уровня интенсивности технологии повышаются затраты ресурсов и энергии на получение единицы продукции [1, 2]. Полагают, что «уравнительная» система земледелия и механизация сельскохозяйственного производства с усредненными показателями в пахотном слое приводят к экспоненциальному росту затрат и нарушают экологическое равновесие [3]. Для зернового производства, преобладающего в Западной Сибири, при урожайности 1,5 т/га характерны экстенсивное ведение хозяйства, высокая энергоемкость и экологическая несбалансированность, что не соответствует ресурсному потенциалу агроландшафтов [4]. Считается, что интенсификация способствует ресурсосбережению. Однако ежегодный экологический ущерб от интенсификации аграрного сектора в России превышает 3 млрд руб. [5]. Современная техносфера не может гармонично сосуществовать с биосферой, поскольку создана не по ее законам эволюции [6]. Причем любое несоответствие технологии или ее элементов почвенно-климатическим особенностям приводит к экономическим и экологическим издержкам [7]. Так, «вредная работа», обусловленная несовершенством способа передачи энергии от двигателя трактора к рабочим органам, достигает 42-54% от общей интенсивности механического воздействия на почву (деградация почвы и загрязнение выхлопными газами окружающей среды) [8].

Даже нормальные технологии, преобладающие в сельхозпроизводстве, связаны с риском деградации почв. Из-за действия случайных возмущений на машинно-тракторные агрегаты всего 20-30% от номинальной величины мощности, развиваемой двигателем, идет на выполнение технологических операции [10]. В условиях Сибири коэффициент использования рабочего времени смены из-за технических и технологических отказов, прежде всего у сельскохозяйственных машин, не превышает 0,45-0,55 [11]. А неудовлетворительное качество совокупности технологических операций (вспашка, культивация, боронование, посев), выполняемых в условиях нечерноземья Урала и Западной Сибири, снижает урожайность зерновых культур до 40% [12].

Именно недостаток техники – одна из главных причин, сдерживающих развитие аграрного производства в Новосибирской области. Поэтому требуется разработка математических моделей для обоснования технического оснащения [13]. Обеспеченность сельского хозяйства современной техникой остается основным лимитирующим фактором технологической модернизации земледелия [14]. Считают, что новые информационные и коммуникационные технологии способствуют повышению эффективности сельхозпроизводства: снижают трансакционные издержки, выравнивают условия конкуренции для мелких фермеров и делают сельское хозяйство «умным» [15, 16]. Так, техническое совершенство, направленное на создание бортовой системы для трактора с перспективой полной его автоматизации, позволит повысить производительность труда в 2-3 раза и снизить общие эксплуатационные расходы на 20% и более [17].

Однако используемые в технологиях точного земледелия методы дискретного и непрерывного дистанционного зондирования земли недостаточно эффективны для принятия обоснованных технологических решений и их технического обеспечения [18]. Получаемая в режимах *off-line* или *on-line* общая информация распределения элементов питания и урожайности не соответствует точному земледелию и не уменьшает риски в сельхозпроизводстве. Недоучет случайных характеристик оптических показателей и производных от их величин приводит к существенным ошибкам и серьезным методическим погрешностям при применении вегетационного индекса *NDVI*, оценивающего динамику развития сельскохозяйственных культур. В целом задача получения количественных оценок параметров состояния посевов и почвенной среды остается не решенной до настоящего времени [19]. Актуальным также считается создание научно обоснованной методики разделения реально неоднородного сельскохозяйственного поля на условно однородные (технологически гомогенные) участки, в пределах которых оправдано применение недифференцированных агротехнологий [20]. Нужны новые количественные методы и модели для конкретного случая [13, 18, 21].

Эффективность агрегатов «двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – рабочая машина (РМ)», «моторно-транспортное средство – РМ» во многом зависит от того, насколько оптимально может быть реализовано управление факторами, влияющими на их производительность и качество выполнения работ. Для этого необходимо достоверно определить фактические энергетические и экономические показатели РМ и агрегата. Повышению качества контроля может способствовать использование параметров, тесно связанных с энергетическими показателями ДВС, измерение которых не вызывает значительных затруднений [22, 23].

Цель исследований – достоверно и оперативно в производственных условиях определить фактические энергетические и экономические показатели РМ и агрегата по параметрам, тесно связанным с энергетическими показателями ДВС, измерение которых не требует больших затрат.

Материалы и методы. Производительность агрегата с приводом от ДВС равна [22, 23]:

$$W_{ф} = \int_0^{T_p} k_{w0}\frac{N_e}{R_M}dt = \int_0^{T_p} k_{w0}N_{e\ ном}\frac{\xi_{N_e}}{R_M}dt, \text{ га/ч},$$

где $k_{w0} = const$ для конкретного агрегата;

N_e, $N_{e\ ном}$ – текущее и номинальное значения мощности двигателя, кВт;

R_M – сопротивление РМ, кН;

T_p – время работы агрегата под нагрузкой (наработка), ч;

ξ_{Ne} – степень нагрузки двигателя: $\xi_{N\,e} = N_e / N_{e\ ном}$, $\xi_{Ne} = k_\xi \Pi_\xi$, $k_\xi = const$ для конкретного агрегата;

Π_ξ – параметр степени нагрузки двигателя, кВт.

Для определения $W_ф$ необходимо контролировать N_e (или ξ_{Ne}) и R_M. Сопротивление R_M оценивают на скоростных режимах, близких к $n = n_{ном}$ (n – частота вращения коленчатого вала), Гц:

$R_M \approx k_R(N_{ep} - N_{ex})$, кН;

где $k_R = const$ для данного агрегата;

индексы p и x соответствуют рабочему (под нагрузкой) и холостому режиму агрегата.

Используя тот или иной косвенный параметр Π_N, отражающий мощность двигателя ($N_e = k_N\Pi_N$, $k_N = const$), или параметр Π_ξ степени его нагрузки, можно определить сопротивление R_M и производительность агрегата [22, 23]:

$$\Pi_\xi = [k_N / (k_\xi N_{e\ ном})]\Pi_N,$$

$$R_M \approx k_R k_N (\Pi_{пр} - \Pi_{Nx}) = k_R k_\xi N_{e\ ном}(\Pi_{\xi p} - \Pi_{\xi x}); \quad (1)$$

$$W_ф = k_{wN}\int_0^{T_p}\frac{\Pi_N}{\Pi_{Np} - \Pi_{Nx}}dt = k_{w\xi}\int_0^{T_p}\frac{\Pi_{N\xi}}{\Pi_{\xi p} - \Pi_{\xi x}}dt, \quad (2)$$

где $k_{wN} = k_{w0} / k_R$; $k_{w\xi} = k_{wN}k_N / k_\xi$.

Аналогично для наработки агрегата:

$$T_н = k_{HN}\int_0^{T_p}\Pi_N dt = k_{H\xi}\int_0^{T_p}\Pi_\xi dt, \quad (3)$$

где $k_{нN} = 1/\Pi_{N\ ном}$;

$k_{н\xi} = 1/\Pi_{\xi\ ном}$;

$\Pi_{N\ ном}$ и $\Pi_{\xi\ ном}$ – соответственно, суммарные значения параметров Π_N и Π_ξ при $N_e = N_{e\ ном}$ за 1 ч работы агрегата.

В переходных и установившихся режимах угловое ускорение коленчатого вала ДВС определяется зависимостью [22, 23]:

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{1}{J_Д}\left(M_i - \omega^2\frac{dJ_Д}{d\phi} - M_{вп} - M_{наг}\right) =$$

$$= \frac{1}{J_Д}\left(M_i^к + M_i^г - M_{ин} - M_{вп} - M_{наг}\right), \text{ рад/с}^2,$$

где $J_Д$ – приведенный момент инерции ДВС и нагрузочных масс (при моменте нагрузки $M_{наг} = 0$ это собственный приведенный к коленчатому валу момент инерции ДВС), кг/м^2;

ω – угловая скорость коленчатого вала, рад/с (частота вращения $i = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\omega d\phi$, 1/с);

φ – угол поворота коленчатого вала (ПКВ), рад;

$M_i = M_i^К + M_i^г$ – индикаторный момент двигателя, Н·м: $M_i^к = \sum_{k=1}^{i_ц} M_{i1(k)}^к$ и $M_i^г = \sum_{k=1}^{i_ц} M_{i1(k)}^г$ – компрессионная и газовая составляющие индикаторного момента;

$M_{i1}^К$ и $M_{i1}^г$ – компрессионная и газовая составляющие одного цилиндра;

$i_ц$ – число цилиндров;

$M_{ин} = M_{ин}^{рег}(\varphi - \zeta_m) + M_{ин}^{ост} = \omega^2 \frac{dJ_д}{d\varphi}$ – инерционная составляющая крутящего момента, содержащая регулярную составляющую, вызванную неуравновешенными инерционными силами (например, у двигателя компоновки 4-Р это вторая гармоника частоты вращения) и остаточную составляющую случайного характера, присущую всем двигателям;

$M_{вп}$ – момент внутренних потерь (преимущественно трения), Н·м.

Ускорение ε_Σ можно представить в виде:

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_к + \varepsilon_г - \varepsilon_{ин} - \varepsilon_т - \varepsilon_{нг} =$$
$$= \sum_{m=1}^{i_ц} \varepsilon_{к1}(\varphi - \zeta_m) + \sum_{m=1}^{i_ц} \varepsilon_{г1}(\varphi - \zeta_m) +$$
$$+ \sum_{m=1}^{i_ц} \varepsilon_{ин1}(\varphi - \vartheta_m) - \varepsilon_{ин\,ост} - \varepsilon_т - \varepsilon_{нг}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_к$, $\varepsilon_г$, $\varepsilon_{ин}$, $\varepsilon_т$, $\varepsilon_{нг}$ – составляющие углового ускорения коленчатого вала: компрессионная, газовая, инерционная, внутренних потерь (трения) и нагрузки;

$\xi_т$ – сдвиг по углу ПКВ, определяемый диаграммой распределения вспышек по цилиндрам;

$\vartheta_т$ – сдвиг по углу ПКВ, определяемый конструктивным расположением цилиндров;

$\varepsilon_{к1}$, $\varepsilon_{г1}$, $\varepsilon_{ин1}$ – составляющие углового ускорения коленчатого вала, вызванные работой одного цилиндра:

$\varepsilon_{к1} = V_ц p_{сж} K(\varphi)/\bar{J}_д$; $\varepsilon_{г1} = V_ц p_{mi} S(\varphi)/\bar{J}_д$;

$\varepsilon_{ин1} = (\omega^2/\bar{J}_д)(dJ_{дрег}/d\varphi)$;

$\varepsilon_{иност}$ – остаточная инерционная составляющая ускорения, зависящая от конструктивного несовершенства ДВС и присоединительных элементов (разброса масс и размеров), $\varepsilon_{ин\,ост} = (\omega^2/\bar{J}_д)(dJ_{д\,ост}/d\varphi)$;

$V_ц$ – объем цилиндра, л;

$p_{сж}$ – давление сжатия, кПа;

$K(\varphi)$ и $S(\varphi)$ – безразмерные компрессионная и газовая силовые функции, которые хорошо аппроксимируются линейно-экспоненциальными импульсами вида:

$|K(\varphi)| = a_к \varphi[exp(-b_к \varphi)]$;

$S(\varphi) = a_s \varphi[exp(-b_s \varphi)]$;

$|K(\varphi)|$ – положительная ветвь функции $K(\varphi)$;

$a_к$, a_s, $b_к$, b_s – константы [24];

$\bar{J}_д$, $J_{дрег}$, $J_{д\,ост}$ – среднее значение, регулярная и остаточная составляющие момента инерции ДВС, кг/м^2;

p_{mi} – среднее индикаторное давление, кПа.

С ростом p_{mi} увеличивается размах составляющей $\varepsilon_г$. Следовательно, определив среднее значение суммы переменных $\bar{\varepsilon}_К + \bar{\varepsilon}_г$, в переходном режиме разгона (в установившемся режиме – средневыпрямленное значение $|\bar{\varepsilon}_К + \bar{\varepsilon}_г|$) можно оценить полную индикаторную мощность двигателя:

$$N_i = M_i n = \frac{k_{тд}}{2T_0} n \int_0^{2T_0} (\varepsilon_К + \varepsilon_Г) dt =$$
$$= \frac{k_{тд}}{4\pi} n \int_0^{4\pi} (\varepsilon_К + \varepsilon_Г) d\varphi = k_{тд} n (\bar{\varepsilon}_К + \bar{\varepsilon}_Г), \text{ кВт},$$

где $k_{тд}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от марки ДВС (числа цилиндров, момента инерции, степени сжатия);

T_0 – время поворота коленчатого вала на 360°, с.

Вместо средних значений можно использовать также экстремальные (амплитудные) значения:

$$(\varepsilon_к + \varepsilon_г)_{max} = \frac{1}{i_ц} \sum_{m=1}^{i_ц} [(\varepsilon_{к1} + \varepsilon_{г1})_{max}] m, \text{ рад/с}^2;$$

$$N_i = k_{тд\,т} \frac{n}{i_ц} \sum_{m=1}^{i_ц} [(\varepsilon_{к1} + \varepsilon_{г1})_{max}] m, \text{ кВт},$$

где $k_{тд\,т}$ имеет тот же смысл, что и $k_{тд}$ (они не равны между собой).

При этом достаточно использовать только положительные экстремумы, так как составляющая $\varepsilon_г$ определяется положительной функцией $S(\varphi)$. Кроме того, это повышает чувствительность сигнала к изменению активных сил двигателя благодаря тому, что в установившемся режиме ($\varepsilon_к + \varepsilon_г$) смещается относительно нуля так, чтобы среднее значение ускорения равнялось нулю. В результате значительно уменьшается влияние составляющей $\varepsilon_к$, которая определяется функцией $K(\varphi)$, симметричной относительно нуля.

Результаты и обсуждение. Для уравновешенных двигателей ($\varepsilon_{ин} \to 0$) с низким уровнем переменной составляющей потерь ($\varepsilon_т \to 0$) имеем:

$$П_{N1} = |\bar{\varepsilon}_\Sigma| = |\bar{\varepsilon}_К| + |\bar{\varepsilon}_г| =$$
$$= \frac{1}{2T_0} \int_0^{2T_0} |\bar{\varepsilon}_\Sigma| dt = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} |\bar{\varepsilon}_\Sigma| d\varphi; \quad (5)$$

$$П_{N2} = |\bar{\varepsilon}_{\Sigma max}| \approx |\bar{\varepsilon}_К + \bar{\varepsilon}_Г|_{max} =$$
$$= \frac{1}{i_ц} \sum_{m=1}^{i_ц} [|(\varepsilon_{к1} + \varepsilon_{г1})_{max}|] m. \quad (6)$$

При замене в (5) средневыпрямленных $|\bar{\varepsilon}_К| + |\bar{\varepsilon}_г|$ на средние квадратические значения ускорений получим $П_{N3} = (\bar{\varepsilon}_\Sigma^2)^{1/2} \approx [(\bar{\varepsilon}_К + \bar{\varepsilon}_Г)^2]^{1/2}$.

Для повышения чувствительности параметра $П_N$ (особенно в применении к многоцилиндровым ДВС) целесообразно при прокрутке двигателя без нагрузки измерить с привязкой по углу $П_{КВ}$ мгновенные значения ускорения коленчатого вала ($\varepsilon_{\Sigma х} = \varepsilon_к - \varepsilon_{ин} - \varepsilon_{тх}$, где $\varepsilon_{тх}$ – значение $\varepsilon_т$ при холостом ходе) и вычесть их из ε_Σ (4) в фазе.

Кроме того, точность и достоверность оценки энергетических показателей можно повысить благодаря селекции сигнала в частотной (фильтрация) и фазовой (по углу $П_{КВ}$) областях. Амплитудно-частотный спектр переменной составляющей процесса нагружения (сопротивления РМ) двигателя всегда содержит более низкие частоты, чем спектр процессов, вызванных активными движущими силами двигателя. Активная часть спектра ускорений сил трения и инерционных сил различных присоединительных элемен-

тов, кинематически связанных с коленчатым валом, располагается выше указанного спектра. Селекция по углу $П_{КВ}$ позволяет избавиться от взаимно перекрывающихся участков рабочих процессов (на срезе импульсов $\varepsilon_{г1}$), возникающих у многоцилиндровых двигателей.

В качестве параметра $П_N$ можно также использовать составляющие амплитудно-частотного спектра ускорения коленчатого вала. Из анализа функций $K(\varphi)$ и $S(\varphi)$, максимумы которых достигаются при $\varphi = 22...30°$, следует, что наибольшая доля энергии спектра $\varepsilon_{тд}(t) = \varepsilon_к(t) + \varepsilon_г(t)$ приходится на составляющие, кратные 3...4-й гармоникам частоты вращения.

При замене в (5) средневыпрямленных значений ускорений $|\bar{\varepsilon}_К|$ и $|\bar{\varepsilon}_г|$ на составляющие ускорения, кратные 3...4-й гармоникам частоты вращения, а именно на среднее выпрямленное $|\bar{\varepsilon}_{34}|$, на среднее квадратическое $(\varepsilon_{34})^{1/2}$ и максимальное значения ускорения указанных гармоник ε_{34max} в интервале $t \in [t_1, t_2]$ ($[t_1, t_2]$ (интервал времени, соответствующий активной части индикаторной силовой функции) получим $П_{N4} = |\bar{\varepsilon}_{34}|$, $П_{N5} = (\varepsilon_{34})^{1/2}$ и $П_{N6} = (\varepsilon_{34})_{max} = A_{34}$.

При оценке энергетических показателей агрегата с двигателями, оборудованными газотурбонаддувом, в качестве критерия $П_N$ могут использоваться показатели работы турбокомпрессора [22]:

$$\left.\begin{array}{l} Ne = k_{тн} p_к \omega \\ \tilde{p}_к = (\tilde{\omega}_Т - \theta_в \tilde{\omega}) / k_в \\ p_к = \pi_к p_{к\,вх} = \pi_к (p_0 - \Delta p_р) = \pi_к p_0 (1 - \delta_{р\,вх}) \end{array}\right\}, \qquad (7)$$

где $k_{тн}$ – постоянная величина, определяемая параметрами топливной и воздушной магистралей ДВС;

$p_к$ – давление наддува, кПа;

$\omega_Т$ – угловая скорость ротора турбокомпрессора, рад/с;

$\tilde{p}_к = \Delta p_к / p_{к\,ном}$, $\tilde{\omega}_Т = \Delta\omega_Т / \omega_{Т\,ном}$,

$\tilde{\omega} = \Delta\omega / \omega_{ном}$;

$\theta_в$, $k_в$, $\pi_к$ – относительные отклонения величин, постоянные для данного турбокомпрессора;

$p_{к\,вх}$ – давление воздуха перед компрессором, кПа;

p_0 – атмосферное давление, кПа;

$\Delta p_р$ – разрежение воздуха на входе в компрессор, кПа;

$\delta_{р\,вх} = \Delta p_р / p_0$ – степень разрежения воздуха на входе в компрессор.

С учетом (7) имеем:

$П_{N7} = p_к$; $П_{N8} = \omega_Т$; $П_{N9} = p_{к\,вх}$; $П_{N10} = \Delta p_р$ (последние два параметра более чувствительны к изменению сопротивления РМ).

Неравномерность индикаторного момента ДВС в стационарном режиме приводит к колебаниям давления и температуры потока выхлопных газов, что становится причиной колебаний угловой скорости вала турбокомпрессора. Поскольку колебание параметров потока выхлопных газов определяется изменением индикаторного момента двигателя, то активная часть изменения давления и температуры может быть также аппроксимирована отрезком синусоиды, кратной 3...4-й гармоникам частоты вращения коленчатого вала, усредненных по всем цилиндрам.

Заменив в (5) и (6) средневыпрямленные значения $|\bar{\varepsilon}_К|$ и $|\bar{\varepsilon}_г|$ на гармоники давлений $p_к$, $p_{к\,вх}$, $\Delta p_р$ и ускорения ротора $\varepsilon_Т$ турбокомпрессора, кратные 3...4-й гармоникам частоты вращения коленчатого вала, на их средние, максимальные и средние квадратические значения по всем цилиндрам в интервале $t \in [t_1, t_2]$, получим косвенный параметр $П_N$, отражающий мощность двигателя:

$П_{N11} = |\bar{p}_{к\,34}|$; $П_{N12} = |\bar{p}_{к\,вх34}|$;

$П_{N13} = |\overline{\Delta p}_{р\,34}|$; $П_{N14} = |\varepsilon_{Т\,34}|$;

$П_{N15} = (p_{к\,34})max = A_{к34}$;

$П_{N16} = (p_{к\,вх34})max = A_{к\,вх34}$;

$П_{N17} = (\Delta p_{р\,34})max = A_{р34}$;

$П_{N18} = (\varepsilon_{Т\,34})max = A_{\varepsilon_{Т\,34}}$.

При нахождении поршня в ВМТ составляющие $\varepsilon_к$, $\varepsilon_г$ и $\varepsilon_{ин}$ равны нулю, а составляющую $\varepsilon_т$ внутренних потерь при определенном скоростном режиме можно считать постоянной. К тому же ее значение существенно ниже уровня остальных составляющих. Поэтому с ростом сил сопротивления (нагрузки) происходит смещение суммарного ускорения ε_Σ относительно мгновенного значения ускорения коленчатого вала $\varepsilon_{вмт}$ при нахождении поршня в ВМТ (нулевой линии). Такое смещение одновременно приводит к появлению сдвига $\varphi_{вмт}$ по углу ПКВ или интервала времени $t_{вмт}$, соответствующего этому углу между верхней мертвой точкой (ВМТ) и моментом перехода мгновенного значения ускорения через ноль (*рис. 1*). Поэтому в формулах (1)-(4) можно использовать более чувствительные к нагрузке параметры [22]: $П_{N19} = |\varepsilon_{вмт}|$; $П_{N20} = \varphi_{вмт}$; $П_{N21} = t_{вмт}$. В качестве параметра $П_N$ могут применяться также процессы генераторов.

Внешняя характеристика генератора постоянного тока отражает зависимость напряжения от силы тока нагрузки $U_г = f_1(I_{нг})$ при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и частоте вращения якоря $n_я = const$ (*рис. 2а*). Частота вращения якоря тесно связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя, что также позволяет использовать параметры генератора для оценки $П_N$. Токоскоростная характеристика $I_{нг} = f_2(n_я)$ генератора постоянного тока с параллельным возбуждением также тесно связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя (*рис. 2б*).

Подобные параметры, тесно связанные со скоростной характеристикой двигателя, имеют генераторы любого типа, устанавливаемые на агрегатах (генераторы постоянного тока с независимым возбуждением, вентильные и др.). Тогда получим:

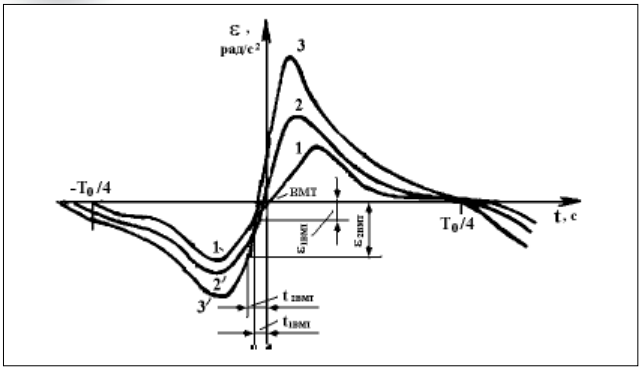

Рис. 1. Связь значений углового ускорения коленчатого вала в верхней мертвой точке и смещения этого ускорения по времени (углу поворота коленчатого вала) со степенью нагрузки двигателя: 1 – при $\xi_{Ne1}=0$; 2 – при $\xi_{Ne2}>0$; 3 – при $\xi_{Ne3}>\xi_{Ne2}$

Fig. 1. Relationship between the values of the angular acceleration of the crankshaft at top dead point and the displacement of this acceleration in time (angle of rotation of the crankshaft) with the degree of engine load: 1 – if $\xi_{Ne1}=0$; 2 – if $\xi_{Ne2}>0$; 3 – if $\xi_{Ne3}>\xi_{Ne2}$

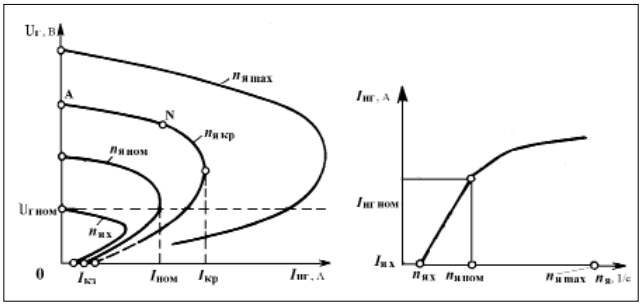

Рис. 2. Внешняя (a) и токоскоростная (b) характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (индексы «ном», «кр», «х», «кз» определяют значения величин: номинальное, критическое, холостое и короткого замыкания; $n_я = k_{перпд}$; $k_{пер}$ – передаточное отношение привода, $n_д$ – частота вращения коленчатого вала двигателя)

Fig. 2. External (a) and current-speed (b) characteristics of a direct current generator with parallel excitation (indices «ном», «кр», «х», «кз» determine the quantities values: nominal, critical, open circuit and short circuit; $n_я = k_{перпд}$; $k_{пер}$ – gear ratio of the drive, $n_д$ – engine crankshaft speed)

$П_{N22} = I_г$, А;

$П_{N23} = U^*_г$,

где $I_г = I_{нг}$; $U^*_г = U_г$ или $U^*_г = U_d$ (U_d – выпрямленное напряжение вентильного генератора), В.

Параметры $П_N$ могут быть использованы для оценки качества комплектования агрегата. Момент сопротивления агрегата (например, моторно-транспортных агрегатов сельскохозяйственного, дорожного и карьерного назначения) определяется по формуле [22]:

$$M_{сА} = \bar{J}_д(\bar{\varepsilon}^р_д - |\bar{\varepsilon}^в_д|)\{[|\bar{\varepsilon}^в_A|/(|\bar{\varepsilon}^в_A - \bar{\varepsilon}^р_A|)] - [|\bar{\varepsilon}^в_T|/(|\bar{\varepsilon}^в_T - \bar{\varepsilon}^р_T|)]\} =$$
$$= \bar{J}_д(П_{N23} - |П_{Nnд}|)\{[|П_{Nп A}|/(|П_{Nп A} - П_{N A}|)] - [|П_{Nп T}|/(|П_{Nп T} П_{N T}|)]\}, Н \cdot м, \quad (8)$$

где $\bar{J}_д$ – среднее значение момента инерции ДВС;

$\bar{\varepsilon}^р_д$, $\bar{\varepsilon}^в_д$ – средние значения ускорения коленчатого вала в режимах разгона и выбега двигателя без нагрузки (отключены коробка передач и вал отбора мощности);

$\bar{\varepsilon}^р_T$, $\bar{\varepsilon}^в_T$ – средние значения ускорения коленчатого вала в режимах разгона и выбега транспортного средства (например, трактора) при холостом проходе агрегата;

$\bar{\varepsilon}^р_A$, $\bar{\varepsilon}^в_A$ – средние значения ускорения агрегата в режимах разгона и выбега. Ускорения получают путем скользящего усреднения за цикл ДВС при достижении номинальной или иной частоты вращения коленчатого вала;

$П_{N24} = \bar{\varepsilon}^р_∂$; $П_{Nпд} = \bar{\varepsilon}^в_д$;

$П_{N A} = \bar{\varepsilon}^р_A$; $П_{Nп A} = \bar{\varepsilon}^в_A$;

$П_{N T} = \bar{\varepsilon}^р_T$; $П_{Nп T} = \bar{\varepsilon}^в_T$.

Динамическая мощность ДВС в режиме свободного разгона равна:

$$\bar{N}_e \approx \bar{J}_∂ \bar{\varepsilon}^р_д \bar{\omega},$$

а мощность потерь в режиме свободного выбега составляет:

$$\bar{N}_{пд} \approx \bar{J}_∂ \bar{\varepsilon}^в_д \bar{\omega}.$$

Тогда ускорения $\bar{\varepsilon}^р_д$ и $\bar{\varepsilon}^в_д$ могут использоваться в качестве параметров $П_{N24}$ и $П_{Nпд}$. Аналогично ускорения $\bar{\varepsilon}^р_T$, $\bar{\varepsilon}^в_T$ и $\bar{\varepsilon}^р_A$, $\bar{\varepsilon}^в_A$ можно применять в качестве параметров оценки мощностей моторно-транспортного средства (трактора) и агрегата и их мощностей потерь. Следовательно, выражение (8) пригодно для оценки качества комплектования агрегата. Есть немало примеров практического применения выражения (8) в сельскохозяйственном производстве [22, 23].

Установлено, что сопротивление R_M почвообрабатывающего и дорожно-строительного агрегатов линейно связано с твердостью (плотностью) почвы:

$R_M = F_к + abmL_{ср}$,

где $F_к$ – сила перекатывания, кН;

a и b – глубина и ширина обрабатываемого грунта (почвы), м;

m – эмпирический коэффициент (для почвообрабатывающего агрегата m=0,014 при работе корпусов рабочих органов без залипания; m = 0,030-0,032 при залипании почвы на корпусах рабочих органов;

$L_{ср}$ – средняя твердость почвы по глубине, кПа.

Используя косвенный показатель $П_{N1}$ ... $П_{N24}$, с учетом (1) можно определить твердость (плотность) почвы [23]:

$$L_{ср} = (\beta/abm)(П_{Np} - П_{Nx}), \quad (9)$$

где $\beta = k_R k_N$;

$П_{Np}$ и $П_{Nx}$ – параметры мощности рабочего и холостого ходов двигателя; размерность $П_{Np}$ и $П_{Nx}$ отражается в соответствующих коэффициентах $П_{N1}$... $П_{N24}$.

При применении системы автоматического управления режимами работы агрегата для задания границ оптимальной зоны энергетических (нагрузочного и скоростного) режимов на скоростной характеристи-

ке двигателя можно использовать тот или иной показатель $П_{N1}...П_{N24}$ [14-16].

Для задания границ оптимальной зоны энергетических (нагрузочного и скоростного) режимов в производственных условиях применялись наиболее существенно влияющие параметры $П_N$ [22, 23]. Дальнейшие лабораторно-полевые исследования показали, что для этих целей можно применить ряд параметров $П_N$. Они сравнительно новые, могут быть проще измерены и рекомендованы для внедрения в производство.

Рассмотренные методы апробированы при основной обработке солонцово-черноземных комплексов Чулымского района Новосибирской области. Применение гибкого машинно-тракторного агрегата на базе энергонасыщенного трактора улучшило качество обработки почвы: доля почвенных комков размером менее 5 сантиметров составила 73-80%; производительность почвообрабатывающего агрегата увеличилась на 15-20%.

Выводы. Анализ уравнений динамики ДВС и его компонентов показал, что с помощью косвенно определяемых показателей мощности и степени нагрузки можно оценить значительно проще и дешевле, в сравнении с известными силоизмерительными методами, фактические значения энергетических и технико-экономических показателей рабочей машины и агрегата, качество комплектования агрегата, неоднородность почвы, оцениваемую по ее твердости. Применение системы автоматического управления энергетическими режимами работы агрегата с использованием указанных показателей позволяет достаточно просто обеспечить задание оптимальной зоны режимов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лачуга Ю.Ф. Сельскохозяйственному производству – новые знания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N3. С. 3-8.
2. Алтухов А.И. Развитие производства зерна в стране: мифы и реальность // *Экономика сельского хозяйства России*. 2017. N3. С. 31-38.
3. Измайлов А.Ю., Артюшин А.А., Личман Г.И., Смирнов И.Г., Марченко А.Н. Цифровые технологии химизации сельского хозяйства: теория и практика. М.: ВИМ. 2020. 180 с.
4. Федоренко В.Ф., Сапожников С.Н., Петухов Д.А. и др. Научные основы производства высококачественного зерна пшеницы. М.: Росинформагротех. 2018. 396 с.
5. Полушкина Т.М. Органическое сельское хозяйство в мире // *АПК: экономика, управление*. 2017. N3. С. 81-88.
6. Шварцев С.Л. Есть ли будущее у аддитивных технологий? // *Вестник РАН*. 2017. Т. 87. N6. С. 538-547.
7. Кирюшин В.И. Технологическая модернизация земледелия – неотложная задача // *Экономика сельского хозяйства России*. 2009. N2. С. 17-25.
8. Гуреев И.И. Экологическая эффективность комплекса почвообрабатывающих машин для механизации перспективных агротехнологий // *Вестник Курской ГСХА*. 2015. N4. С. 71-73.
9. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии. М.: Лань. 2015. 464 с.
10. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Гончаров Н.Т., Лонин С.Э., Алексеев И.С. Универсальная автоматизированная система управления машинно-тракторными агрегатами // *Вестник РАСХН*. 2018. N3. С.10-14.
11. Редреев Г.В., Качурин В.В. Потенциал современных посевных комплексов на севе // *Вестник Омского ГАУ*. 2017. N4 (28). С. 239-244.
12. Плаксин А.М., Гриценко А.В. Энергетика машинно-тракторных агрегатов: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ. 2015. 307 с.
13. Стадник А.Т., Кабаков В.М., Кабакова О.Г. Техническая оснащенность сельскохозяйственного производства и пути ее совершенствования // *Вестник НГАУ*. 2018. N1(46). С. 166-173.
14. Кирюшин В.И. Технологическая модернизация земледелия России: предпосылки и условия // *Земледелие*. 2015. N6. С. 6-10.
15. Deichmann U., Goyal A., Mishra D. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? *Agricultural Economics*. 2016. Vol. 47. N1. 21-33.
16. Walter A., Finger R., Huber R., Buchmann N. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. N24. 6148-6150.
17. Henry C., Azimi S.M., Merkle N. Road Segmentation in SAR Satellite Images with Deep Fully-Convolution Neural Networks. *Cornell University Library*. 2018. February. 1867-1871.
18. Матвеенко Д.А., Воропаев В.В., Якушев В.В., Блохин С.Ю., Митрофанов Е.П., Петрушин А.Ф. Состояние и перспективы создания новых методов количественной оценки внутрипочвенной изменчивости в точном земледелии // *Агрофизика*. 2020. N1. С. 59-70.
19. Михайленко И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: Издво Политехн. ун-та. 2017. 252 с.
20. Якушев, В.В. Точное земледелие: теория и практика. Спб.: АФИ. 2016. 364 с.
21. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Якушев В.В., Миршель В., Нендель К. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. N3. С.437-445.
22. Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Автоматизированные технологические комплексы почвообработки. Новосибирск: СибИМЭ. 2006. 380 с.
23. Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Моделирование рабочих процессов гибких автоматизированных технологических комплексов почвообработки. Новосибирск: НГАУ. 2018. 204 с.
24. Вейц В.П., Кловский М.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М.: Наука. 1984. 352 с.

REFERENCES

1. Lachuga Yu.F. Sel'skokhozyaystvennomu proizvodstvu – novye znaniya [Agricultural production – new knowledge]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2011. N3. 3-8 (In Russian).
2. Altukhov A.I. Razvitie proizvodstva zerna v strane: mify i real'nost' [Development of grain production in the country: myths and reality]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2017. N3. 31-38 (In Russian).
3. Izmaylov A.Yu., Artyushin A.A., Lichman G.I., Smirnov I.G., Marchenko A.N. Tsifrovye tekhnologii khimizatsii sel'skogo khozyaystva: teoriya i praktika [Digital technologies for chemicalization of agriculture: theory and practice]. Moscow: VIM. 2020. 180 (In Russian).
4. Fedorenko V.F., Sapozhnikov S.N., Petukhov D.A., et al. Nauchnye osnovy proizvodstva vysokokachestvennogo zerna pshenitsy [Scientific basis for the production of high-quality wheat grain]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2018. 396 (In Russian).
5. Polushkina T.M. Organicheskoe sel'skoe khozyaystvo v mire [Organic agriculture in the world]. *APK: ekonomika, upravlenie*. 2017. N3. 81-88 (In Russian).
6. Shvartsev S.L. Est' li budushchee u additivnykh tekhnologiy? [Does additive technology have a future?]. *Vestnik RAN*. 2017. Vol. 87. N6. 538-547 (In Russian).
7. Kiryushin V.I. Tekhnologicheskaya modernizatsiya zemledeliya – neotlozhnaya zadacha [Technological modernization of agriculture is an urgent task]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2009. N2. 17-25 (In Russian).
8. Gureev I.I. Ekologicheskaya effektivnost' kompleksa pochvoobrabatyvayushchikh mashin dlya mekhanizatsii perspektivnykh agrotekhnologiy [Environmental efficiency of a complex of tillage machines for the mechanization of promising agricultural technologies]. *Vestnik Kurskoy GSKhA*. 2015. N4. 71-73 (In Russian).
9. Kiryushin V.I., Kiryushin S.V. Agrotekhnologii [Agrotechnology]. Moscow: Lan'. 2015. 464 (In Russian).
10. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Goncharov N.T., Lonin S.E., Alekseev I.S. Universal'naya avtomatizirovannaya sistema upravleniya mashinno-traktornymi agregatami [Universal automated control system for machine-tractor units]. *Vestnik RASKhN*. 2018. N3.10-14 (In Russian).
11. Redreev G.V., Kachurin V.V. Potentsial sovremennykh posevnykh kompleksov na seve [The potential of modern seeding complexes in the sowing]. *Vestnik Omskogo GAU*. 2017. N4(28). 239-244 (In Russian).
12. Plaksin A.M., Gritsenko A.V. Energetika mashinno-traktornykh agregatov: Monografiya [Power engineering of machine-tractor units: Monograph]. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skiy GAU. 2015. 307 (In Russian).
13. Stadnik A.T., Kabakov V.M., Kabakova O.G. Tekhnicheskaya osnashchennost' sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva i puti ee sovershenstvovaniya [Technical equipment of agricultural production and ways of its improvement]. *Vestnik NGAU*. 2018. N1(46). 166-173 (In Russian).
14. Kiryushin V.I. Tekhnologicheskaya modernizatsiya zemledeliya Rossii: predposylki i usloviya [Technological modernization of agriculture in Russia: prerequisites and conditions]. Zemledelie. 2015. N6. 6-10 (In Russian).
15. Deichmann U., Goyal A., Mishra D. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? *Agricultural Economics*. 2016. Vol. 47. N1. 21-33.
16. Walter A., Finger R., Huber R., Buchmann N. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. N24. 6148-6150.
17. Henry C., Azimi S.M., Merkle N. Road Segmentation in SAR Satellite Images with Deep Fully-Convolution Neural Networks. *Cornell University Library*. 2018. February. 1867-1871.
18. Matveenko D.A., Voropaev V.V., Yakushev V.V., Blokhin S.Yu., Mitrofanov E.P., Petrushin A.F. Sostoyanie i perspektivy sozdaniya novykh metodov kolichestvennoy otsenki vnutripochvennoy izmenchivosti v tochnom zemledelii [State and prospects for the creation of new methods for the quantitative assessment of subsurface variability in precision farming]. *Agrofizika*. 2020. N1. 59-70 (In Russian).
19. Mikhaylenko I.M. Teoreticheskie osnovy i tekhnicheskaya realizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami [Theoretical foundations and technical implementation of agricultural technology management]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2017. 252 (In Russian).
20. Yakushev V.V. Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika [Precision farming: theory and practice]. Saint Petersburg: AFI. 2016. 364 (In Russian).
21. Badenko V.L., Topazh A.G., Yakushev V.V., Mirshel' V., Nendel' K. Imitatsionnaya model' agroekosistemy kak instrument teoreticheskikh issledovaniy [Simulation model of agroecosystem as a tool for theoretical research]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2017. Vol. 52. N3. 437-445 (In Russian).
22. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Avtomatizirovannye tekhnologicheskie kompleksy pochvoobrabotki [Automated technological complexes of soil cultivation]. Novosibirsk: SibIME. 2006. 380 (In Russian).
23. Utenkov G.L., Dobrolyubov I.P. Modelirovanie rabochikh protsessov gibkikh avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov pochvoobrabotki. [Modeling of working processes of flexible automated technological complexes of tillage]. Novosibirsk: NGAU. 2018. 204 (In Russian).
24. Veyts V.P., Klovskiy M.Z., Kochura A.E. Dinamika upravlyaemykh mashinnykh agregatov [Dynamics of controlled machine units]. Moscow: Nauka. 1984. 352.

Конфликт интересов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:
Добролюбов И.П. – техническое предложение по оперативному контролю состояния рабочих машин гибкого технологического комплекса для основной обработки почвы по параметрам двигателя внутреннего сгорания, обработка результатов исследований, формирование общих выводов – 40%.
Утенков Г.Л. – формулировка идеи оперативного контроля состояния рабочих машин гибкого технологического комплекса для основной обработки почвы по параметрам двигателя внутреннего сгорания, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ – 60%.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest.
The authors declare no conflict of interest.

Contribution of the authors:
Dobrolyubov I.P. – a technical proposal for the operational control of the state of working machines of a flexible technological complex for basic soil cultivation according to the parameters of an internal combustion engine, processing of research results, the formation of general conclusions – 40%.
Utenkov G.L. – formulation of the idea of operational monitoring of the state of working machines of a flexible technological complex for the main tillage according to the parameters of an internal combustion engine, revision of the text, formation of general conclusions and literary analysis – 60%.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию **The paper was submitted to the Editorial Office on** **10.03.2021**
Статья принята к публикации **The paper was accepted for publication on** **06.08.2021**