

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКИХ И ТОПЛИВНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРА В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

## DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS FOR DETERMINING TRACTION-DYNAMIC AND FUEL-ECONOMIC PARAMETERS OF THE TRACTOR UNDER OPERATING CONDITIONS

**А.Г. АРЖЕНОВСКИЙ**, к.т.н.

Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО  
Донской ГАУ, Зерноград, Россия, argenowski@mail.ru

**A.G. ARZHENOVSKIY**, PhD in Engineering

Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian  
University, Zernograd, Russia, argenowski@mail.ru

Одним из важнейших направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства является совершенствование методов и средств определения основных показателей тракторов. От их значений напрямую зависят производительность, экономичность и экологическая безопасность машинно-тракторных агрегатов. Для оценки тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора на различных режимах и почвенных фонах производят его тяговые испытания. Однако тяговые испытания требуют дорогостоящего оборудования, а также существенных затрат средств и времени на подготовку и проведение, что обуславливает их выполнение лишь в условиях машиноиспытательных станций. В связи с этим совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов, приемлемых не только для машиноиспытательных станций, но и для конкретных хозяйств, является весьма актуальной проблемой и представляет значительный интерес. Целью работы является совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов путем обоснования и разработки методики определения приведенной массы трактора, позволяющей снизить трудоемкость измерений в условиях эксплуатации. В качестве объекта исследования в данной работе выбран процесс определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов в эксплуатационных условиях. Предметом исследования в настоящей работе явилось установление закономерностей, присущих этому процессу. Предлагаемый метод определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов и измерительно-вычислительный комплекс, его реализующий, позволяют получать тяговую характеристику (зависимости скорости, буксования, тяговой мощности, часового и удельного расходов топлива от нагрузки на различных передачах на данном почвенном фоне) в эксплуатационных условиях, обеспечивая снижение затрат времени и средств.

**Ключевые слова:** переходный режим, трактор, масса, скорость, ускорение, буксование, тяговое усилие, тяговая мощность, часовой и удельный расход топлива.

One of the most important ways to improve the efficiency of agricultural production is to improve methods and means of determining the main indicators of tractors. Their performance directly affects the efficiency, economy and environmental safety of machine and tractor units. To assess the traction-dynamic and fuel-economic indicators of the tractor in various modes and soil backgrounds, its traction tests are performed. However, traction tests require expensive equipment, as well as a significant cost of funds and time to prepare and conduct it, which determines their performance only in conditions of machine testing stations. In this regard, the improvement of methods and means for determining the traction-dynamic and fuel-economic indicators of tractors that are acceptable not only for machine testing stations, but also for specific farms, is a very pressing problem and is of considerable interest. The aim of the work is to improve the methods and means for determining the traction-dynamic and fuel-economic indicators of tractors, by justifying and developing a technique for determining the reduced mass of the tractor, which makes it possible to reduce the laboriousness of measurements under operating conditions. As the object of research in this paper, the process of determining the traction-dynamic and fuel-economic parameters of tractors in operating conditions was chosen. The subject of the study in this paper was the establishment of regularities inherent in this process. The proposed method for determining the traction-dynamic and fuel-economic indicators of tractors and the measuring and computing complex that implements it, make it possible to obtain a traction characteristic (the dependence of speed, slippage, traction, hour and specific fuel consumption on the load on different transmissions on a given soil background) in operational conditions, ensuring a reduction in time and cost.

**Keywords:** transitive mode, tractor, mass, speed, acceleration, slippage, tractive effort, tractive power, hour and specific fuel consumption.

## Введение

Одним из важнейших направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства является совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов. От их значений напрямую зависят производительность, экономичность и экологическая безопасность машинно-тракторных агрегатов (МТА).

Тягово-динамические и топливно-экономические показатели трактора – комплекс зависимостей тяговой мощности ( $N_{кр}$ ), скорости ( $V$ ), часового ( $G_T$ ) и удельного ( $g_{кр}$ ) расходов топлива, буксования ( $\delta$ ) и тягового усилия на крюке ( $P_{кр}$ ).

Для оценки тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора на различных режимах и почвенных фонах производят его тяговые испытания. Результаты испытаний представляют либо в табличной форме, либо в виде кривых на одном графике и называют тяговой характеристикой трактора. Тяговая характеристика представляет собой зависимости рабочих показателей трактора (тяговой мощности, скорости, часового и удельного расходов топлива, буксования) от нагрузки на различных передачах на данном почвенном фоне:  $N_{кр} = f(P_{кр})$ ,  $V = f(P_{кр})$ ,  $G_T = f(P_{кр})$ ,  $\delta = f(P_{кр})$ .

Процесс снятия тяговой характеристики в соответствии с ГОСТ 7057-2001 [1], заключается в проведении ряда опытов с последовательным увеличением нагрузки от холостого хода трактора до максимального тягового усилия на каждой передаче. При снятии тяговой характеристики опыты проводят в следующем порядке. Тракторист по команде оператора, управляющего динамометрической лабораторией, включает заданную передачу и движется прямолинейно. Одновременно оператор устанавливает заданную для опыта нагрузку, и трактор проходит с ней подготовительный и зачетный участок. При выходе трактора на зачетный участок оператор включает приборы динамометрической лаборатории. В конце зачетного участка он снимает показания с приборов (тяговое усилие трактора, продолжительность опыта, расход топлива, число оборотов ведущего и путеизмерительного колес) и готовит лабораторию для следующего опыта. По результатам измерений определяют значения скорости, тяговой мощности, часового и удель-

ного расходов топлива, буксования. Все результаты заносят в протокол испытаний.

На основании вышеизложенного следует, что определение тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов требует дорогостоящего оборудования (динамометрическая лаборатория), а также существенных затрат средств и времени на подготовку и проведение. Это обуславливает выполнение подобных исследований лишь в условиях машиноиспытательных станций.

В связи с этим совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов, приемлемых не только для машиноиспытательных станций, но и для конкретных хозяйств, является весьма актуальной проблемой и представляет значительный интерес.

## Цель исследования

Целью исследования является совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора в условиях эксплуатации.

## Методы исследования

В данной работе исследован метод определения энергетических показателей тракторов в эксплуатационных условиях на переходном режиме [2], разработанный в АЧГАА. Согласно этому методу, исследуемый трактор разгоняется при мгновенном увеличении подачи топлива с минимально-устойчивой до максимальной скорости равномерного прямолинейного движения. При разгоне трактора измеряют значения угловых скоростей и ускорений коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне.

При разгоне агрегата на горизонтальном участке уравнение движения трактора имеет вид:

$$M_T (dV / dt) = P_{дв} - P_f - P_{кр}, \quad (1)$$

где  $M_T$  – приведенная масса трактора;  $(dV/dt)$  – ускорение трактора;  $P_{дв}$  – движущая сила трактора;  $P_f$  – сила сопротивления перекачиванию;  $P_{кр}$  – сила тяги на крюке трактора.

Согласно принципу Даламбера, сила инерции в данный момент характеризует то крюковое усилие, которое может развить трактор, т.е.:

$$P_{кр} = M_T (dV / dt). \quad (2)$$

Приведенная масса трактора определяется из выражения:

$$M_T = M\Psi, \quad (3)$$

где  $M$  – эксплуатационная масса трактора;  $\Psi$  – коэффициент учета вращающихся масс на данной передаче.

Однако у данного метода имеется существенный недостаток – сложность определения значений приведенной массы трактора связанная с трудоемкостью определения коэффициента учета вращающихся масс на различных передачах трактора.

В связи с вышеизложенным целью работы является совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов путем обоснования и разработки методики определения приведенной массы трактора, позволяющей снизить трудоемкость измерений в условиях эксплуатации.

В качестве объекта исследования в данной работе выбран процесс определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов в эксплуатационных условиях.

Предметом исследования в настоящей работе явилось установление закономерностей, присущих этому процессу.

Проблема определения приведенной массы трактора решается тем, что выполняются дополнительные разгоны на различных передачах трактора, догруженного известной (эталонной) массой, с измерением значений углового ускорения путеизмерительного колеса [3, 4]. Уравнение движения трактора будет иметь вид:

$$(M_T + M_{ЭТ})(dV/dt)_{ЭТ} = P_{дв} - P_f - P_{кр}, \quad (4)$$

где  $M_{ЭТ}$  – дополнительная (эталонная) масса, которой догружается трактор;  $(dV/dt)_{ЭТ}$  – ускорение трактора при разгоне с дополнительной (эталонной) массой.

Решая совместно уравнения 1 и 4, имея в виду, что  $P_{дв} = \text{const}$  и  $P_{кр} = 0$ , определим приведенную массу трактора:

$$M_T = \frac{M_{ЭТ} \cdot (dV/dt)_{ЭТ} + g \cdot f}{dV/dt - (dV/dt)_{ЭТ}}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – коэффициент перекатывания трактора.

Ускорение трактора при его разгоне без нагрузки, а также догруженного известной (эталонной) массой связано с угловым ускорением

путеизмерительного колеса следующими зависимостями:

$$dV/dt = (d\omega/dt) r_{ПК}, \quad (6)$$

$$(dV/dt)_{ЭТ} = (d\omega/dt)_{ЭТ} r_{ПК}, \quad (7)$$

где  $d\omega/dt$  – угловое ускорение путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки;  $(d\omega/dt)_{ЭТ}$  – угловое ускорение путеизмерительного колеса при разгоне трактора с дополнительной (эталонной) массой;  $r_{ПК}$  – радиус путеизмерительного колеса.

### Результаты исследования и их обсуждение

С учетом вышеизложенного предлагаемый метод определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов заключается в следующем. При движении трактора за счет снижения подачи топлива достигают частоты вращения коленчатого вала, соответствующей минимально устойчивой скорости равномерного прямолинейного движения. Мгновенно увеличивают подачу топлива до максимальной. При разгоне трактора измеряют значения угловых скоростей и ускорений коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне. Дополнительно измеряют угловое ускорение путеизмерительного колеса при разгоне трактора с дополнительной (эталонной) массой на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне.

Таким образом, значения тягового усилия ( $P_{кр}$ ) определяем по формуле (2) с учетом формул (5), (6) и (7).

Скорость трактора на заданной передаче определяем из выражения:

$$V = \omega_{ПК} r_{ПК}, \quad (8)$$

где  $\omega_{ПК}$  – угловая скорость путеизмерительного колеса.

Буксование трактора определяем по формуле:

$$\delta = \frac{\omega_{ВК} - \omega_{ПК}}{\omega_{ВК}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $\omega_{ВК}$  – угловая скорость ведущего колеса (звездочки).

Угловая скорость ведущего колеса связана с угловой скоростью коленчатого вала двигателя трактора зависимостью:

$$\omega_{ВК} = \frac{\omega_{КВ}}{i_{тр}}, \quad (10)$$

где  $\omega_{\text{вк}}$  – угловая скорость коленчатого вала двигателя;  $i_{\text{тр}}$  – общее передаточное число трансмиссии на заданной передаче.

Тяговую мощность на заданной передаче определяем из выражения:

$$N_{\text{кр}} = p_{\text{кр}} V. \quad (11)$$

Определение топливно-экономических показателей осуществляется посредством фиксации цикловой подачи топлива топливного насоса в режиме максимальной подачи на стенде для проверки и регулировки топливного оборудования [2, 5].

Часовой расход топлива определяем по формуле:

$$G_{\text{т}} = \frac{60 Q n_{\text{н}} \rho}{10^6 k_{\text{ц}}}, \quad (12)$$

где  $Q$  – объем поданного топлива всеми секциями топливного насоса за 1000 циклов;  $n_{\text{н}}$  – частота вращения вала топливного насоса;  $\rho$  – плотность топлива;  $k_{\text{ц}}$  – количество циклов ( $k_{\text{ц}} = 1000$ ).

Удельный расход топлива определяем по формуле:

$$g_{\text{кр}} = 1000 \frac{G_{\text{т}}}{N_{\text{кр}}}. \quad (13)$$

Для реализации предлагаемого метода определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов был разработан и скомплектован измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) (рис. 1), позволяющий определять комплекс зависимостей тяговой мощности ( $N_{\text{кр}}$ ), скорости ( $V$ ), часового ( $G_{\text{т}}$ ) и удельного ( $g_{\text{кр}}$ ) расходов топлива, буксования ( $\delta$ ) и тягового усилия ( $p_{\text{кр}}$ ) на различных передачах на данном почвенном фоне посредством фиксации и обработки массива данных от двух индукционных датчиков, установленных напротив зубчатых венцов маховика коленчатого вала (рис. 2) и шестерни, жестко связанной с путеизмерительным колесом (рис. 3).

При прохождении зубьев венцов маховика и шестерни перед датчиками в них генерируется ЭДС с частотой, пропорциональной угловым скоростям соответствующих венцов.

Сигналы от датчиков фиксируются в памяти персонального компьютера (ПК) посредством аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), платы сопряжения, а также пакета соответствующих программ.

Для обеспечения надежной работы применяется ПК Lenovo B50-30, содержащий процессор Intel Celeron N2830 с тактовой частотой

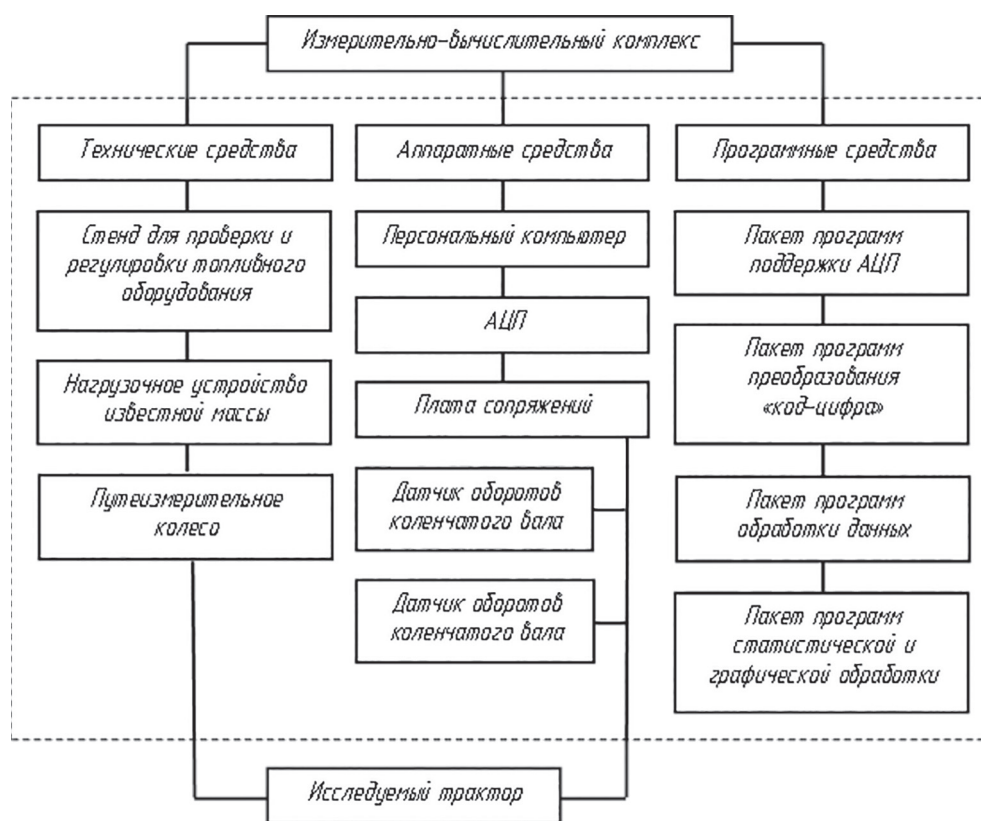


Рис. 1. Схема ИВК для определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов



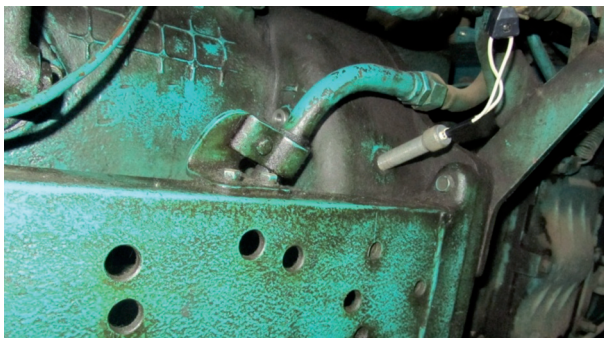


Рис. 2. Расположение датчика оборотов коленчатого вала



Рис. 3. Расположение датчика оборотов путеизмерительного колеса

2,16 МГц, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) объемом 320 Гбайт.

АЦП обеспечивает преобразование электрической аналоговой формы сигнала в цифровую форму, доступную для хранения и обработки микропроцессором и ОЗУ.

Для обработки сигналов датчиков используется АЦП ЛА-2USB-12 (рис. 4). Применяемая модель платы способна обрабатывать 16 дифференциальных каналов (8 ввода и 8 вывода), время преобразования 2 мкс, частота опроса до 500 кГц.

Плата сопряжений (рис. 5) предназначена для соединения платы АЦП непосредственно с датчиками. Плата имеет 6 входов, что позволяет одновременно фиксировать шесть разных параметров. Во время записи данных плату сопряжений необходимо заземлять для предотвращения возникновения наводок.

Датчики соединяются с платой сопряжений посредством экранированных коаксиальных проводников.

Определение тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов предлагаемым ИВК осуществляется в четыре этапа:

- подготовка трактора и ИВК к работе;
- запись сигналов от датчиков оборотов коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки и с дополнительной (эталонной) массой на различных передачах на данном почвенном фоне;
- определение цикловой подачи топлива топливного насоса в режиме максимальной подачи на стенде для проверки и регулировки топливного оборудования;
- обработка полученных данных.

Подготовка трактора и ИВК к работе заключается в развертывании комплекса, присоединения путеизмерительного колеса и установки индукционных датчиков (рис. 2 и 3).

Запись сигналов от датчиков оборотов коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки и с дополнительной (эталонной) массой на различных передачах на данном почвенном фоне заключается в формировании массива данных значений ЭДС, генерируемых катушками соответствующих индукционных датчиков во время соответствующих разгонов трактора.

Перед записью изменения ЭДС датчиков в соответствии с количеством каналов, максимальной частотой вращения коленчатого вала и количеством зубьев маховика двигателя трактора АЦП настраивается на частоту опроса, достаточную для получения достоверных данных.

При разгоне трактора значения ЭДС датчиков оборотов коленчатого вала и путеизмерительного колеса посредством АЦП фиксируются в памяти компьютера с частотой, равной



Рис. 4. Аналогово-цифровой преобразователь ЛА-2USB-12

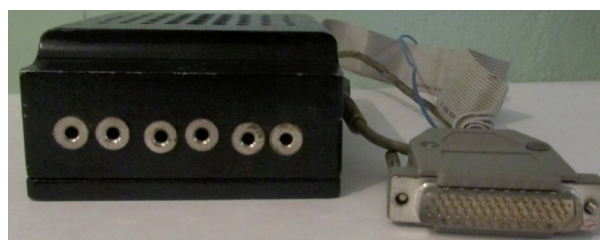


Рис. 5. Плата сопряжений

половине частоты опроса (для двух каналов). Аналогично фиксируются значения ЭДС датчиков при разгоне трактора с дополнительной (эталонной) массой.

В результате получаем файлы с данными значений ЭДС катушек датчиков оборотов в кодовой форме. Пакет прикладных программ АЦП позволяет преобразовать данные в цифровую форму.

При просмотре полученных файлов в графическом режиме отображаются графики изменения ЭДС датчиков в координатах времени разгона  $t$ . Программа выдает порядковый номер измерения (опроса) для любой точки графика.

Определение цикловой подачи топлива топливного насоса в режиме максимальной подачи [5] выполняется на стенде для проверки и регулировки топливного оборудования (рис. 6), входящем в предлагаемый измерительно-вычислительный комплекс.

Обработка полученных данных заключается в определении закономерностей изменения угловых скоростей  $\omega_{\text{вк}} = f(t)$ ,  $\omega_{\text{пк}} = f(t)$  и ускорений  $\varepsilon_{\text{кв}} = f(t)$ ,  $\varepsilon_{\text{пк}} = f(t)$  коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки, а также углового ускорения путеизмерительного колеса  $\varepsilon_{\text{пк эт}} = f(t)$  при разгоне трактора с дополнительной (эталонной) массой на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне.

Для автоматизации процесса обработки данных используется программа обработки данных в среде Turbo-Pascal [6]. Исходными данными для программы являются файлы со значениями ЭДС датчиков в цифровой форме.



Рис. 6. Стенд для проверки и регулировки топливного оборудования

На основании полученных зависимостей  $\omega_{\text{вк}} = f(t)$ ,  $\omega_{\text{пк}} = f(t)$ ,  $\varepsilon_{\text{кв}} = f(t)$ ,  $\varepsilon_{\text{пк}} = f(t)$ ,  $\varepsilon_{\text{пк эт}} = f(t)$  по формулам (2), (8), (9) и (11) определяются зависимости тягово-динамических показателей трактора  $P_{\text{кр}} = f(t)$ ,  $V = f(t)$ ,  $\delta = f(t)$ ,  $N_{\text{кр}} = f(t)$  от времени разгона.

В свою очередь, на основании полученных зависимостей тягово-динамических показателей  $P_{\text{кр}} = f(t)$ ,  $V = f(t)$ ,  $\delta = f(t)$ ,  $N_{\text{кр}} = f(t)$  от времени разгона с учетом формул (12) и (13) определяются требуемые зависимости рабочих показателей трактора (скорости, буксования, тяговой мощности, часового и удельного расходов топлива) от нагрузки на различных передачах на данном почвенном фоне  $V = f(P_{\text{кр}})$ ,  $\delta = f(P_{\text{кр}})$ ,  $N_{\text{кр}} = f(P_{\text{кр}})$ ,  $G_{\text{T}} = f(P_{\text{кр}})$ ,  $g_{\text{кр}} = f(P_{\text{кр}})$ .

### Заключение

Предлагаемый метод определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов и измерительно-вычислительный комплекс, его реализующий, позволяют получать тяговую характеристику трактора (зависимости скорости, буксования, тяговой мощности, часового и удельного расходов топлива от нагрузки на крюке на различных передачах на данном почвенном фоне) в эксплуатационных условиях, обеспечивая снижение затрат времени и средств.

### Литература

1. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2002. 8 с.
2. Щетинин Н.В., Казаков Д.В., Арженовский А.Г., Мальцев Д.О. К определению энергетических показателей тракторов в эксплуатационных условиях на переходном режиме // Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК: Материалы 4-й Российской научно-практической конференции. Ставрополь, 2007. С. 194–197.
3. Арженовский А.Г., Асатурян С.В., Чичилов И.И., Черемисин Ю.М., Дагладян А.А. Должиков В.В. Способ определения силы сопротивления рабочих машин: патент на изобретение № 2612950, Российская Федерация. Опубликовано 14.03.2017. Бюл. № 8.
4. Арженовский А.Г., Асатурян С.В., Чичилов И.И., Черемисин Ю.М., Дагладян А.А. Должиков В.В. Способ определения силы сопротивления рабочих машин: патент на изобретение

№ 2620983, Российская Федерация. Опубликовано 30.05.2017. Бюл. № 16.

5. Кривенко П.М., Федосов И.М. Дизельная топливная аппаратура. М.: Колос, 1970. 536 с.
6. Асатурян С.В., Арженовский А.Г., Чичиланов И.И. Программа для определения энергетических показателей дизельных двигателей на переходных режимах: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009615659, Российская Федерация.

## References

1. GOST 7057-2001. Agricultural tractors. Test methods. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2002. 8 p.
2. Shchetinin N.V., Kazakov D.V., Arzhenovskiy A.G., Mal'tsev D.O. The energy performance of tractors under operating conditions in a transient mode. Fiziko-tekhicheskie problemy sozdaniya novykh tekhnologiy v APK: Materialy 4-y Rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Physico-technical problems of creating new technologies in the agro-industrial complex: Materials of the 4th Russian Scientific and Practical Conference]. Stavropol', 2007, pp. 194–197 (in Russ.).

3. Arzhenovskiy A.G., Asaturyan S.V., Chichilanov I.I., Cheremisin Yu.M., Dagldiyan A.A., Dolzhikov V.V. Sposob opredeleniya sily soprotivleniya rabochikh mashin [Method for determining the resistance force of working machines]: patent na izobretenie No 2612950, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 14.03.2017. Byul. No 8.
4. Arzhenovskiy A.G., Asaturyan S.V., Chichilanov I.I., Cheremisin Yu.M., Dagldiyan A.A., Dolzhikov V.V. Sposob opredeleniya sily soprotivleniya rabochikh mashin [Method for determining the resistance force of working machines]: patent na izobretenie No 2620983, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 30.05.2017. Byul. No 16.
5. Krivenko P.M., Fedosov I.M. Dizel'naya toplivnaya apparatura [Diesel fuel equipment]. Moscow: Kolos Publ., 1970. 536 p.
6. Asaturyan S.V., Arzhenovskiy A.G., Chichilanov I.I. Programma dlya opredeleniya energeticheskikh pokazateley dizel'nykh dvigateley na perekhodnykh rezhimakh [Program for determining the energy performance of diesel engines in transient modes]: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No 2009615659, Rossiyskaya Federatsiya.