

## К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ТРАКТОРА

## THE DEVELOPMENT OF TRACTOR THEORY

**Г.М. КУТЬКОВ**, д.т.н.

РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия,  
gkutkow@yandex.ru

**G.M. KUT'KOV**, Dsc in Engineering

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev  
Agricultural Academy, Moscow, Russia, gkutkow@yandex.ru

В статье рассмотрены основные разработки автора в области теории трактора, изложенные в разное время и в разных изданиях технической литературы, включая и журнал «Тракторы и сельхозмашины»: тяговая динамика трактора; модульные энерготехнологические средства и блочно-модульная система агрегатирования трактора; метод оптимизации типажа трактора, а также внедренная в производство камера сгорания двигателя Д-75 и ГОСТ на испытания сельскохозяйственных тракторов.

**Ключевые слова:** трактор, двигатель, компьютер, сила, момент, мощность, энергонасыщенность, моделирование, тяговая динамика, технический уровень, технологический уровень, технологические свойства, типаж тракторов.

**Для цитирования:** Кутьков Г.М. К вопросу развития теории трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 3. С. 6–19. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-3-6-19.

The article discusses the main developments of the author in the field of tractor theory, which were published at different times and in different editions of technical literature, including Tractors and Agricultural Machinery journal. These are traction dynamics of the tractor; modular energy technology facilities and block-modular tractor aggregation system; a method for optimizing the type of a tractor, as well as the combustion chamber of the D-75 engine implemented in production and GOST for testing agricultural tractors.

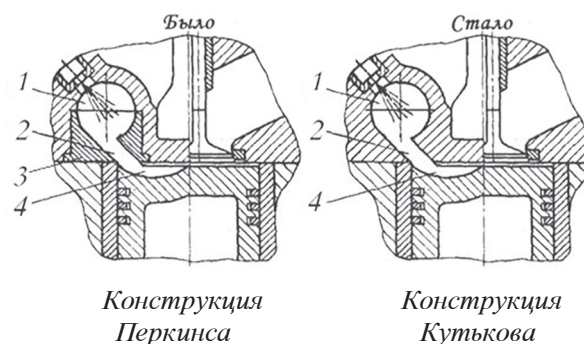
**Keywords:** tractor, engine, computer, power, moment, power, energy saturation, modeling, traction dynamics, technical level, technological level, technological properties, type of tractors.

**Cite as:** Kut'kov G.M. The development of tractor theory. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 3, pp. 6–19 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-3-6-19.

### Камера сгорания для двигателя Д-75

Моя творческая жизнь началась сразу после окончания института на ХТЗ<sup>1</sup> конструктором в дизельном КБ нового проектирования ОГК<sup>2</sup> (1954–1961): я участвовал в создании нового дизеля и первого скоростного гусеничного трактора (Т-75) на базе серийно выпускаемого трактора ДТ-54 путем его модернизации. На новом двигателе предполагалось применить, а также осуществить форсирование серийного двигателя Д-54 по мощности с 54 до 75 л.с. применением разделенной сферической камеры сгорания конструкции Перкинса, включавшей «утепленную» вставку 3 (рис. 1).

Вставка называлась «утепленной», потому что ее наружные поверхности не омывались охлаждающей жидкостью. Струя распыленного



**Рис. 1. Камера сгорания дизеля Д-75: полости камеры сгорания:**

1 – полусфера в головке блока цилиндров; 2 – канал во вставке 3 (было) и в головке блока (стало);  
4 – в надпоршневом пространстве

*Fig. 1. Combustion chamber of diesel D-75: combustion chamber cavities: 1 – hemisphere in the cylinder head; 2 – channel in insert 3 (before) and in the block head (after); 4 – in the space above the piston*

<sup>1</sup> Харьковском тракторном заводе.

<sup>2</sup> Отдел главного конструктора.

форсункой топлива направлялась на наиболее раскаленную от нагрева часть камеры сгорания. Предполагалось, что контакт топлива с такой поверхностью камеры сгорания будет способствовать более качественному смесеобразованию, лучшей организации рабочего процесса дизеля и положительно скажется на его топливно-экономических и мощностных показателях.

Наша практика применения камеры типа Перкинса на первых опытных образцах двигателей выявила появление трещины головки цилиндров от расточки под вставку через одну тысячу часов работы дизеля. Помимо отмеченного, изготовление вставки камеры сгорания не вписывалось в общую технологию производства трактора. Требовалась дорогая жаропрочная сталь. Заготовка вставки изготавливалась по выплавляемым (восковым) моделям. Это очень дорогая технология, по существу, неприемлемая для массового производства такого изделия, как трактор. Неравномерное распределение массы металла по высоте стенок вставки приводило к утяжинам в процессе охлаждения отливки и нарушению геометрии сферической поверхности. По этому параметру более половины заготовок выбраковывалась.

Следует отметить важную особенность периода (1959–1960) внедрения модернизированного скоростного трактора Т-75. В стране проводилась кампания специализации производства. В частности, изготовление двигателя с ХТЗ должно было быть перенесено на завод СМД. Весь штат конструкторов-двигателистов нового проектирования подчистую, включая участников модернизации дизеля Д-75, по указанию вышестоящих органов был перенесен на СМД<sup>3</sup>. Я не пошел работать на новое место, и мне, приставив двоих помощников, поручили (с прямым подчинением Главному конструктору Б.П. Кашубе) участие в завершении государственных испытаний трактора Т-75 и внедрение в производство модернизированного двигателя Д-75. Принимая работу, я твердо решил заменить камеру сгорания Перкинса цельнолитой,

поскольку причиной 100 % выхода из строя двигателей с камерой Перкинса в эксплуатации, по моему мнению, служила вставка. Это чисто конструктивная недоработка. Внедрение в производство двигателя с таким дефектом было бы крайне неосмотрительно и не сулило ничего хорошего. Последствия могли быть намного серьезнее тех, что имели место при обрыве противовесов коленчатого вала. Главный конструктор был против замены камеры сгорания. Его позиция, по-моему, имела политическую подоплеку. Генеральный секретарь ЦК КПСС Н.С. Хрущев, посетивший в это время Великобританию, рекомендовал двигатель Перкинса в качестве примера дизеля высокого технического уровня по сравнению с нашими, близкими ему по параметрам и назначению.

Мне удалось спроектировать камеру сгорания, изготовить несколько головок цилиндров с цельнолитой камерой сгорания и провести испытания двигателя в обход Б.П. Кашубы через его заместителя – Юрия Анатольевича Ходулина. Испытания показали, что дефект был устранен, а замена камеры не повлияла на топливно-экономические и мощностные показатели дизеля. Следовательно гипотеза о положительном влиянии вставки камеры сгорания на рабочий процесс дизеля оказалась несостоятельной. Этот вывод, по моему мнению, следует отнести к теоретическим аспектам решаемой проблемы.

Когда подготовка производства дизеля Д-75 и государственные испытания трактора Т-75 были практически завершены, с места государственных испытаний пришла телеграмма, сообщавшая о возникновении трещины в головке цилиндров через тысячу часов работы двигателя. Я вынужден был познакомить Б.П. Кашубу с содержанием телеграммы и результатами испытаний дизеля с цельнолитой камерой сгорания. Решение о ее внедрении было принято.

### **Тяговая динамика трактора**

В период обучения в аспирантуре и работы в ВИМе<sup>4</sup> (1961–1969) мною была начата разра-

<sup>3</sup> Двигатель СМД – дизельный мотор, хорошо знакомый работникам машинно-тракторных станций (МТС), широко распространенных во времена существования СССР. Выпуск этих моторов был освоен в 1958 г. на харьковском заводе «Серп и Молот» (1881). Серийное производство семейства двигателей СМД, предназначенных для агрегатирования различных видов сельскохозяйственной техники (тракторы, комбайны и пр.) было прекращено в связи с прекращением деятельности предприятия (2003). В настоящее время силовые агрегаты типа СМД выпускаются на Белгородском моторном заводе (БМЗ) (<https://dvigatels.ru/russia/dvigatel-smd.html>).

<sup>4</sup> История Федерального научного агроинженерного центра ВИМ началась 26 января 1930 г. – с Постановления коллегии Народного комиссариата земледелия СССР «О Всесоюзном институте механизации обобщественного сельского хозяйства». (<https://vim.ru/center/history/>).

ботка двух научно-технических направлений: «Тяговая динамика трактора» и «Методика оптимизации типажа сельскохозяйственных тракторов». Основу первого научного направления заложил академик ВАСХНИЛ Василий Николаевич Болтинский исследованиями работы тракторного двигателя при колебательном характере нагрузочного момента [1].

Различия между статическим и динамическим представлением тягового процесса трактора состоят в следующем. В тяговом расчете трактор принято рассматривать как некое тело (болванка), обладающее источником энергии (ДВС) и подверженное единственному статическому воздействию – силе тягового сопротивления орудия. В действительности же трактор – это динамическая система, состоящая из отдельных колебательных элементов, подверженная одновременно нескольким внешним воздействиям, которые носят динамический (колебательный), а не статический характер.

На рис. 2 показаны статическое (а) и динамическое (б) представления работы трактора в тяговом процессе. В первом случае трактор схематически представлен статическими показателями – весом трактора  $G_{\text{тр}}$  (сила тяжести) и мощностью двигателя  $N_e$ . На трактор действует постоянная сила сопротивления от орудия  $P_{\text{кр}} = \text{const}$ . Трактор, потребляя мощность двигателя  $N_e$ , преодолевает силу сопротивления и перемещается с постоянной скоростью  $V_{\text{тр}} = \text{const}$ .

На рис. 2, б, трактор впервые представлен вместо инерционного звена тремя колебательными звеньями динамической системы: двигатель – регулятор  $m_1 J_1$ , подвеска  $m_2 J_2$ , тракторист – трактор – тракторист  $m_3 J_3$  ( $m$  – масса;  $J$  – момент инерции). Внешними воздействиями на трактор служат: действия тракториста по управлению трактором  $\alpha_{\text{тр}} = f(t)$ ; сила сопротивления орудия  $P_{\text{кр}} = f(t)$ ; неровности профиля дороги (поля)  $q_h = f(t)$ . Каждое из этих воздействий непостоянно, а изменяется по закону случайной функции. Реакция трактора как динамической системы на внешние воздействия выражается в колебаниях скорости его перемещения,  $V_{\text{тр}} = V_{\text{ар}}$ .

В тяговой динамике рассмотрены два режима работы трактора: трогание и разгон (переходный процесс); работа при установившейся нагрузке. Моим соисполнителем, изучавшим трогание и разгон, был М.М. Шлуфман.

При установившейся нагрузке (движение трактора на гоне с орудием) на коленчатый вал двигателя поступает момент сопротивления  $M_c = f(t)$  как сумма перечисленных выше воздействий  $P_{\text{кр}}$ ,  $q_h$ ,  $\alpha_{\text{тр}}$ . При теоретическом анализе трогания и разгона воздействия  $q_h$  и  $\alpha_{\text{тр}}$  не учитываются.

Монография В.Н. Болтинского, в которой изложены результаты его научных разработок, послуживших основой наших исследований, была опубликована в 1949 г., в период послевоенного восстановления и развития народного хозяйства, накануне бурного всплеска отраслевой науки. В 1960-е г. произошел резкий подъем общего уровня развития прикладных наук в технике. Это были годы наивысшего экономического расцвета страны, характеризовавшиеся в числе прочего развитием кибернетики, теории вероятностей, теории случайных функций и др.

В практике исследований появились первые электронные аналоговые вычислительные машины – ЭВМ типа МН-7. С их использованием при сочетании теории случайных функций и теории регулирования стало возможным внедрять методы математического и электронного моделирования реальных условий работы трактора, а также изучать, не выезжая в поле, показатели работы трактора с учетом колеба-

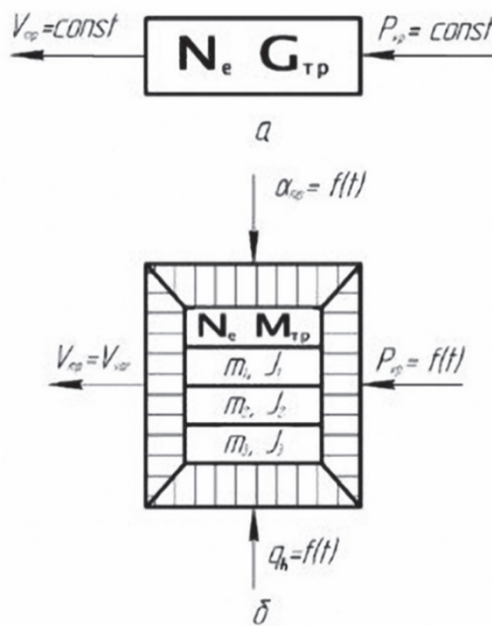


Рис. 2. Статическое (а) и динамическое (б) представления работы трактора

Fig. 2. Static (a) and dynamic (b) representations of the operation of the tractor

ний нагрузки, остова трактора и динамических процессов в целом, возникающих в условиях эксплуатации.

К тому времени в полевых опытах начали применять тензометрирование – измерение не-электрических величин (главным образом силы и момента) электрическим методом с регистрацией показателей на ленте осциллографа. Исследовательские испытания с использованием тензометрирования и осциллографирования хорошо сочетались с теоретическими опытами на электронных моделях.

Перечисленные достижения позволили поднятые В.Н. Болтинским проблемы изучать на более высоком научно-техническом уровне с применением теории регулирования, методов кибернетики, открыли новый этап в развитии науки о тракторе. Стало возможным более глубоко и с большей достоверностью изучать колебания с позиции их вредного влияния на эксплуатационные показатели и разрабатывать мероприятия конструктивного и эксплуатационного характера, предотвращающие или снижающие это влияние.

Вредность колебаний состоит не только в снижении эксплуатационных показателей работы трактора. Они отрицательно сказываются на условиях труда тракториста, приводят к ослаблению крепежа, преждевременному износу и поломкам деталей. На их возбуждение и поддержание, а следовательно, и на все перечисленные отрицательные явления затрачивается энергия тракторного дизеля, то есть расходуется топливо. В связи с этим предложена структура уравнения энергетического баланса с учетом динамических составляющих (1).

Уравнение энергетического баланса, как известно, отражает распределение энергии двигателя на выполнение основного технологического процесса, совершение работы в разных механизмах трактора и взаимодействие движителей с дорогой. В общем случае движения трактора уравнение мощностного баланса имеет следующий вид:

$$N_e = N_{кр} + N_{ВОМ} + N_{тр} + N_{\delta} + N_f + N_i + N_{КОМ} + N_j + N_p + N_n + N_n, \quad (1)$$

где  $N_e$  – эффективная мощность двигателя;  $N_{кр}$  – тяговая мощность на крюке трактора;  $N_{ВОМ}$  – мощность на валу отбора мощности;  $N_{тр}$ ,  $N_{\delta}$ ,  $N_f$ ,  $N_i$  – мощности, характеризующие расход энергии на трение в трансмиссии, бук-

сование движителей, преодоление сопротивлений качению и подъема;  $N_{КОМ}$  – мощность, необходимая для создания условий труда тракториста;  $N_j$  – мощность сил инерции;  $N_p$  – мощность рассеивания, поглощаемая деформацией шин, устройствами для снижения колебаний и другими упругими элементами конструкции трактора;  $N_n$  – недоиспользованная мощность, возникающая вследствие нелинейности регуляторной характеристики двигателя;  $N_n$  – мощность, затрачиваемая на буксование движителей и качение трактора, возникающая дополнительно вследствие подворотов, осуществляемых на гоне.

### Динамические составляющие потерь и недоиспользования мощности энергетического баланса трактора:

$N_j, N_p, N_n, N_n$

Электронные модели на основе наших математических моделей разрабатывал Вадим Петрович Елизаров, сотрудник отдела автоматизации ВИМа, где имелись две аналоговые ламповые ЭВМ модели МН-7. Исследования на электронных моделях проводили вместе с ними. В.П. Елизаров – наш «помощник» – впоследствии доктор технических наук, видный ученый (дорос до директора НИИ), в последние годы, когда ВИМ вошел в систему РАН, работает первым заместителем директора института.

Полевые опыты потребовали достаточно сложного дооборудования трактора. Сбоку, слева от кабины трактора, сделана консольно висящая над гусеницей пристройка 2 (рис. 3), в которой размещены осциллограф, усилитель и другая измерительное оборудование, а сзади кабины установлен бензиновый электрогенератор мощностью 1 кВт, обеспечивающий питание постоянным током системы тензометрирования: тензодатчики, осциллограф и усилитель. Для установки тензометрических датчиков потребовалась частичная разборка трактора, обработка деталей для мест их наклеивания. Это были одни из первых опытов применения осциллографирования динамических процессов, сопровождающих работу трактора в полевых условиях. Все было в новинку.

По результатам теоретических исследований и полевых опытов в 1964 г. В.П. Елизаровым, Г.М. Кутьковым и М.М. Шлуфманом была опубликована монография [2]. Это была первая публикация, излагавшая результаты ис-



**Рис. 3. Опытный трактор с пристройкой для размещения измерительной аппаратуры:**  
1 – патрубков от воздухоочистителей к компрессору;  
2 – приборный отсек; 3 – тахометр

*Fig. 3. Prototype of the tractor with an extension for the placement of measuring equipment:  
1 – branch pipe from air cleaners to the compressor;  
2 – instrument compartment;  
3 – tachometer*

следований математического и электронного моделирования работы трактора при разгоне и установившейся нагрузке, что стало прорывом в развитии теории трактора, инициировавший развитие темы другими исследователями.

Особенность программы тягово-динамического расчета состоит в том, что она учитывает колебания нагрузки на двигатель. Внедрение методов электронного моделирования в первый период разработки темы сдерживалось тем, что первые персональные компьютеры, получившие широкое распространение, были цифровыми, слабыми и не имели аналогового входа в отличие ламповых аналоговых ЭВМ МН-7, которые были более приспособлены для этого и на которых проводились исследования в ВИМе.

На основе материалов монографии «Тяговая динамика трактора» [3] кафедрой «Системы автоматического управления» Калужского филиала МВТУ им. Н.Э. Баумана совместно с кафедрой В.Н. Сидорова «Агроинженерия» были разработана и внедрена в учебный процесс электронная модель работы трактора в агрегате с сельскохозяйственной машиной.

Основным вкладом в развитие теории трактора можно считать издание трех монографий [2–4 и включение в классическую теорию трактора Е.Д. Львова отдельного раздела «Тяговая динамика трактора» в три учебных издания [5–7] для вузов.

Заканчивая тему тяговой динамики, следует отметить монографию Арнольда Альбертовича Соловейчика «Математические модели случайных воздействий в статистической динамике мобильных сельскохозяйственных агрегатов» (2013), в которой на высоком математическом уровне получили дальнейшее развитие фундаментальные положения моделирования динамических процессов в тракторе.

### **Метод оптимизации типажа тракторов**

В 1964 г. меня назначили заведующим тракторной лабораторией в ВИМе. Следовало определиться с выбором базовой научно-исследовательской темы, которая определяла бы лицо лаборатории и служила ее научным кредо. Эта тема, в моем представлении, должна была быть понятной, ее народно-хозяйственная значимость – очевидной, а методика исследований предполагала бы использование самых современных достижений в области фундаментальных наук.

Я пришел к мысли об оптимизации типажа тракторов. Актуальность проблемы заключалась в следующем.

Шли 1960-е гг., в стране действовала плановая экономика. Производство тракторов было массовым, более 400–500 тысяч штук в год, разномарочным по типоразмеру и по назначению. Остро стоял вопрос упорядочения типоразмерного ряда тракторов.

Разработка и постановка новых тракторов на производство осуществлялась только в соответствии с утвержденным правительством страны типажом тракторов, построенным по двум основным показателям: вес трактора (номинальное тяговое усилие) и эксплуатационная мощность двигателя. Типаж тракторов разрабатывался заказчиком – Минсельхозом и производителем тракторов – Минтракторсельмашем, а согласовывался с «Союзсельхозтехникой». Специалисты ВИМа и НАТИ (Государственный союзный тракторный НИИ, ликвидированный во время перестройки), непосредственно разрабатывавшие типоразмерный ряд, как правило, занимали разные позиции по номенклатуре и основным параметрам типоразмерного ряда тракторов. Эти позиции не имели объективной основы ни с той, ни с другой стороны. Они определялись уровнем квалификации отдельных отраслевых ученых и специалистов, технической позици-

ей каждого из них, а также интересами отрасли, которые были, как правило, кардинально противоположными у заказчика и изготовителя тракторов. Между специалистами внутри каждой из групп также существовали разногласия.

Представители заказчика руководствовались в основном перспективой развития технологий сельскохозяйственного производства, а изготовители тракторов – интересами технологической преемственности промышленного производства, сохранением ой унификации.

В 1950-е гг. в народном хозяйстве СССР начали применяться технико-экономические и экономико-математические методы оптимальных расчетов, основанные на использовании теории линейного программирования (ЛП) и электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ). Я выдвинул идею применить новые научные методы для обоснования оптимального типажа сельскохозяйственных тракторов, чтобы исключить субъективный подход к решению крайне важного для страны вопроса. По моему мнению, это упорядочило бы на объективной основе неразбериху в типаже тракторов и могло бы принести значительный экономический эффект.

Логично было бы руководство темой возложить на автора идеи. Но я для себя решил продолжать удачно начатую разработку проблемы динамики трактора будучи загруженный текущими вопросами лаборатории, мне трудно было бы руководить еще одной темой. В связи с этим остро встал вопрос о руководителе темы.

Я предложил возглавить новую тему сотруднику лаборатории кандидату технических наук Виктору Ивановичу Мининзону. Среди сотрудников лаборатории он выделялся хорошей теоретической подготовкой, высокими знаниями, полученными в МВТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Требовалась коренная переквалификация специалиста – практически с инженера в экономиста. Проведя очень глубокий анализ и тщательно оценив ситуацию, В.И. Мининзон принял мое предложение.

В творческом содружестве с Виктором Ивановичем была сформулирована и опубликована [8–10] проблема разработки оптимального типажа сельскохозяйственных тракторов для растениеводства страны, заложен теоретический и методический фундамент. По существу, был разработан укрупненный алгоритм

выполнения исследований. Исходными предпосылками стали следующие положения:

- ориентация на решение проблемы современными экономико-математическими методами с использованием ЛП и ЭЦВМ;
- определение оптимального типажа тракторов совместно с номенклатурой всех агрегируемых с ними машин и других средств механизации работ в растениеводстве;
- максимальный учет зональных особенностей сельскохозяйственного производства (разнообразии природно-климатических условий и возделываемых культур, производственной специализации и размеров сельскохозяйственных предприятий);
- использование при определении оптимального типажа прогрессивных характеристик как зон сельскохозяйственного производства, так и различных ресурсов (агротехники, технологических процессов, средств механизации и др.).

Основные методические положения предусматривали:

- представление сельского хозяйства страны совокупностью основных природно-климатических зон;
- представление каждой зоны совокупностью нескольких модельных (расчетных) сельскохозяйственных предприятий (хозяйств);
- рассмотрение в каждом модельном хозяйстве полного законченного ежегодного цикла всех полевых и транспортных работ с выполнением каждой из них в полном объеме и в оптимальные агротехнические сроки. При этом учитываются органические взаимные связи ряда работ по срокам, темпам и объемам их выполнения;
- составление единого для всей страны и достаточно полного («загущенного») исходного перечня сельскохозяйственной техники, охватывающего возможные потребности модельных хозяйств всех зон. В пределах агротехнических, технологических и технических ограничений в этот перечень включаются тракторы всех типов, тяговых классов и возможных уровней энергонасыщенности, а также машины всех типов с различной шириной захвата, пропускной способностью, грузоподъемностью;
- размеры и структуру всех механизировано обрабатываемых площадей (посевов, паров и естественных сенокосов), рациональный севооборот;

– перспективные технологии возделывания и уборки каждой из сельскохозяйственных культур и соответствующие перечень, объемы и рациональные агросроки механизированных работ, урожайность, нормы внесения органических и минеральных удобрений, агротехнически допустимый диапазон рабочих скоростей;

– разбивку календарного года на рабочие периоды (не обязательно одинаковой продолжительности), общий список и объемы работ с указанием периодов их выполнения (при этом объединяются одинаковые работы, подлежащие одновременному выполнению), продолжительность рабочей смены, коэффициенты сменности и усредненные (по многолетним наблюдениям) данные о сокращении рабочего времени вследствие неблагоприятных метеорологических условий;

– данные о природно-производственных условиях (усредненные значения площади полевых участков и длины гона, характеристика почв, коэффициенты учета влияния рельефа и конфигурации полевых участков на производительность агрегатов, средние расстояния перевозок различных грузов и внутрисменных переездов техники с поля на поле, характеристика дорожных условий);

– перечень и состав агрегатов, потенциально пригодных для выполнения каждой из работ в условиях конкретного модельного хозяйства.

Научные исследования по сформулированной проблеме были начаты в ВИМе в середине 60-х гг. в рамках разработок перспективной «Системы машин» для комплексной механизации растениеводства, проводившихся на каждую очередную пятилетку. К участию в этой работе были привлечены более 130 научно-исследовательских и учебных учреждений МСХ СССР, работающих в области механизации сельского хозяйства, а также НАТИ и ВИСХОМ<sup>5</sup>.

Ввиду большой размерности оптимизационных задач требовалось применение для их решения наиболее мощных в стране ЭЦВМ. В этой связи была достигнута договоренность использования вычислительной системы ЛП/БЭСМ-6 в ВЦ АН СССР (канд. физ.-мат. наук А.И. Станевичус) для серийного выполнения необходимых оптимизационных расчетов.

В 1972 г. работу вместе с В.И. Мининзоном и сотрудниками лаборатории с трудом удалось перевести в НАТИ. С учетом специфики НАТИ, как головного НИИ тракторостроения, работы были ориентированы не только на обоснование перспективного типажа сельскохозяйственных тракторов, но и на разработку предложений по дальнейшему развитию производства сельскохозяйственных тракторов на отечественных заводах.

В период с 1981 по 1990 г. были разработаны предложения по оптимизации типажа тракторов, по перспективным размерам и структуре тракторного парка для растениеводства страны, а также по дальнейшему развитию отечественного тракторостроения. Эти предложения были использованы при разработке АН СССР и ГКНТ «Комплексной программы научно-технического прогресса СССР на 1986–2005 годы», которая так и не была реализована из-за начавшейся перестройки государственного устройства страны.

В 1970-е гг., когда мы с В.И. Мининзоном работали уже в НАТИ, проведены исследования технико-экономического аспекта проводимых мною исследований по созданию трактора второго поколения и мобильных энерготехнологических средств на его основе, (речь об этой работе – ниже).

После 1990 года работы по проблеме оптимизации типажа тракторов были прекращены ввиду перехода России от государственной плановой экономики к рыночной. Однако на базе задела и опыта предшествующих работ были выполнены исследования по оценке потенциала отечественного рынка сельскохозяйственных тракторов, по определению размеров и структуры потребного стране парка сельскохозяйственных тракторов и некоторые другие работы.

### **Модульные энерготехнологические средства**

«...Для сельскохозяйственных машин и орудий должны существовать некоторые предельные размеры по массе и скоростям. Излишек массы бесполезен или даже вреден, а, с другой стороны, недостаток его также недопустим». – это положение В.П. Горячкина говорит о том, что основное направление исследования пер-

<sup>5</sup> Всесоюзный институт сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ), он же Научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения им. В.П. Горячкина, был создан в 1928 г. (<https://www.agrobase.ru>).

спективы развития сельскохозяйственного трактора следует проводить, пользуясь показателем энергонасыщенности трактора  $\mathcal{E}_{\text{тр}}$ , отражающим отношение эксплуатационной мощности двигателя  $N_3$  к эксплуатационному весу  $G_{\text{тр}}$  трактора:

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = N_3 / G_{\text{тр}}$$

Оценивать энергонасыщенность конкретной модели трактора мною было предложено путем сопоставления ее энергонасыщенности с эталонной энергонасыщенностью.

Эталонной энергонасыщенностью сельскохозяйственного трактора предложено принять отношение к эксплуатационному весу трактора без балласта эффективной мощности двигателя, развиваемой им при работе с заданной номинальной тяговой нагрузкой и номинальной скоростью движения на пахоте, которую общепринято считать равной 2,2–2,5 м/с (8–9 км/ч). В настоящее время достигнутые скорости выполнения технологических операций не проявляют признаков существенного повышения. Эталонная энергонасыщенность колесного трактора составляет 1,5 кВт/кН [7]. При изменении скорости выполнения технологических операций значение эталонной энергонасыщенности может быть скорректировано.

В соответствии с прогнозом развития энергонасыщенности трактора, выполненном нами в 1980-е гг. [11], она должна была непрерывно повышаться в соответствии с логистой, как показано на рис. 4. Выделено три уровня энергонасыщенности и соответствующие им три технической концепции: тяговая, тягово-энергетическая и энергетическая. Каждому уровню энергонасыщенности, по моему замыслу, должна соответствовать своя система агрегатирования трактора с сельскохозяйственной машиной.

Анализ параметрических показателей показал [12], что в настоящее время характеристика выпускаемых ведущими тракторостроительными фирмами тракторов по поколениям выглядит следующим образом. Из 81 проанализированной модели трактора:

- 4 обладают  $\mathcal{E}_{\text{тр}} \leq 1,5$  кВт/кН – I поколение;
- 57 –  $\mathcal{E}_{\text{тр}} = 1,5$ –2,25 кВт/кН – II поколение;
- 20 –  $\mathcal{E}_{\text{тр}} > 2,25$  кВт/кН – III поколение.

На рис. 5 показано поэтапное изменение соотношения массы технологической части  $M_{\text{Тс}}$  и массы энергетической части  $M_{\text{Эс}}$  при условии, что масса машинно-тракторного агрегата  $M_{\text{МТА}}$  на всех трех этапах сохраняется постоянной. Эволюционный рост массы технологической части вызван стремлением повысить производительность МТА, что неизбежно сопровождается ростом тяговой нагрузки. Таким образом, с увеличением энергонасыщенности сила тяги трактора снижается, а потребность в ней возрастает.

Радикальным способом решения проблемы дефицита силы тяги трактора служит активи-

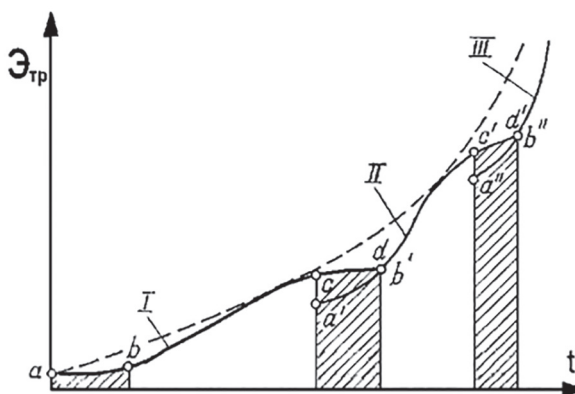


Рис. 4. Прогноз развития энергонасыщенности трактора (1983 г.)

Fig. 4. Forecast of the development of the energy saturation of the tractor (1983)

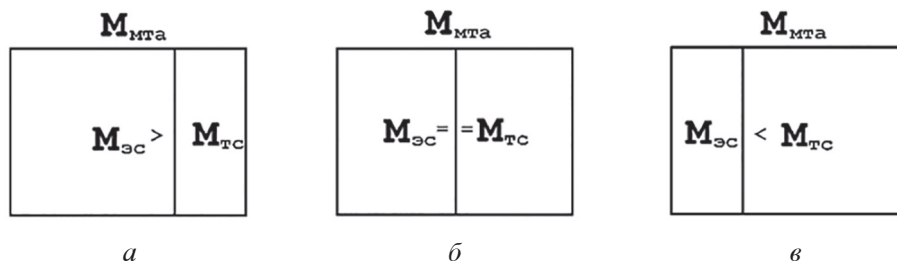


Рис. 5. Изменение соотношение массы энергетической и технологической частей МТА:

*a* – было; *б* – стало; *в* – прогноз

Fig. 5. Change in the ratio of the mass of the energy and technological parts of the machine-tractor unit: *a* – before; *б* – after; *в* – forecast



зация веса МТА путем оснащения его технологической части ведущими колесами с приводом от системы отбора мощности трактора. Тогда в создании силы тяги будет участвовать весь вес агрегата. Часть мощности двигателя реализуется через ходовую систему трактора, а часть – через ведущие колеса технологической части агрегата. Появляется возможность теоретически неограниченного перемещения веса трактора в вес агрегатируемой с ним машины.

В настоящее время мировое тракторостроение, как было показано выше, производит тракторы, обладающие энергонасыщенностью, свойственной тракторам второго поколения, тягово-энергетической концепции и выше, а используются в роли тягачей. Чтобы выпускаемые тракторы соответствовали функциональным свойствам тягача, их комплектуют балластными грузами, вес которых достигает, по литературным источникам, половины веса трактора. Когда разрабатывался прогноз развития трактора (начало 1980-х гг.), изображенный на рис. 4, я не предполагал возможность столь высокого балластирования. Поэтому была разработана блочно-модульная система агрегатирования [5], основанная на применении транспортно-технологического модуля (ТТМ). На рис. 6 изображены МЭС-200 тягового класса 2–3 и МЭС-300 тягового класса 3–5, а на рис. 7 – тяговая характеристика трактора тягово-энергетической концепции тягового класса 3–5.

Работа МТА с третьим подсоединяемым мостом обладает следующими преимуществами по сравнению с МТА на основе забалластированного трактора с двумя мостами:

– повышается курсовая устойчивость МТА при выполнении операций с высоким тяговым сопротивлением орудий;

– вертикальные и горизонтальные колебания от орудия воспринимает ТТМ, вследствие чего снижаются динамические нагрузки на трактор и улучшаются условия труда тракториста;

– создается пространство для размещения емкости с технологическим материалом на ТТМ;

– снижается осевая нагрузка, что снижает уплотнение подпахотного слоя почвы;

– большее количество колес позволяет применять шины меньшего размера при равной общей грузоподъемности ходовой системы по сравнению с шинами балластируемого трактора, что очень важно для работы трактора в междурядьях пропашных культур;

– движение трех осей след в след снижает силу сопротивления качению трактора на сельскохозяйственных фонах и повышает сцепные свойства движителей.

В связи с перестройкой в стране и ликвидацией отрасли тракторостроения работа по созданию модульных энерготехнологических средств была закрыта на этапе, когда была выпущена опытная партия из 5 штук МЭС-200, изготовленная ЛТЗ по чертежам КБ МТЗ. МЭС-200 успешно прошел производственные испытания. Разработка и внедрение энергонасыщенного трактора (энергетического модуля) и ТТМ были включены в «Систему машин».

### Теория технологической эксплуатации сельскохозяйственного трактора

Всю совокупность сложившихся знаний о тракторе можно распределить на три раздела (рис. 8): теория трактора, теория конструирования трактора, теория эксплуатации трактора.

Теория трактора и теория конструирования сельскохозяйственного трактора возникли



а



б

Рис. 6. Модульное энерготехнологическое средство:  
а – МЭС-200; б – МЭС-300

Fig. 6. Modular energy technology machinery:  
а – MES-200; б – MES 300

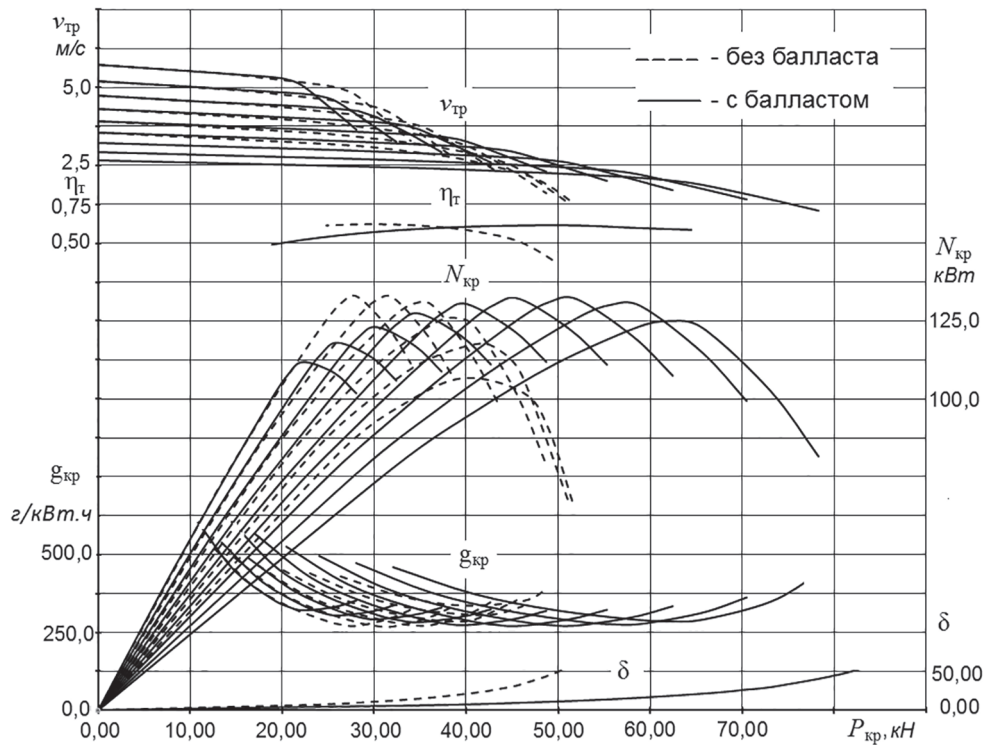


Рис. 7. Тяговая характеристика трактора тягово-энергетической концепции тягового класса 3–5

Fig. 7. Traction characteristic of the tractor of the traction-energy concept of the 3–5 drawbar category

практически одновременно с трактором. Их основоположниками принято считать Е.Д. Львова и Д.К. Карельских. Раздел теории эксплуатации трактора в настоящее время включает только техническую эксплуатацию. По моему мнению, он должен состоять из двух основных частей: технологической эксплуатации и технологической эксплуатации трактора.

Предмет изучения теории технологической эксплуатации трактора – методы анализа и оценки соответствия параметров, конструкции и характеристик трактора требованиям технологий сельскохозяйственного производства, характеризующимся известными эксплуатационно-технологическими показателями работы трактора.



Рис. 8. Структура науки о тракторе

Fig. 8. Tractor science structure

По существу знания технологических свойств трактора – это наука о его потребительских свойствах. Показатели технического и технологического уровня во многом зависят от одних и тех же параметров. Разница состоит в том, что трактор, как продукт машиностроения, развивается по своим законам, а требования к его технологическим свойствам определяют характеристиками технологического процесса сельскохозяйственного производства. Вследствие этого в настоящее время, например, возникли противоречия в соответствии параметров выпускаемых тракторов параметрам тягача.

Практическая консервация скоростей выполнения технологических операций в сельскохозяйственном производстве на достигнутом уровне препятствует непрерывному повышению энергонасыщенности трактора, потому что вследствие этого он утрачивает свойства тягача ( $\Theta_{тр} \leq 1,5$  кВт/кН). Компенсацию веса трактора до уровня тягача, как ранее уже отмечалось, производители осуществляют путем навешивания балластных грузов. Однако это лобовое решение паллиативно, поскольку со временем вес трактора по законам отрасли будет непрерывно уменьшаться, а вес компенсирующего балласта – пропорционально увеличиваться. Эта картина служит наглядным примером, как повышение технического уровня трактора понижает его технологический уровень [13]. Сложившаяся ситуация показывает, что сельское хозяйство не может оценивать трактор показателем его технического уровня, как это принято в настоящее время. В качестве оценочного параметра технологических свойств трактора я предложил использовать показатель технологического уровня –  $\Pi_T$ .

Все многообразие требований конкретного технологического процесса, предъявляемых к МТА, а следовательно, и к трактору можно выразить следующими обобщенными показателями: производительность, агротехнические свойства, стоимость технологического процесса. Экологические свойства учитываются в агротехнических.

Технологический уровень мобильного энергетического средства в целом в значительной мере зависит также от его технологической универсальности, которая также является обобщенным показателем технологических свойств. Поэтому показателем технологического уровня мобильного энергетического

средства будем считать комплексный показатель, зависящий от четырех обобщенных показателей технологических свойств. В общем виде его можно представить в виде следующей функциональной зависимости:

$$\Pi_T = f(Y_T, A_T, W_{II}, C_T),$$

где  $Y_T, A_T, W_{II}, C_T$  – обобщенный показатель соответственно технологической универсальности, агротехнических свойств производительности и стоимости выполнения технологических операций. В свою очередь обобщенные показатели зависят от единичных показателей технологических свойств. Общая структура показателей технологического уровня энергетических средств может быть представлена иерархической схемой (рис. 9).

Структура обобщенных показателей на рис. 9 показана как иллюстрация, условно, потому что количество единичных показателей ( $\alpha, \beta, \gamma, C$ ), характеризующих обобщенный показатель, и их номенклатура зависят от назначения сравниваемых энергетических средств и конкретной задачи по технологической оценке. Некоторые единичные показатели могут в свою очередь служить обобщенными. Тогда иерархия приобретет третью ступень и т.д.

Функциональная зависимость, отражающая эффективность использования энергетического средства на отдельных видах работ, – универсальность, имеет вид:

$$Y_T = f(\alpha_a, \alpha_{II}, \alpha_{м.о.}, \alpha_{уб.}, \alpha_{тр}),$$

где  $\alpha_a, \alpha_{II}, \alpha_{м.о.}, \alpha_{уб.}, \alpha_{тр}$  – показатель возможности эффективного использования мобильного энергетического средства соответственно в составе: навесных комбинированных агрегатов; на почвообрабатывающих операциях; на междурядной обработке пропашных культур; на уборочных работах, на транспортных работах.

Структура обобщенных показателей, методика определения единичных показателей, пример расчета и сравнительной оценки двух разных тракторов по технологическому уровню приведены в работе [7].

Выражение для определения показателя  $\Pi_T$  позаимствовано из стандарта регулирования качества и для нашей задачи имеет вид:

$$\Pi_T = S_Y \cdot Y_T + S_A \cdot A_T + S_W \cdot W_{II} + S_C \cdot C_T,$$

где  $S_Y, S_A, S_W, S_C$  – коэффициенты весомости соответствующих обобщенных показателей технологических свойств трактора.

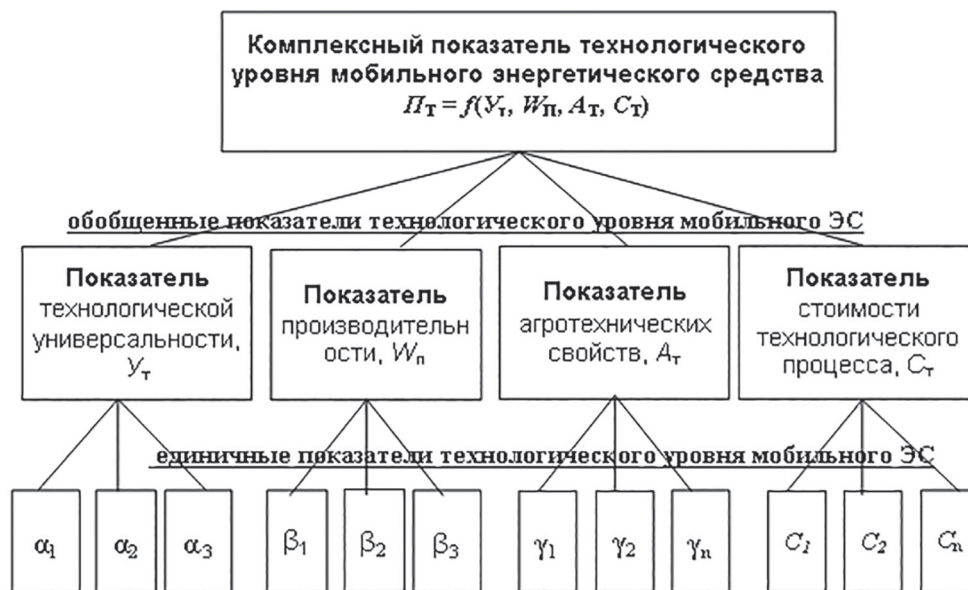


Рис. 9. Общая структура показателей технологического уровня энергетических средств

Fig. 9. General structure of indicators of the technological level of energy resources

Ниже приведено выражение с коэффициентами весомости  $S_y, S_A, S_W, S_C$ , полученными с помощью экспертных оценок для определенных условий, которые будем считать типовыми:

$$P_T = 0,4 \cdot Y_T + 0,3 \cdot A_T + 0,2 \cdot W_P + 0,1 \cdot C_T.$$

Результаты иллюстративного расчета представлены в таблице. Они свидетельствуют о том, что разрабатываемый трактор обладает одинаковым значением показателя технологическим уровнем по сравнению с трактором-аналогом. При этом он уступает трактору-аналогу по таким важным показателям технологических свойств, как универсальность и производительность, и компенсирует это, главным образом, за счет более низкой стоимости. Следовательно, у разрабатываемого трактора ЛТЗ-155 еще сохраняются резервы повышения технологического уровня.

Таблица

Показатели  $P_T$  тракторов ЛТЗ-155 и Fendt 716 Vario

Table.  $P_T$  indicators of LTZ-155 and Fendt 716 Vario tractors

|                                 | $Y_T$ | $A_T$ | $W_P$ | $C_T$ | $P_T$ |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Разрабатываемый трактор ЛТЗ-155 | 0,61  | 0,56  | 0,7   | 1     | 0,65  |
| Трактор-аналог Fendt 716 Vario  | 0,65  | 0,51  | 0,84  | 0,66  | 0,65  |

Разработка теории технологических свойств сельскохозяйственного трактора была начата в 1990-е гг. и достаточно полно освещена в тех-

нической литературе. На достигнутом уровне, который следует оценивать как начальный, но пригодный для практического использования, методика расчета показателя технологического уровня сельскохозяйственного трактора  $P_T$  наиболее полно изложена в моей работе [7].

### ГОСТ 7057–73. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний

Эта разработка не относится к теоретическим. Но имеет большое практическое значение как документ, регламентирующий методы испытаний трактора, обязательный к исполнению независимо от времени и места испытаний. Во времена плановой экономики, действовавшей в нашей стране, стандарт использовался главным образом испытательными организациями трех ведомств: Министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, «Союзсельхозтехники» и Министерства сельского хозяйства.

Актуальность разработки нового стандарта была очень острой, потому что существовавший в то время ГОСТ 7057–54 (двадцатилетней давности) был ориентирован на тракторы довоенной конструкции и устаревшие методы и средства испытаний. В 1970-е гг. действующий стандарт просто утратил свою силу, система испытаний тракторов начала входить в хаотическое состояние. Особенно остро

такое состояние проявилось в 1960-е гг., когда происходила полномасштабная замена в производстве и в эксплуатации устаревшей сельскохозяйственной техники на новую, обладающую более высоким техническим и технологическим уровнем. Это обстоятельство во многом служило тормозом в процессе создания новой техники.

В период планового ведения народного хозяйства новый ГОСТ разрабатывался (в начале 1970-х гг.) в содружестве двумя ведомствами: Министерством тракторного и сельскохозяйственного машиностроения и «Союзсельхозтехник», конкретно – НАТИ и Кубанским НИИ испытаний сельскохозяйственных тракторов и машин.

В едином документе ГОСТ 7057–73, как и в заменяемом ГОСТ 7057–54, были регламентированы методы буквально на все виды и типы испытаний: измерение линейных и весовых параметров трактора; регуляторная характеристика двигателя и тяговая характеристика трактора; эксплуатационно-технологические испытания; измерение показателей экологии, агротехники и условий труда тракториста.

Введение нового ГОСТ 7057–73 взамен ГОСТ 7057–54 стало заметным событием. Все виды испытаний сельскохозяйственных тракторов, и прежде всего Государственные, получили с введением нового стандарта единую законодательную базу методов испытаний, которая к этому времени практически была утрачена. Потребовалось повышение квалификации испытателей, существенное обновление и унификация средств проведения опытов. Все эти мероприятия в комплексе значительно повысили качество испытаний тракторов.

В разработке ГОСТ 7057–73 (25 с.) участвовали специалисты по испытаниям двигателей, тракторов, условиям труда тракториста, по надежности, экономисты и другие. А текст стандарта написали Г.М. Кутьков и В.С. Сафронов..

### Выводы

1. Активизировать и проводить на постоянной основе:

– исследования рынка тракторов и структуры сельскохозяйственного производства страны (личное, фермерское, коллективное и т.д.) как потребителя тракторов;

– прогноз развития концепции трактора, его технического и технологического уровня.

2. Продолжить развитие изложенных в технической литературе научных направлений: тяговой динамики трактора, теории технологической эксплуатации трактора до уровня практического применения методами математического и электронного моделирования в процессе создания трактора.

3. Ввести в перечень обязательных параметров оценки сельскохозяйственного трактора показатель технологического уровня  $P_T$  и методику его определения.

4. Внедрить в производство транспортно-технологический модуль, включенный в «Систему машин» в 1980-е гг.

### Литература

1. Болтинский В.Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке. М.: Сельхозгиз, 1949. 216 с.
2. Елизаров В.П., Кутьков Г.М., Шлуфман М.М. Исследование динамики машинно-тракторного агрегата на аналоговых вычислительных машинах (научная монография) // Труды ВИМ. Т. 38. М.: ОНТИ-ГОСНИТИ, 1964. 158 с.
3. Кутьков Г.М. Тяговая динамика трактора: научная монография. М.: Машиностроение, 1980. 216 с.
4. Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М. Динамика трактора: научная монография. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
5. Кутьков Г.М. Теория трактора и автомобиля: учебное пособие. М.: Колос, 1996. 287 с.
6. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: учебник. М.: Колос, 2004. 504 с.
7. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: учебник, 2-е издание. М.: Инфра-М, 2014. 506 с.
8. Кутьков Г.М., Мининзон В.И. Перспективный типаж тракторов должен быть оптимальным // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1967. № 1.
9. Кутьков Г.М., Мининзон В.И., Тюленев А.В., Исаков-Плюхин Б.И. Математическая модель для расчета перспективной системы машин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1967. № 11.
10. Кутьков Г.М., Мининзон В.И. Общая постановка задачи определения оптимальной перспективной системы машин. М.: Труды ВИМ. 1968. Т. 45. 10 с.
11. Кутьков Г.М., Чухчин Н.Ф., Мусин А.Р. Технологические и агротехнические основы развития

МЭС как трактора второго поколения тягово-энергетической концепции. М.: ГОНТИ-НПО «НАТИ», 1983. С. 3–12.

12. Кут'ков Г.М., Грибов И.В., Перевозчикова Н.В. Балластирование тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 9.
  13. Кут'ков Г.М. Развитие технической концепции трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 1.
  14. Кут'ков Г.М. Технологические основы мобильных энергетических средств: учебное пособие М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 1999. Ч. 1. 148 с.
  15. Кут'ков Г.М. Технологические основы мобильных энергетических средств: учебное пособие. М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2000. Ч. 2. 135 с.
- ## References
1. Boltinskiy V.N. Rabota traktornogo dvigatelya pri neustanovivsheysya nagruzke [Tractor engine operation at unsteady load]. Moscow: Sel'khozgiz Publ., 1949. 216 p.
  2. Yelizarov V.P., Kut'kov G.M., Shlufman M.M. Issledovaniye dinamiki mashinno-traktornogo agregata na analogovykh vychislitel'nykh mashinakh (nauchnaya monografiya) [Investigation of the dynamics of a machine-tractor unit on analog computers (scientific monograph)]. Trudy VIM. Vol. 38. Moscow: ONTI-GOSNITI Publ., 1964, 158 p.
  3. Kut'kov G.M. Tyagovaya dinamika traktora (nauchnaya monografiya) [Traction dynamics of a tractor (scientific monograph)]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1980. 216 p.
  4. Barskiy I.B., Anilovich V.YA., Kut'kov G.M. Dinamika traktora (nauchnaya monografiya) [Tractor dynamics (scientific monograph)]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1973. 280 p.
  5. Kut'kov G.M. Teoriya traktora i avtomobilya (uchebnoye posobiye s grifom ministerstva) [The theory of the tractor and the automobile (textbook with the stamp of the ministry)]. Moscow: Kolos Publ., 1996. 287 p.
  6. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskiye svoystva (uchebnik) [Tractors and automobiles. Theory and technological properties (textbook)]. Moscow: Kolos Publ., 2004. 504 p.
  7. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskiye svoystva (uchebnik, 2-e izdaniye) [Tractors and automobiles. Theory and technological properties (textbook, 2nd edition)]. Moscow: Infra-M Publ., 2014. 506 p.
  8. Kut'kov G.M., Mininzon V.I. The promising type of tractors must be optimal. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva. No 1, 1967 (in Russ.).
  9. Kut'kov G.M., Mininzon V.I., Tyulenev A.V., Isakov-Plyukhin B.I. Mathematical model for calculating a promising system of machinery. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva. No 11, 1967 (in Russ.).
  10. Kut'kov G.M., Mininzon V.I. Obshchaya postanovka zadachi opredeleniya optimal'noy perspektivnoy sistemy mashin [General formulation of the problem of determining the optimal prospective system of machinery]. Moscow: Trudy VIM, Vol. 45, 10 p. 1968.
  11. Kut'kov G.M., Chukhchin N.F., Musin A.R. Tekhnologicheskiye i agrotekhnicheskiye osnovy razvitiya M-ES kak traktora vtorogo pokoleniya tyagovo-energeticheskoy kontseptsii [Technological and agrotechnical foundations for the development of modular energy technology machinery as a tractor of the second generation of the traction and energy concept]. Moscow: GONTI-NPO «НАТИ» Publ., 1983, pp. 3–12.
  12. Kut'kov G.M., Gribov I.V., Perevozchikova N.V. Ballasting of tractors. Traktory i sel'khoz mashiny, No 9, 2017 (in Russ.).
  13. Kut'kov G.M. Development of the technical concept of the tractor. Traktory i sel'khoz mashiny, No 1, 2019 (in Russ.).
  14. Kut'kov G.M. Tekhnologicheskiye osnovy mobil'nykh energeticheskikh sredstv [Technological foundations of mobile energy machinery] (uchebnoye posobiye). Moscow: MGAU im. V.P. Goryachkina Publ., 1999. CH. 1. 148 p.
  15. Kut'kov G.M. Tekhnologicheskiye osnovy mobil'nykh energeticheskikh sredstv [Technological foundations of mobile energy machinery] (uchebnoye posobiye). Moscow: MGAU im. V.P. Goryachkina Publ., 2000. CH. 2. 135 p.